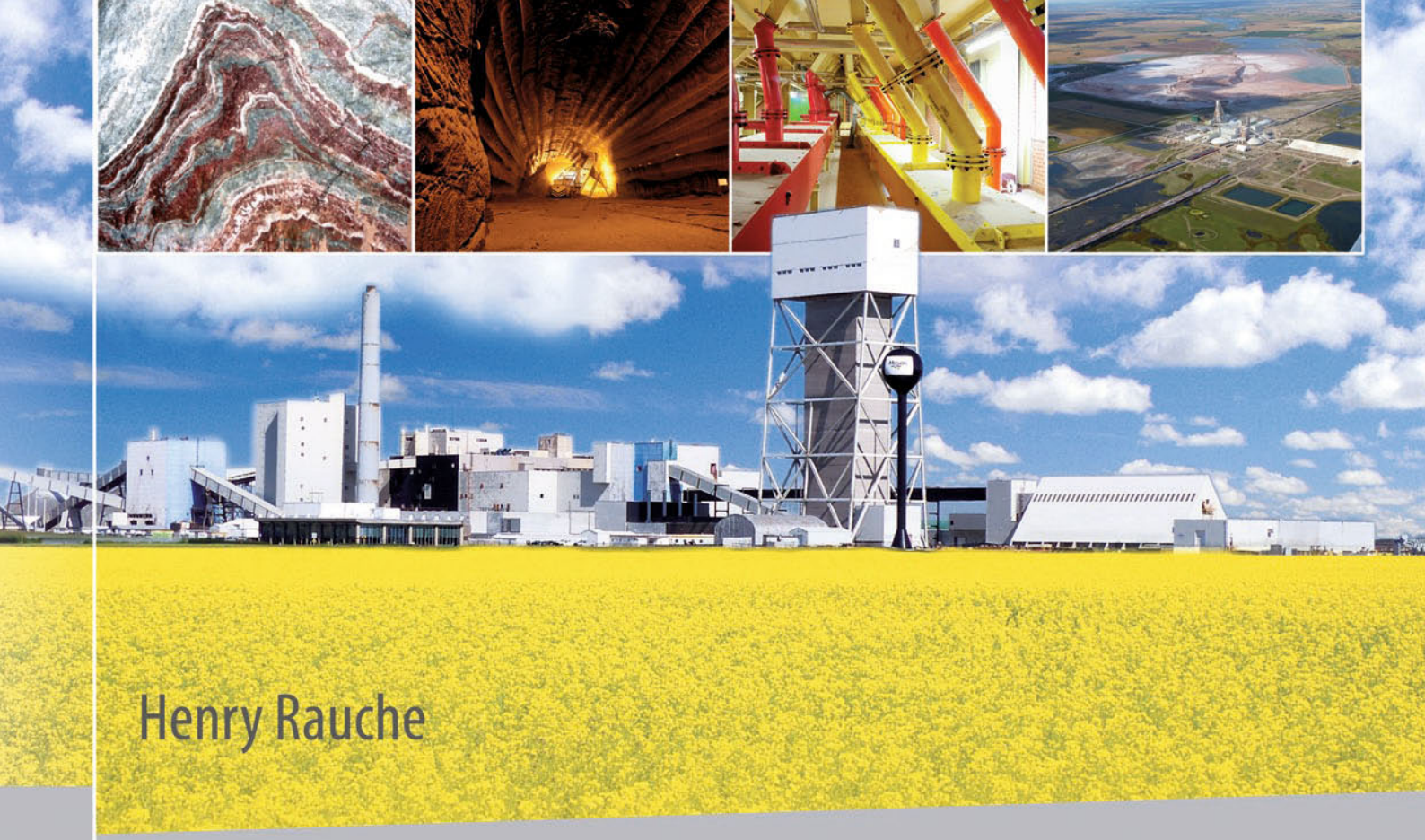


Henry Rauche

Die Kaliindustrie im 21. Jahrhundert

Stand der Technik bei der Rohstoffgewinnung und der Rohstoffaufbereitung sowie bei der Entsorgung der dabei anfallenden Rückstände

Springer Vieweg

Henry Rauche

Die Kaliindustrie im 21. Jahrhundert

Stand der Technik bei der Rohstoffgewinnung und der Rohstoffaufbereitung sowie bei der Entsorgung der dabei anfallenden Rückstände

Springer Vieweg

Henry Rauche
Ingenieurgesellschaft Geotechnik
und Berbau mbH
ERCOSPLAN
Erfurt, Deutschland

ISBN 978-3-662-46833-3 ISBN 978-3-662-46834-0 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-46834-0

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Springer Vieweg
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015
Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.
Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.
Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Berlin Heidelberg ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
(www.springer.com)

Widmung

Dieses Buch ist all den Menschen gewidmet, die den Stand der Technik bei der Kalidüngemittelproduktion entwickelt haben, jenen vor Ort auf den Bergwerken, auf den Solfeldern, an den Eindampfbecken und in den Aufbereitungsanlagen, sowie jenen in den Ingenieurbüros und Forschungseinrichtungen, in den Berg- und anderen Aufsichtsbehörden, all jenen im Mutterland der Kaliindustrie, in Deutschland, und jenen in den anderen 19 Ländern, wo die Kalidüngemittelproduktion eine Heimstatt gefunden hat, und die alltäglich mit ihrer Wertschöpfung die Standortregionen bereichern und ihren Beitrag zur Ernährung einer wachsenden Weltbevölkerung geleistet haben und heute noch leisten, den Pionieren der Frühzeit, aus deren Leistungen wie auch Fehlern die Nachgekommenen Erfahrungen geschöpft haben, den Vätern der modernen Kaliindustrie, auf deren Schultern wir heute Tätigen stehen, und insbesondere auch jenen, die seit mehr als einem halben Jahrhundert mit ihrer täglichen professionellen Arbeit in der Arnstädter Strasse 28 in Erfurt der innovativen Weiterentwicklung der Kaliindustrie verpflichtet waren und auch heute noch sind – Kurzum: all jenen, die es der praktischen Tätigkeiten im tagtäglichen Produktionsbetrieb oder bei der vorausschauenden Planung wegen, stets viel besser wussten und wissen, als es hier synoptisch auf knapp 600 Seiten zu Papier gebracht werden kann.

Glückauf!

Danksagung

Zum Gelingen dieses Buches haben viele Menschen wesentliche und wertvolle sowie fleißige Beiträge geleistet. Zunächst sind es die vielen Kalifachleute von den Produktionsstandorten oder Unternehmenszentralen der Kaliproduzenten oder auch von Berg- und Umweltbehörden in Deutschland und der ganzen Kaliwelt. Auf der Grundlage einer zum Teil jahrzehntelangen kollegialen Verbundenheit standen sie dem Autor für gezielte Nachfragen zu den vielfältigen Produktionsdetails zur Verfügung. Auch wenn die namentliche Nennung aller dieser zahlreichen Helfer hinter den Kulissen hier weder sinnvoll noch aus Platzgründen möglich ist, gebührt ihnen allen zu allererst mein herzlicher Dank.

Bei der Fleißarbeit der Datensammlung und -auswertung haben mich vor allem meine Kollegen der ERCOSPLAN Unternehmensgruppe unterstützt. Mein besonderer Dank gilt hier Carsten Ackermann, Mehran Azimi, Jorge Carracedo, Julia Wjatscheslawowna Chtchekourova, Stephan Donndorf, Samantha Goldmann, Dr. Sven Harms, Alireza Hezarkhani, Dzianis Alexandrovich Iholka, Katsiaryna Yuryevna Iholka, Steffi Jahn, Andreas Jockel, Dr. Eike Kaps, Jürgen Kaufmann, Dr. Sebastiaan van der Klauw, Marcel Lindner, Ralf Linsenbarth, Jana Neubert, Urko Onaindia, Sabine Opel, Thomas Teichert und Detlef Wolff.

Ein Kompendium wie das vorliegende Buch lebt von den Korrekturen – von denen, die vor dem Erscheinen bereits vollzogen wurden und jenen die nun noch ausstehen! Für ihre Beiträge zu den erstgenannten bin ich Dr. Dietrich Fulda, Dr. Peter Marggraf, Dr. Christian Schilder und Volker Schwalm zu Dank verpflichtet, insbesondere aber Carsten Ackermann und Heidrun Rauche für ihre unermüdliche Ausdauer bei der Durchsicht der Manuskripte.

Meiner Frau Heidrun Rauche gebührt auch der Dank für den über viele Jahre bewiesenen Fleiß bei der Sammlung und Aktualisierung all der vielfältigen Informationen zu den Produktionsstandorten und deren synoptischer Zusammenfassung in Form der STANDORT-STECKBRIEFE in Kapitel 10 des Buches.

Die zeitaufwendigen und wegen ihren Wiederholungen auch anstrengenden Arbeiten zum Layout, zu den zahlreichen Bildern und Karten, zur Vereinheitlichung all der Referenzen und all jene technische Tätigkeiten, die man geflissentlich übersieht, wurden mit großem Engagement und viel Sachkunde von unserer kleinen Grafikgruppe der ERCOSPLAN Unternehmensgruppe erledigt. Mein Dank gilt hier besonders Tina Müller, Christiane Schneble und vor allem Nadin Treff.

Euch allen vielen Dank!

Henry Rauche

Erfurt, Arnstädter Straße 28, im Frühsommer 2015

Inhaltsverzeichnis

1 Begriffsbestimmung und Methodik 21

2 Ursprung und Geschichte der industriellen Produktion von Kalidüngemitteln 37

3 Kaliverbrauch und Kaliproduktion heute 47

3.1 Notwendigkeit der Kalidüngemittelproduktion sowie Triebkräfte für den Kalimarkt und Entwicklungstrends 48

3.2 Kaliproduzenten und Vertriebsstrukturen 60

3.3 Anforderungen an Kaliprodukte und handelsübliche Spezifikationen 63

4 Randbedingungen der Kalidüngemittelproduktion 67

4.1 Lagerstättengeologische Randbedingungen 68

4.2 Hydrogeologische und andere bergbausicherheitliche Randbedingungen 76

4.3 Klimatische Randbedingungen 79

4.4 Infrastrukturelle und logistische Randbedingungen 81

5 Methoden, Verfahren und Anlagen zur Gewinnung von Kalirohstoffen 85

5.1 Gewinnung fester Kalirohsalze aus dem geologischen Untergrund 87

5.1.1 Bergmännische Gewinnung von festen Kalirohsalzen 105

5.1.1.1 Gewinnungsmethoden 111

5.1.1.2 Abbauverfahren auf Lagerstätten der Flachen Lagerung 117

5.1.1.3 Abbauverfahren auf Lagerstätten der Steilen Lagerung 129

5.1.1.4 Vergleich der Abbauverluste für die heute praktizierten Abbauverfahren der Flachen und der Steilen Lagerung 130

5.1.2 Soltechnische Gewinnung von festen Kalirohsalzen 134

5.1.2.1 Nicht-selektives Solverfahren 138

5.1.2.2 Selektives Solverfahren 139

5.2 Gewinnung von natürlichen wertstoffarmen Lösungen an oder nahe der Erdoberfläche 142

6 Methoden, Verfahren und Anlagen zur Aufbereitung von Kalirohstoffen sowie zur Veredlung, Speicherung und zum Transport von Fertigprodukten 149

6.1 Aufbereitung von festen Kalirohsalzen aus der Bergmännischen Gewinnung 150
6.1.1 Aufbereitung fester Kalirohsalze durch Flotation 155
6.1.2 Aufbereitung fester Kalirohsalze durch Heißverlösung und anschließende Kühlkristallisation 162
6.1.3 Aufbereitung fester Kalirohsalze durch elektrostatische Sortierung 171
6.1.4 Aufbereitung fester Kalirohsalze durch Schweretrennung 173
6.1.5 Vergleich der Aufbereitungsverfahren für feste Rohsalze 173
6.2 Aufbereitung von technischen Lösungen aus der Soltechnischen Gewinnung von festen Kalirohsalzen 175
6.3 Aufbereitung natürlicher wertstoffarmer Lösungen 180
6.4 Waschen, Decken, Entwässerung der Zwischenprodukte und Trocknung 183
6.5 Kompaktierung und Granulierung 189
6.6 Speicherung und Transport der Fertigprodukte 193

7 Massen-Volumen-Bilanzen der Kalidüngemittelproduktion und Möglichkeiten zur Erzeugung verkaufsfähiger Nebenprodukte 195

8 Methoden, Verfahren und Anlagen zur Entsorgung von Rückständen aus der Gewinnung und Aufbereitung von Kalirohstoffen zu Kalidüngemitteln 221

8.1 Beseitigung fester Gewinnungs- und Aufbereitungsrückstände 230
8.1.1 Beseitigung fester Gewinnungs- und Aufbereitungsrückstände als Versatz 236
8.1.1.1 Verfahren zum Transport und zum Einbringen trockenen Versatzgutes 242
8.1.1.2 Verfahren zum Transport und zum Einbringen von Versatz mit Hilfe von Trägerflüssigkeiten 246
8.1.2 Beseitigung der festen Aufbereitungsrückstände durch Aufhaldung 253
8.1.2.1 Art der Ablagerung und daraus resultierender Flächenbedarf 257
8.1.2.2 Entwicklung der Haldenkörper und struktureller Bau 263
8.1.2.3 Auswahl und Vorbereitung des Haldenstandortes 265
8.1.2.4 Haldenbewirtschaftung sowie Anforderungen an das Haldenmonitoring 267
8.1.2.5 Abdeckung und Begrünung des Haldenkörpers 269
8.1.3 Auflösung der festen Aufbereitungsrückstände und deren Beseitigung in flüssiger Form 274
8.2 Beseitigung flüssiger Aufbereitungsrückstände 274
8.3 Entsorgung der durch die Aufhaldung der festen Aufbereitungsrückstände anfallenden Salzlösungen 285

9 Zusammenfassende Diskussion zum Stand der Technik bei der Kalidüngemittelproduktion 289

10 STANDORT-STECKBRIEFE 297

Anhang 477

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS 479

GLOSSAR 487

REFERENZEN 505

BILDNACHWEIS 579

EINLEITUNG

Unsere moderne Industriegesellschaft ist nicht zuletzt durch das Spannungsfeld von Ökonomie und Ökologie charakterisiert. Die Industrie im Allgemeinen, der Bergbau und so auch die Kaliindustrie im Besonderen, stehen vielfach im Brennpunkt der Öffentlichen Diskussion, wenn es um die Erreichung von berg-, wasser- und umweltrechtlichen Erlaubnissen oder Genehmigungen für bereits bestehende oder künftige Produktionsstandorte geht. In Deutschland, in ähnlicher Weise aber auch anderenorts, sind durch den Antragsteller solche Beschreibungen zum beabsichtigten Vorhaben vorzulegen, die vielfach auf den Stand der Technik Bezug nehmen. Auch die interessierte Öffentlichkeit, oftmals getragen von Umweltverbänden, reflektiert in ihren Stellungnahmen zu solchen Vorhaben nicht selten auf einen anderswo praktizierten, vermeintlich höheren Stand der Technik, als er den gerade zur Rede stehenden Antragsunterlagen zugrunde liegt. Dieser Ansatz ist nur allzu gut nachzuvollziehen, folgt er doch nicht zuletzt einem Grundprinzip menschlicher Hoffnung, das Hermann Hesse (1877 – 1962) in einem Brief an seinen Vetter, den Ostasienwissenschaftler Wilhelm Gundert (1880 – 1971) im Jahre 1960 mit folgenden Worten beschrieben hat: *"Damit das Mögliche entsteht, muss immer wieder das Unmögliche versucht werden"* (Lindenberg 2008, /594/).

Für ein technisches Vorhaben aber, das sich in einem konkreten rechtlichen Umfeld vollzieht, ist es zwangsläufig notwendig, die Diskussion zum Stand der Technik auf sachlich fundierter Grundlage zu führen. Das vorliegende Buch möchte daher den derzeitigen Stand der Technik bei der Kalidüngemittelproduktion möglichst konkret definieren – um bei Hermann Hesse zu bleiben: Das heute, also in unserer ökologischen, ökonomischen, politischen und rechtlichen Wirklichkeit in der Mitte des zweiten Jahrzehnts des 21. Jahrhunderts *Mögliche* aufzeigen und von dem zurzeit oder ganz und gar *Unmöglichen* abgrenzen. Dazu sollen die von den Kalidüngemittelproduzenten weltweit betriebenen Methoden[1], Verfahren[2] und Anlagen[3] zur Rohstoffgewinnung und -aufbereitung ebenso wie die zur Reduzierung von Aufbereitungsrückständen sowie die

1 Unter einer technischen Methode wird hier der grundlegende Weg zum Erreichen einer technischen Zielstellung im Sinne grundsätzlicher physikalischer und/oder chemischer Wirkprinzipien verstanden.

2 Unter einem technischen Verfahren wird hier der geregelte, in Teilschritte zerlegbare, nachvollziehbare und wiederholbare Ablauf von Arbeitsschritten und Reaktionen verstanden.

3 Unter einer technischen Anlage wird hier eine Summe technischer Einrichtungen verstanden, die zur Durchführung technischer Verfahren erforderlich sind.

Wege zur Entsorgung – als die Summe aus Verwertung und Beseitigung solcher Stoffströme – behandelt werden. Letztere vor allem deshalb, weil diese doch in der von einer wachsenden Umweltmoral und der Forderung nach Nachhaltigkeit getragenen Öffentlichen Diskussion auch im besonderen Interesse stehen.

Das vorliegende Buch ist auch ein Resultat eines mittlerweile drei Jahrzehnte währenden Berufslebens des Autors mit der Kaliindustrie. Vor allem aber ist es das Ergebnis einer gezielten, mehr als dreijährigen Recherche und Analyse zu den unterschiedlichen technischen Methoden, Verfahren und Anlagen, wie sie an den weltweit insgesamt 71 Standorten[4] zur Kalidüngemittelproduktion betrieben werden, sowie zu den dort bestehenden, sehr verschiedenartigen lagerstätten- und hydrogeologischen, klimatischen und infrastrukturellen oder logistischen Randbedingungen (▸ Tabelle 1).

Tabelle 1 Standorte der Kalidüngemittelproduktion weltweit, sortiert nach dem Produktionsvolumen der einzelnen Kaliproduzenten und deren Produktionsstandorten. Die exakten geografischen Lokationen der einzelnen Produktionsstandorte und weiterführende Informationen sind als STANDORT-STECKBRIEFE in Kapitel 10 zu finden. Im weiteren Textfluss werden die in Klammern hinter dem vollständigen Firmennamen der einzelnen Kalidüngemittelproduzenten aufgeführten Kurzbezeichnungen verwendet. (▸ STANDORT-STECKBRIEFE in Kapitel 10)

Produzent/Standort[5]		Region	Land	Lfd. Nr.
PAO URALKALI[6] (URALKALI)				
Solikamsk 3	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	Obere Kama, Perm	Russland	1
Berezniki 4	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	Obere Kama, Perm	Russland	2
Solikamsk 2	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	Obere Kama, Perm	Russland	3
Berezniki 3	Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	Obere Kama, Perm	Russland	4
Berezniki 2	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	Obere Kama, Perm	Russland	5
Solikamsk 1	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	Obere Kama, Perm	Russland	6

4 Es wurden nur solche Standorte gezählt, an denen im Jahr 2014 planmäßig und im industriellen Routinebetrieb verkaufsfähige Fertigprodukte mit einer Tonnage von mehr als 20.000 Tonnen (durchschnittlich >2,5 Tonnen pro Betriebsstunde) produziert wurden. Darunter befinden sich allein 24, der Produktionskapazität nach sehr unterschiedliche Standorte in Westchina, die aufgrund komplexer Eigentums- und/oder Beteiligungsverhältnisse sowie gemeinsamer Vermarktungsstrukturen nicht differenziert worden sind. Pilotanlagen für die künftige industrielle Kalidüngemittelproduktion oder im Bau befindliche Anlagen wurden nicht in diese Zählung aufgenommen, da an diesen Standorten im Jahr 2014 keine nennenswerte Produktion im industriellen Routinebetrieb erzielt wurde. Der Vollständigkeit halber sei darauf verwiesen, dass seit 2008 am Standort Ebensee, Republik Österreich, durch die SALINEN AUSTRIA AG im Rahmen der Entsorgung von flüssigen Aufbereitungsrückständen aus der Steinsalz-Produktion auch jährlich einige Tausend Tonnen Kaliumsulfat für die Weiterverwendung bei der Kalidüngemittelproduktion erzeugt werden.

5 Allen Aufzählungen und Tabellen zu den Kalidüngemittelproduzenten sowie deren Produktionsstandorten liegt als Gliederungsprinzip die Auflistung nach der heute, also Mitte des Jahres 2015 installierten Kalidüngemittelproduktionskapazität zugrunde. Vorsorglich sei darauf hingewiesen, dass sich an vielen Produktionsstandorten zurzeit beziehungsweise in den nächsten Jahren auch Veränderungen zum Produktionsumfang ergeben, weshalb die hier vorgenommene statistische Sortierung nur eine Momentaufnahme sein kann.

6 Im Jahre 2012 wurde in der Russischen Föderation eine Reform des Unternehmensrechts durchgeführt, die auch Auswirkungen auf die Bezeichnung der Unternehmensform hatte. URALKALI war demnach nach altem Recht eine Offene Aktiengesellschaft (OAO) und firmiert heute als Öffentliche Aktiengesellschaft (PAO).

Produzent/Standort[5]		Region	Land	Lfd. Nr.
POTASH CORPORATION OF SASKATCHEWAN INC. (PCS)				
Lanigan	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	Saskatchewan	Kanada	7
Rocanville	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	Saskatchewan	Kanada	8
Allan	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	Saskatchewan	Kanada	9
Cory	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	Saskatchewan	Kanada	10
New Brunswick[7]	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	New Brunswick	Kanada	11
Patience Lake	Solanlage[8] zur Gewinnung technischer Lösungen und Anlage zu deren Aufbereitung	Saskatchewan	Kanada	12
THE MOSAIC COMPANY (MOSAIC)				
Esterhazy K1	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	Saskatchewan	Kanada	13
Esterhazy K2	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	Saskatchewan	Kanada	14
Belle Plaine	Solfeld zur Gewinnung technischer Lösungen und Anlage zu deren Aufbereitung	Saskatchewan	Kanada	15
Colonsay	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	Saskatchewan	Kanada	16
Carlsbad	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	New Mexico	USA	17
Hersey[9]	Solfeld zur Gewinnung technischer Lösungen und Anlage zu deren Aufbereitung	Michigan	USA	18

7 Die *New Brunswick Division* von PCS schließt streng genommen zwei Bergwerke ein, einmal das seit 1986 betriebene und durch Salzlösungszutritte hydrogeologisch gefährdete Bergwerk Penobsquis, dessen Stilllegung für die nächsten Jahre beabsichtigt ist, sowie das neu aufgefahrene und 2014 als Ersatz für Penobsquis in Betrieb genommene Bergwerk Picadilly.

8 Am Standort Patience Lake, Saskatchewan, Kanada, wird kein planmäßig zur Soltechnischen Gewinnung eingerichtetes Solfeld, sondern ein abgesoffenes/geflutetes Bergwerk zur Gewinnung von Produktionslösungen für die Kalidüngemittelproduktion genutzt. Auch am Standort Moab, Utah, USA, wird ein abgesoffenes/geflutetes Bergwerk zur Herstellung der Produktionslösung genutzt, hier jedoch seit einigen Jahren auch ein planmäßig zur Soltechnischen Gewinnung entwickeltes Solfeld betrieben.

9 Im Juli 2014 wurde der Produktionsstandort Hersey von MOSAIC an den Mischkonzern CARGILL veräußert, der dort seitdem lediglich NaCl-Produkte herstellt. Die Kalidüngemittelproduktion wurde im Vorfeld dieses Eigentümerwechsels eingestellt. Da am Standort Hersey noch im Jahre 2014 Kalidüngemittel produziert worden sind, wurden die dort betriebenen Verfahren, Methoden und Anlagen bei der Herleitung des Standes der Technik ebenfalls mit einbezogen.

Produzent/Standort[5]		Region	Land	Lfd. Nr.
OAO BELARUSKALI (BELARUSKALI)				
Soligorsk 4	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	Minskaja Woblasz	Belarus	19
Soligorsk 3	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	Minskaja Woblasz	Belarus	20
Soligorsk 2	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	Minskaja Woblasz	Belarus	21
Soligorsk 1	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	Minskaja Woblasz	Belarus	22
Soligorsk 5 (Krasnoslobodsky)	Bergwerk zur Gewinnung fester Kalirohsalze	Minskaja Woblasz	Belarus	23
Soligorsk 6 (Berezowsky)	Bergwerk zur Gewinnung fester Kalirohsalze	Minskaja Woblasz	Belarus	24
CHINA, alle Produzenten zusammengefasst[10]				
Mindestens 24 Standorte unterschiedlichster Größe	Anlagen zur Gewinnung und zur Aufbereitung natürlicher Salzlösungen	Qinghai und Xinjiang	China	25 – 48
K+S KALI GMBH (K+S)				
Verbundwerk Werra, bestehend aus den Standorten:				
Wintershall	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	Hessen	Deutschland	49
Hattorf	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	Hessen	Deutschland	50
Unterbreizbach	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	Thüringen	Deutschland	51

10 Die öffentlich zugänglichen Informationen zu Anzahl der Betreibergesellschaften und zu den Standorten der chinesischen Kalidüngemittelproduktion ergeben nicht immer ein in sich schlüssiges Bild. Insbesondere zu Produktionskapazitäten und Produktionsdauer, aber auch zu den Wertstoffinhalten der Lagerstätten sind die Informationen mitunter widersprüchlich. Insbesondere die kleineren chinesischen Kalidüngemittelproduzenten betreiben recht sporadische Unternehmungen, was die relativ große Anzahl der Einzelstandorte erklärt.

Produzent/Standort[5]		Region	Land	Lfd. Nr.
Zielitz	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	Sachsen-Anhalt	Deutschland	52
Neuhof-Ellers	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	Hessen	Deutschland	53
Sigmundshall	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	Niedersachsen	Deutschland	54
DEAD SEA WORKS LTD.[11] (DSW)				
Dead Sea	Anlagen zur Gewinnung und zur Aufbereitung natürlicher Salzlösungen	Totes Meer	Israel	55
ICL IBERIA SÚRIA & SALLENT S.A.[12] (ICL IBERIA S & S)				
Súria	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	Katalonien	Spanien	56
Cabanasas	Bergwerk zur Gewinnung fester Kalirohsalze	Katalonien	Spanien	57
Sallent	Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	Katalonien	Spanien	58
Villafruns	Bergwerk zur Gewinnung fester Kalirohsalze	Katalonien	Spanien	59
CLEVELAND POTASH LTD.[13] (CPL)				
Boulby	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	Borough of Redcar and Cleveland	Groß-britannien	60
ARAB POTASH COMPANY PLC. (APC)				
Safi	Anlagen zur Gewinnung und zur Aufbereitung natürlicher Salzlösungen	Totes Meer	Jordanien	61

11 Der Kalidüngemittelproduzent DSW ist ein Tochterunternehmen der ISRAEL CHEMICALS LTD. (ICL) und der Stammbetrieb des heutigen Geschäftsbereiches ICL FERTILZERS. In den STANDORT-STECKBRIEFE in Kapitel 10 und mitunter auch in den Tabellen der folgenden Abschnitte wird DSW deshalb auch mit den anderen, in diesem Geschäftsbereich verankerten kalidüngemittelproduzierenden ICL-Beteiligungen abgehandelt.

12 Der Kalidüngemittelproduzent ICL IBERIA S & S, im Sommer 2014 durch Umfirmierung der früheren IBERPOTASH S.A. entstanden, gehört zur Holding der ICL IBERIA S.A.. ICL IBERIA gehört zu 54,5 Prozent der ASHLI CHEMICALS LTD., einem 100prozentigem Tochterunternehmen der DSW, und mit den verbleibenden 45,5 Prozent der DSW selbst. ICL IBERIA S & S wie auch bereits der Vorgänger IBERPOTASH gehören vollständig der ICL-Gruppe und sind seit 1998 Teil des heutigen Geschäftsbereiches ICL FERTILZERS. In den STANDORT-STECKBRIEFE in Kapitel 10 und mitunter auch in den Tabellen der folgenden Abschnitte wird ICL IBERIA S & S deshalb auch mit den anderen, in diesem Geschäftsbereich verankerten kalidüngemittelproduzierenden ICL-Beteiligungen abgehandelt.

13 Der Kalidüngemittelproduzent CPL ist ein 100prozentiges Tochterunternehmen der ICL und seit 2002 Teil des heutigen Geschäftsbereiches ICL FERTILZERS. In den STANDORT-STECKBRIEFE in Kapitel 10 und mitunter auch in den Tabellen der folgenden Abschnitte wird CPL deshalb auch mit den anderen, in diesem Geschäftsbereich verankerten kalidüngemittelproduzierenden ICL-Beteiligungen abgehandelt.

Produzent/Standort[5]		Region	Land	Lfd. Nr.
AGRIUM INC. (AGRIUM)				
Vanscoy	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	Saskatchewan	Kanada	62
SOCIEDAD QUIMICA Y MINERA DE CHILE S.A. (SQM)				
Salar de Atacama	Anlagen zur Gewinnung und zur Aufbereitung natürlicher Salzlösungen	Antofagasta	Chile	63
INTREPID POTASH INC. (INTREPID)				
Carlsbad East	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	New Mexico	USA	64
Carlsbad West	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	New Mexico	USA	65
Moab	Solanlage[8] und Solfeld zur Gewinnung technischer Lösungen und Anlage zu deren Aufbereitung	Utah	USA	66
Wendover	Anlagen zur Gewinnung und zur Aufbereitung natürlicher Salzlösungen	Utah	USA	67
VALE S.A.[14] (VALE)				
Taquari-Vassouras	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	Sergipe	Brasilien	68
COMPASS MINERALS INTERNATIONAL INC. (COMPASS)				
Great Salt Lake	Anlagen zur Gewinnung und zur Aufbereitung natürlicher Salzlösungen	Utah	USA	69
GAK UZKIMYOSANAT (UZKIMYOSANAT)[15]				
Dechkanabad	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	Kashkadarya	Usbekistan	70
DEUSA INTERNATIONAL GMBH (DEUSA)				
Kehmstedt/Bleicherode	Solfeld zur Gewinnung technischer Lösungen und Anlage zu deren Aufbereitung	Thüringen	Deutschland	71

14 VALE ist der Betreiber des zur Zeit einzigen Kaliwerkes in Brasilien und nutzt dort in einer Art *contract mining* die Lagerstättenkonzession Taquari-Vassouras, die der PETROMISA S.A., einem Tochterunternehmen des brasilianischen Öl- und Gaskonzerns PETROBRAS S.A. gehört.

15 Государственная акционерная компания УЗКИМЕСАНОАТ; auf Deutsch: Staatliche Aktiengesellschaft UZKIMYOSANAT

An insgesamt 65 Standorten wird beides, die Rohstoffgewinnung und -aufbereitung in unmittelbarer räumlicher Nähe und in eigens aufeinander abgestimmten Anlagen durchgeführt. Dagegen erfolgt an 4 Standorten lediglich die Bergmännische Gewinnung von festen Kalirohsalzen, deren Aufbereitung anderenorts, gemeinsam mit dort in eigenständigen Bergwerken gewonnenen Rohstoffströmen durchgeführt wird. An 2 Standorten findet nur die Aufbereitung fester Kalirohsalze, die wiederum anderenorts gewonnen und zu diesen beiden Standorten antransportiert werden, statt.

Im Ergebnis der Recherchen und Analysen wird der derzeit, also in der Mitte der zweiten Dekade des 21. Jahrhunderts bestehende Stand der Technik konkret und soweit allgemeingültig definiert, wie dies unter Würdigung der an den einzelnen Produktionsstandorten sehr verschiedenartigen natürlichen und/oder vom Menschen geschaffenen Randbedingungen möglich ist.

Der Stand der Technik bei der Kalidüngemittelproduktion wurde auch bereits früher verschiedentlich zum Gegenstand monographischer Abhandlungen. Eine frühe und den Stand der Technik zur Zeit des deutschen Kalimonopols zusammenfassende Darstellung wurde von Michels & Przibylla (1916, /650/) herausgegeben. Für die deutschsprachige Fachliteratur sind vor allem aber die nach dem Zweiten Weltkrieg aufgelegten Klassiker von Spackeler (1950, /965/; 1957, /966/), später von Gimm (1968, /331/), besonders für die Bergmännischen Gewinnungsverfahren, sowie von Serowy (1952, /922/) und Kühnel (1953, /569/) für die Aufbereitung fester Kalirohsalze zu erwähnen. Ein sehr umfangreicher und vorzüglich recherchierter englischsprachiger Band zu allen Aspekten der Kalidüngemittelproduktion, gleich welcher Rohstoffgrundlage sie entspringt, wurde von Garett (1996, /315/) vorgelegt und gilt bis heute als ein Standardwerk. Obgleich nicht als Monographien angelegt, sondern als Abschnitte in größeren Kompendien zur Gesamtheit der Technischen Chemie konzipiert, bieten auch die turnusmäßig aktualisierten Auflagen des von Winnacker und Küchler editierten Werkes "Chemische Technik", einen nützlichen Überblick zur Kaliindustrie vom Rohstoff, über die Gewinnung und Aufbereitung bis zu Fragen des Arbeits- und Umweltschutzes, zuletzt von Stahl et al. (2005, /973/) verfasst. Wie das letztgenannte Kompendium auch, so fokussieren sich auch die Beiträge zur Kaliindustrie in den englischsprachigen Pendants, der Ullmann's "*Encyclopedia of Industrial Chemistry*", hier zuletzt Schultz et al. (2003, /903/), und Kirk-Othmer "*Encyclopedia of Chemical Technology*", hier zuletzt Freilich & Petersen (2005, /290/) vor allem auf die Aufbereitungsprozesse, deren physikalische und chemische Grundlagen sowie auch auf den Gesundheits- und Umweltschutz. Eine ebenfalls mit Schwerpunkt Rohsalzaufbereitung verfasste russischsprachige Monographie haben Titkov, Solov'ev & Mamedov (1982, /1015/) vorgelegt, die insbesondere auch den seinerzeit in der sowjetischen Kaliindustrie erreichten Stand dokumentiert. Hinweise auf den sich weiterentwickelnden Stand der Technik finden sich darüber hinaus in den zahlreichen Vorträgen auf speziellen wissenschaftlichen Fachsymposien zur Kalidüngemittelproduktion, von denen hier stellvertretend die *Potash '83*[16] in Saskatoon, Kanada und die *Kali '91*[17] in Hamburg, Deutschland, oder auch die Kolloquien des IPI[18] genannt sein sollen, die zu einem Teil auch in zeitgleich publizierten Tagungsbänden oder postum veröffentlichten Aufsätzen in Fachzeitschriften dokumentiert sind. Ferner finden sich kurzgefasste Überblicksbeiträge zum Stand der Technik in der Kaliindustrie auch in Abhandlungen von Berufs- und Industrieverbänden (IFDC 1979, /430/; 1996, /431/; IIED 2002, /432/; Prud'homme & Krukowski 2006, /775/) oder auch staatlichen Institutionen (Hodge 1994, /400/) bis hin zu einigen UN-Organisationen (UNIDO 1998, /1043/).

Der Stand der Technik bei der Produktion von Kalidüngemitteln aus natürlichen Lagerstätten unterscheidet sich erheblich von dem bei der Herstellung von Düngemitteln in der chemischen Industrie: Während die natürlichen Lagerstätten hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und ihrer Wertstoffinhalte und deren räumlicher Verteilung recht variable Rohstoffe für die Produktion von Kalidüngemitteln beinhalten, nutzt die chemische Industrie stets definierte, teils sogar standardisierte Ausgangsstoffe für die auf chemischer Synthese beruhende Erzeugung von Düngemitteln. Daher existiert für die Herstellung von Düngemittelprodukten in der chemischen Industrie auch ein umfangreich beschriebener und innerhalb der Europäischen Union (EU), in ähnlicher Weise auch in anderen Ländern harmonisierter und oftmals gesetzlich verankerter Stand der Technik oder aber mindestens eine Festlegung beziehungsweise Empfehlung auf die Beste Verfügbare Technik. Beides, der Stand der Technik wie auch die Beste Verfügbare Technik zur chemischen Synthese von Düngemittelprodukten, basiert auf verfahrenstechnisch andersartigen Ansätzen für diese synthetischen Verfahren aus definierten Ausgangsstoffen und hat historisch daher auch andere Entwicklungen genommen als es bei der Nutzung natürlicher Rohstoffe für die Kalidüngemittelproduktion der Fall ist.

16 *1st International Potash Technology Conference*, Saskatoon, Kanada, 05. – 08. Oktober 1983

17 *2nd International Potash Technology Conference*, Hamburg, Deutschland, 26. – 29. Mai 1991

18 *International Potash Institute* (IPI), mit den Schwerpunkten Gewinnungs- und Aufbereitungstechnik sowie Umweltschutz bei der Kalidüngemittelproduktion zuletzt: *22nd Colloquium of the International Potash Institute*, Soligorsk, UdSSR, 18. – 23. Juni 1990

1 BEGRIFFSBESTIMMUNG UND METHODIK

In der Bundesrepublik Deutschland sind die rechtlichen Grundlagen für die der Kalidüngemittelproduktion zugrundeliegende bergmännische Tätigkeit vor allem in der Rohstoffsicherungsklausel (§ 48 Abs. 1 Satz 2) des Bundesberggesetzes (BBergG 1980, /79/) und daneben in den Regelungen zu den Betriebsplanverfahren (§ 51 BBergG 1980, /79/) verankert (Pawlik 1943d, /735/). Bereits im Bundesberggesetz rekuriert der Gesetzgeber bei der Festlegung von Mindestanforderungen vielfach auf die Allgemein Anerkannten Regeln der Technik, in der Bergverordnung für alle bergbaulichen Bereiche (Allgemeine Bundesbergverordnung – ABBergV 1995, /5/) dagegen bezüglich der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten (§ 2 Abs. 4 Nr. 4) sowie der Entsorgung bergbaulicher Abfälle (§ 22a Abs. 1) stringenter auf das Erfordernis der Durchführung solcher Tätigkeiten nach dem Stand der Technik (▸ Box 1.1).

Während im Patentrecht deutschsprachiger Länder die Definition zum Terminus Stand der Technik maßgeblich durch die allgemeine Bekanntheit und Verfügbarkeit von technischen Methoden und Verfahren getragen ist, zielen die Begriffsbestimmungen im Umwelt- (§ 3 Abs. 6 BImSchG 2013, /103/) und Wasserrecht (§ 3 Nr. 11 WHG 2009, /1117/) der Bundesrepublik Deutschland übereinstimmend maßgeblich auf den Entwicklungsstand von Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen:

> *"Stand der Technik im Sinne dieses Gesetzes ist der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen, der die praktische Eignung einer Maßnahme zur Begrenzung von Emissionen in Luft, Wasser und Boden, zur Gewährleistung der Anlagensicherheit, zur Gewährleistung einer umweltverträglichen Abfallentsorgung oder sonst zur Vermeidung oder Verminderung von Auswirkungen auf die Umwelt zur Erreichung eines allgemein hohen Schutzniveaus für die Umwelt insgesamt gesichert erscheinen lässt. Bei der Bestimmung des Standes der Technik sind insbesondere die in der Anlage aufgeführten Kriterien zu berücksichtigen."* (§ 3 Abs. 6 BImSchG 2013, /103/: S. 7)

Im Gegensatz zum Stand der Technik bezeichnet der Stand von Wissenschaft und Technik hier gleichfalls einen technischen Entwicklungsstand, bei dem Verfahren und Einrichtungen in Versuchs- und Pilotanlagen erprobt werden, jedoch eine Umsetzung im großtechnischen, industriellen Betrieb noch aussteht. In einer auf Fortschritt ausgerichteten menschlichen Gesellschaft wird der Stand von Wissenschaft und Technik sukzessive in den Stand der Technik überführt, soweit keine ethischen, ökologischen und/oder wirtschaftlichen Gründe dagegenstehen.

Diesem Buch liegen solche allgemeingültige Begriffsbestimmungen zugrunde. In Übereinstimmung mit diesen Begrifflichkeiten und deren juristischen Kontexten wurde sich bei der Definition des hier zur Rede stehenden Standes der Technik methodisch am Bundes-Immissionsschutzgesetz, insbesondere der Anlage zu § 3 Absatz 6 und gleichermaßen auch am § 3 Nummer 11 und Anlage 1 Wasserhaushaltsgesetz angelehnt.

H. Rauche, *Die Kaliindustrie im 21. Jahrhundert,*
DOI 10.1007/978-3-662-46834-0_1, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

BOX 1.1

Stand der Technik als juristische Dimension

Stand der Technik im Kontext der Sorgfalts- und Verkehrssicherungspflichten

Der Begriff Stand der Technik erlangt seine juristische Dimension als Kriterium zur Beurteilung des Entwicklungsstandes von technischen Methoden, Verfahren und Anlagen oder Betriebsweisen insbesondere im Umweltrecht. Die deutsche Rechtsordnung verlangt für jegliche Tätigkeiten und Handlungen die Beachtung jeweils angemessener Sorgfalts- oder Verkehrssicherungspflichten[19]. Diese allgemeine Sorgfaltspflicht wurde 1903 durch das Reichsgericht in Leipzig als eine erste Auslegung des ab 01. Januar 1900 in Kraft getretenen Bürgerlichen Gesetzbuches (BGB) verabschiedet. Sie ist eine Pflicht zum Handeln oder zum Unterlassen, zum Vermeiden oder zum Vermindern von abwendbaren Gefahren für Benutzer oder Dritte. Im Sinne des hier zur Rede stehenden Betriebes technischer Anlagen und der damit verbundenen Ingenieurtätigkeit folgt daraus die Pflicht, zum Schutze der Benutzer und unbeteiligter Dritter notwendige und erforderliche Maßnahmen zu ergreifen, um bei bestimmungsgemäßer Anwendung der technischen Methoden, Verfahren und Anlagen, Gefahren aller Art vorbeugend und sicher zu vermeiden.

Technisch Notwendiges, technisch Erforderliches und wirtschaftlich Zumutbares

Um Art und Umfang der notwendigen und erforderlichen Maßnahmen für einen konkreten Anwendungsfall zu bemessen, bedient sich die Rechtsprechung der Bundesrepublik Deutschland der abstrakten Begriffe

- der allgemein anerkannten Regeln der Technik, um das technisch Notwendige

und

- des Standes der Technik, um das technisch Erforderliche

zu spezifizieren. Diese beiden Termini erfahren durch die folgenden ebenfalls abstrakten und seitens des Gesetzgebers nur unzureichend bestimmten Rechtsbegriffe eine inhaltliche Untersetzung und Abgrenzung: Das technisch Mögliche beschreibt zeitbezogen die inhaltlichen Anforderungen an das Handeln oder Unterlassen für einzelne Ingenieurtätigkeiten, die geeignet sind, das notwendige Mindestmaß zu erfüllen.

19 vergleiche auch Bauer 1999, /76/

Der wirtschaftliche Maßstab für Umfang und Inhalt des für einzelne Ingenieurtätigkeiten zu einem bestimmten Zeitpunkt technisch Notwendigen und Erforderlichen wird durch das wirtschaftlich Zumutbare beschrieben.

Allgemein anerkannte Regeln der Technik versus Stand der Technik

Der vom Gesetzgeber betonte zeitliche Bezug würdigt die Fortentwicklung technischer Methoden, Verfahren und Anlagen explizit. Erkenntnistheoretisch wie auch juristisch wird der Prozess zur Anwendung neuartiger technischer Methoden und Verfahren oder Einrichtungen allgemein als eine gerichtete Entwicklung verstanden, die vielfach in Form einer sogenannten Dreistufentheorie abstrahiert wird: Die zu einem bestimmten Zeitpunkt in Betrieb befindlichen technischen Methoden, Verfahren oder Anlagen werden als allgemein anerkannte Regeln der Technik zusammengefasst.

Das Einhalten der allgemein anerkannten Regeln der Technik ist notwendig, genügt aber zum Erfüllen der Anforderungen an die eigenen Sorgfaltspflichten nicht ausschließlich. Vielmehr gilt es zur Erfüllung der Sorgfaltspflicht nachzuweisen, dass der gegenwärtige Stand der Technik Berücksichtigung gefunden hat. Nach dem Verständnis des Bundesverfassungsgerichtes (BVerfG) geht der Stand der Technik stets über das in allgemein anerkannten Regeln der Technik ausgewiesene Methodeninventar hinaus und enthält voll umfänglich das von Fachleuten verfügbare Fachwissen, welches wissenschaftlich begründet, praktisch erprobt und ausreichend bewährt sein muss. Unabhängig vom Anwendungsfeld erschließt sich hieraus eine allgemeingültige Definition des Standes der Technik.

Stand von Wissenschaft und Technik

Die im Sinne des technischen Fortschritts höchste Stufe der Auswertung von Wissen ist der Stand von Wissenschaft und Technik. Die Gesetzgebung der Bundesrepublik Deutschland fordert ein derart hohes Maß der Sorgfaltspflicht allein für atomrechtliche und weitere, von besonderen Anforderungen des Strahlenschutzes betroffene Anlagen. Zum neuesten Stand von Wissenschaft und Technik hat das Bundesverfassungsgericht (BVerfGE 1978, /143/) das Verständnis, dass dieser öffentlich zugänglich, wissenschaftlich begründet und unabhängig vom konkreten Standort seine technische Durchführbarkeit erwiesen sein muss, obgleich seine praktische Bewährung noch ausstehen darf.

Diese Herangehensweise ist insofern vernünftig, da sie explizit auch die Öffentliche Diskussion im Zusammenhang mit Genehmigungs- und Erlaubnisverfahren für Industrieprojekte reflektiert. Insbesondere bei der Wertung solcher technischer Methoden, Verfahren und Anlagen, die von verschiedener Seite – oft mit dem Verweis als eine Beste Verfügbare Technik (BVT) (▸ Box 1.2) – zusätzlich zu dem in der Kaliindustrie heute praktizierten Stand der Technik angeregt worden sind, wird in der Diskussion jeweils angemessener Sorgfalts- oder Verkehrssicherungspflichten gleichfalls auch zwischen dem technisch Möglichen und dem wirtschaftlich Vertretbaren unterschieden.

Für das hier zur Rede stehende Sachgebiet der Kalidüngemittelproduktion wurden derartige Diskussionen in der Bundesrepublik Deutschland in jüngster Vergangenheit und bis in die Gegenwart im Rahmen der Öffentlichkeitsbeteiligung für umwelt- und wasserrechtliche Erlaubnis- und Genehmigungsverfahren für verschiedene Industrievorhaben geführt (RTGWW 2009, /855/; 2010, /856/; 2014b, /861/; 2014c, /862/; BUND 2010, /134/; 2011, /135/; 2015, /136/; WWA 2010, /1143/; 2014a, /1144/; 2014b, /1145/; NABU 2014, /697/). Nicht zuletzt bot auch der im März 2008 etablierte Runde Tisch „Gewässerschutz Werra/Weser und Kaliproduktion“[20], eine auf den sachlichen Dialog gerichtete Initiative der Bundesländer Thüringen und Hessen gemeinsam mit der K+S AG, ein geeignetes Podium dafür. In den Gremien des Runden Tisches, aber auch unabhängig davon in Pressemitteilungen von Umweltverbänden[21], Kommunen[22] oder auch Bürgerinitiativen und Internetforen[23] wurden von verschiedener Seite auch alternative Vorschläge für die Einbeziehung vermeintlich besserer Methoden, Verfahren und Anlagen (WWA 2007, /1141/; Krupp 2011, /565/; Marx et al. 2012a, /623/, 2012b, /624/, Marx et al. 2013, /622/; Krupp 2014a, /566/) unterbreitet und auch Versuche unternommen, einen davon getragenen Stand der Technik für die Kaliindustrie (Krupp 2008, /564/; RTGWW 2009, /855/; WWA 2009, /1142/) zu skizzieren. Es kann und soll nicht Ziel des vorliegenden Buches sein, auf diese, von der eingangs erwähnten und ehrenwerten Hesseschen Maxime geleiteten Diskussion, im Einzelnen einzugehen. Soweit es jedoch der sachliche Rahmen bei der Beschreibung der an den weltweit 71 industriellen Standorten der Kalidüngemittelproduktion praktizierten technischen Methoden, Verfahren und Anlagen zulässt, soll auch versucht werden, das in unserer ökologischen, ökonomischen, politischen und rechtlichen Wirklichkeit in der Mitte des zweiten Jahrzehntes des 21. Jahrhunderts *Mögliche* vom *Unmöglichen* abzugrenzen und den Stand der Technik gemäß seiner vorgenannten juristischen Dimension und anhand der im Folgenden noch näher zu erläuternden Kriterien abzuleiten (Rauche 2013a, /799/; 2013b, /800/).

Die Anlage zu § 3 Absatz 6 Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG 2013, /103/) definiert die Kriterien zur Bestimmung des Standes der Technik für ihren Geltungsbereich in folgender Weise:

“Bei der Bestimmung des Standes der Technik sind unter Berücksichtigung der Verhältnismäßigkeit zwischen Aufwand und Nutzen möglicher Maßnahmen sowie des Grundsatzes der Vorsorge und der Vorbeugung, jeweils bezogen auf Anlagen einer bestimmten Art, insbesondere folgende Kriterien zu berücksichtigen:

1. *Einsatz abfallarmer Technologie,*
2. *Einsatz weniger gefährlicher Stoffe,*
3. *Förderung der Rückgewinnung und Wiederverwertung der bei den einzelnen Verfahren erzeugten und verwendeten Stoffe und gegebenenfalls der Abfälle,*
4. *vergleichbare Verfahren, Vorrichtungen und Betriebsmethoden, die mit Erfolg im Betrieb erprobt wurden,*
5. *Fortschritte in der Technologie und in den wissenschaftlichen Erkenntnissen,*
6. *Art, Auswirkungen und Menge der jeweiligen Emissionen,*
7. *Zeitpunkte der Inbetriebnahme der neuen oder der bestehenden Anlagen,*
8. *für die Einführung einer besseren verfügbaren Technik erforderliche Zeit,*
9. *Verbrauch an Rohstoffen und Art der bei den einzelnen Verfahren verwendeten Rohstoffe (einschließlich Wasser) sowie Energieeffizienz,*
10. *Notwendigkeit, die Gesamtwirkung der Emissionen und die Gefahren für den Menschen und die Umwelt so weit wie möglich zu vermeiden oder zu verringern,*
11. *Notwendigkeit, Unfällen vorzubeugen und deren Folgen für den Menschen und die Umwelt zu verringern,*
12. *Informationen, die von internationalen Organisationen veröffentlicht werden,*
13. *Informationen, die in BVT-Merkblättern enthalten sind.”* (BImSchG 2013, /103/: S. 53f.)

20 www.runder-tisch-werra.de

21 Zum Beispiel: region-hannover.bund.net/themen_und_projekte/bergbaufolgen/

22 Zum Beispiel: Informationsportal der Einheitsgemeinde Gerstungen zur Kali und Salz Problematik www.wasser-in-not.de

23 Zum Beispiel: Aktionsbündnis salzfreies Märchenland e.V. www.aktionsbuendnis-salzfreies-maerchenland.de

BOX 1.2

Stand der Technik versus Beste Verfügbare Technik

Best Available Techniques (BAT) aus der angelsächsischen Rechtsterminologie entlehnt

Im Hinblick auf die Harmonisierung der innerhalb der EU geltenden Rechtsnormen und der Integration von EU-Regelungen in nationales Recht der Bundesrepublik Deutschland ist für die hier zur Rede stehende Aufgabe auch eine Abgrenzung des Standes der Technik zum eingangs bereits erwähnten Begriff Beste Verfügbare Technik erforderlich:

> Der aus der angelsächsischen Rechtsterminologie in das Gemeinschaftsrecht der EU importierte Begriff der *Best Available Techniques* (BAT), zu deutsch: die Beste Verfügbare Technik (BVT), erlangt vor allem durch die Richtlinie 96/61/EG des Rates vom 24. September 1996 über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU-Richtlinie) und seitdem durch die sogenannte Industrieemissionsrichtlinie (IED 2010, /429/) für das nationale Recht der Mitgliedsstaaten Bedeutung. Demnach müssen in der EU die besonders umweltrelevanten Industrieanlagen auf der Basis der besten verfügbaren Techniken genehmigt werden. Auch ältere, das heißt bereits früher genehmigte und entsprechend früherer Standards betriebene Anlagen müssen seit dem 30. Oktober 2007 auf Grundlage der Besten Verfügbaren Technik betrieben werden.

Insofern ist es für die hier zur Rede stehende Aufgabenstellung gleichfalls wichtig, die Begriffe Beste Verfügbare Technik und Stand der Technik hinsichtlich ihrer Anforderungsinhalte zu werten. Eine solche vergleichende Analyse beider Rechtsbegriffe ist bereits im Zuge der juristischen und der parlamentarischen Diskussion zur IVU-Richtlinie umfassend erfolgt, worauf hier verwiesen werden soll. Bereits im Gesetzentwurf der Bundestagsfraktionen der SPD und BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN zur Umsetzung der UVP-Änderungsrichtlinie, der IVU-Richtlinie und weiterer EG-Richtlinien zum Umweltschutz vom 14. November 2000 (DBT 2000, /185/) wurde treffend festgestellt:

> *"Aufgrund der genannten Änderungen entspricht der deutsche Stand der Technik inhaltlich mindestens dem Anforderungsniveau der "besten verfügbaren Techniken" i. S. des Artikels 2 Nr. 11 der IVU-Richtlinie, ohne dass der Ausdruck "beste verfügbare Techniken" und dessen Definition im Einzelnen übernommen werden müsste."* (DBT 2000, /185/: S. 126)

Stand der Technik mindestens gleichrangig zur Besten Verfügbaren Technik (BVT)

Dementsprechend ist der in Deutschland traditionell verwendete Begriff Stand der Technik dem der Besten Verfügbaren Technik mindestens gleichrangig. Es wird jedoch allgemein eingeschätzt, dass der Stand der Technik inhaltlich über das mit der Besten Verfügbaren Technik definierte Anforderungsniveau hinausgeht. Im Folgenden wird daher auf die Heranziehung der Minderanforderungen nach der Besten Verfügbaren Technik verzichtet und vielmehr der im deutschsprachigen Raum verbreitete und höhere Anforderungen beinhaltende Begriff des Standes der Technik genutzt.

Auf diese 13 Kriterien wird im Folgenden vielfach Bezug genommen – auch ohne, dass explizit ein Verweis auf § 3 Absatz 6 BImSchG erfolgt – und dargelegt, inwieweit die an den verschiedenen Produktionsstandorten der Kaliindustrie angewendeten fortschrittlichen Verfahren im Sinne technisch möglicher und wirtschaftlich zumutbarer Maßnahmen auf andere Produktionseinheiten mit andersartigen Randbedingungen übertragbar und somit bei der Definition eines allgemeinen Standes der Technik bei der Kalidüngemittelherstellung zu berücksichtigen sind. Bei der Ableitung eines möglichst allgemeingültigen Standes der Technik bei der Kalidüngemittelherstellung können solche methodischen Anleihen an das nationale Umwelt- (§ 3 Abs. 6 BImSchG 2013, /103/) und Wasserrecht (§ 3 Nr. 11 WHG 2009, /1117/) jedoch allenfalls nur Hilfsmittel sein, ist ihre Anwendbarkeit doch auf sehr spezielle Teilgebiete reduziert. Die besondere Stellung der Kaliindustrie als Bergbauzweig mit sehr spezifischen, über die klassische mechanische Aufbereitung hinausreichenden Verfahren geht letztlich auf die unmittelbar von den Lagerstätten bestimmten sehr verschiedenartigen Ausgangspositionen für die Gewinnung und die Aufbereitung der natürlichen Rohstoffe an den Einzelstandorten zurück. Wie bereits eingangs erläutert, verwundert es insofern nicht, dass anders als zum Beispiel für die Herstellung von Düngemitteln aus definierten Ausgangsstoffen in der chemischen Industrie für die Produktion von Kalidüngemitteln aus natürlichen Rohstoffen unterschiedlichster Zusammensetzung und variabler Wertstoffinhalte keine allgemein anerkannten Regeln der Technik in entsprechenden Vorschriften und/oder Empfehlungen fixiert sind.

Der Betrieb der Anlagen zur Gewinnung und Aufbereitung von Kalirohstoffen und ebenso der zur Beseitigung der dabei unvermeidbar anfallenden bergbaulichen Abfälle haben nichtsdestotrotz einer Vielzahl von Gesetzen, Verordnungen und Richtlinien zu entsprechen, die in den 13 Ländern, in denen heute eine Kalidüngemittelproduktion vom Rohstoff bis zum Fertigprodukt stattfindet, zwar nicht grundsätzlich verschieden sind, so aber doch in einzelnen Aspekten unterschiedliche juristische Rahmenbedingungen schaffen. Solchen Regelwerken der verschiedenen Staaten und Regionen ist ein Ansatz gemein, dessen grundlegendes Prinzip auch in den Zulassungsvoraussetzungen des § 55 Absatz 1 BBergG und in den diese konkretisierenden Anforderungen gemäß ABBergV zum Ausdruck kommt und wonach alle Aspekte möglicher Umweltbeeinflussungen im Vorfeld zu untersuchen und Maßnahmen zu ihrer Vermeidung beziehungsweise Minimierung zu planen sind. Die – hier ebenfalls zur Rede stehende – Bewirtschaftung bergbaulicher Abfälle ist beispielsweise innerhalb der EU durch die Bergbauabfallrichtlinie (AbfRiLi 2006, /8/) für alle Mitgliedsstaaten einheitlich reguliert, während andere kaliproduzierende Staaten durchaus auch unterschiedliche Regelungen zwischen einzelnen Provinzen und Regionen zulassen.

Die EU hat Maßnahmen festgelegt (IED 2010, /429/), mit denen die negativen Auswirkungen und Risiken, wie sie von Abfällen und deren Bewirtschaftung für Mensch und Umwelt ausgehen, vermieden oder verringert werden sollen. Nicht zuletzt, weil der mit 20 Prozent größte individuelle Abfallstrom in der EU der mineralgewinnenden Industrie entstammt, hat die EU mit ihrer Bergbauabfallrichtlinie (AbfRiLi 2006, /8/) einen für alle Mitgliedsstaaten einheitlichen Umgang mit Bergbauabfällen vorgegeben und das bisherige Abfallregelwerk vervollständigt (Schink & Versteyl 2012, /881/; Versteyl, Mann & Schomerus 2012, /1067/). Diese Bergbauabfallrichtlinie setzt den Mitgliedstaaten für die Regulierung der Bewirtschaftung von Abfällen aus der mineralgewinnenden Industrie und somit auch den 4 kalidüngemittelproduzierenden Ländern Deutschland, Spanien, Großbritannien sowie – mit sehr kleiner Produktionskapazität – auch Österreich[24] einen verbindlichen Rahmen, der durch nationales Recht im Detail ausgefüllt und ausgestaltet werden soll.

Die Bergbauabfallrichtlinie (AbfRiLi 2006, /8/) wurde mit der Einführung des § 22a in die Allgemeine Bundesbergverordnung (ABBergV 1995, /5/) für die unter den Geltungsbereich des Bundesberggesetzes (BBergG 1980, /79/) tätigen Betriebe in nationales Recht der Bundesrepublik mit der "Dritten Verordnung zur Änderung bergrechtlicher Vorschriften" vom 24. Januar 2008 (BergRVÄndV 2008, /94/) umgesetzt. Diese nationale Umsetzung beinhaltet einmal eine Ergänzung der Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben (UVP-V Bergbau 2010, /1055/) und außerdem die Erweiterung des

24 Am Standort Ebensee im Traunviertel, Salzkammergut, Österreich, betreibt die SALINEN AUSTRIA AG seit 2008 in einer kleinindustriellen Anlage eine Verwertung von flüssigen Aufbereitungsrückständen, die bei der Steinsalz-Produktion unvermeidbar anfallen. Vor der Inbetriebnahme dieser Anlage wurden diese flüssigen Aufbereitungsrückstände im Produktionsablauf der am gleichen Standort produzierenden SOLVAY ÖSTERREICH GMBH verwertet, fanden aber nach einer Umstellung der Produktion dort keine weitere Verwendung. Da eine Beseitigung dieser früher bereits durch Verwertung entsorgten Aufbereitungsrückstände nicht in Frage kam, wurde für die SALINEN AUSTRIA AG der Bau einer eigenen Abfallentsorgungsanlage erforderlich. Mit dieser Anlage werden jährlich weniger als 20.000 t Kaliumsulfat erzeugt (▸ Fußnote 4 auf Seite 14).

sachlichen Anwendungsbereichs in § 1 auf den "Umweltschutz" sowie die Aufnahme des § 22a mit den Anlagen 5 bis 7 in die ABBergV. Als wichtigste Neuerung ist der Abfallbewirtschaftungsplan als neues rechtliches Instrument eingeführt worden, der vom Unternehmer aufzustellen ist und sicherstellen soll, dass das Abfallentsorgungskonzept bereits im Vorfeld bergbaulicher Tätigkeiten in konkretisierter Form der Behörde angezeigt wird.

Ferner wurden im Zuge der nationalen Umsetzung der Bergbauabfallrichtlinie auch die Neuordnung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallrechts (GNKwAr 2012, /338/) notwendig und letztlich auch die Gewinnungsabfallverordnung novelliert (GewinnungsAbfV 2009, /327/).

Der Gesetzgeber verfolgte dabei auch das Ziel, den Gültigkeitsbereich der Deponieverordnung (DepV 2009, /192/) aufgrund des Bergbauprivilegs im Bergbauabfallrecht zu beschränken. Mit der für die Beseitigung bergbaulicher Abfälle wesentlichen Bereichsausnahme in § 2 Absatz 2 Nummer 7 KrWG lässt der Gesetzgeber keine Rückverweisung in das allgemeine Abfallrecht zu, weshalb auch eine ergänzende oder konkretisierende Anwendung der DepV im Bergbauabfallrecht ausscheidet (Schink & Versteyl 2012, /881/; Versteyl, Mann & Schomerus 2012, /1067/; LAB 2014, /578/). Der Gesetzgeber unterstreicht mit dieser Novellierung den Zweck des Bergbauabfallprivilegs, nämlich den speziellen Produktionsbedingungen des Bergbaus sowie der Standortgebundenheit der Entsorgung großer Mengen bergbaulicher Abfälle angemessen Rechnung tragen zu wollen. Die daraus folgende Herauslösung der Entsorgung bergbaulicher Abfälle aus dem Geltungsbereich des DepV liegt dann notwendigerweise auch der Bergbauabfallrichtlinie und dem § 22a ABBergV zugrunde (Attendorn 2008, /29/). Nach der Begründung der Bergbauabfallrichtlinie sollen die Bestimmungen der Richtlinie über Abfalldeponien (AbfDep 1999, /7/) und insbesondere die Anforderung, eine Deponie mit Barriere und Abdichtung auszustatten, auf die Entsorgung von Abfällen aus der mineralgewinnenden Industrie keine Anwendung finden (EC 2003, /224/), was bei der Entsorgung bergbaulicher Abfälle von praktischer Bedeutung ist. Für die damit in Zusammenhang stehenden Erlaubnis- und Genehmigungsverfahren von Abfallentsorgungseinrichtungen für bergbauliche Abfälle ist demnach der § 22a ABBergV der allein maßgebliche rechtliche Maßstab.

Die Anforderungen an den Abfallwirtschaftsplan sind in § 22a Absatz 2 und dem Anhang 5 "Abfallwirtschaftsplan" der ABBergV geregelt unter Verweis auf die Anhänge II und III der Richtlinie 2006/21/EG. Aus Anhang 5 zu § 22a Absatz 3 ergeben sich die zusätzlichen Anforderungen für die Errichtung, den Betrieb und die Stilllegung von Abfallentsorgungseinrichtungen für die bergbaulichen Abfälle und aus Anhang 7 die zusätzlichen Anforderungen an Sicherheitsleistungen gemäß § 56 Absatz 2 des Bundesberggesetzes für Abfallentsorgungseinrichtungen der Kategorie A.

Der Abfallbewirtschaftungsplan muss den gesamten Lebenszyklus des Bergwerkes umfassen. Mit dem Abfallbewirtschaftungsplan wird die Vermeidung oder Verringerung von Bergbauabfällen und ihre Schädlichkeit dokumentiert sowie über die gesamte Entwicklung des Betriebes verfolgt. Der Abfallbewirtschaftungsplan ist fortzuschreiben sowie der Behörde vorzulegen und muss mindestens folgende Angaben enthalten:

- eine Beschreibung der Abfälle und ihre Einstufung;
- eine Beschreibung der für die Aufbereitung von mineralischen Rohstoffen verwendeten Substanzen;
- das Verfahren der Abfallablagerung sowie das Abfallbeförderungssystem;
- eine Beschreibung der Verfahren, bei denen diese Abfälle entstehen;
- Kontroll- und Überwachungsmaßnahmen;
- gegebenenfalls die Einstufung der Abfallentsorgungsanlage;
- Pläne zur Stilllegung und für die Nachsorgephase;
- Maßnahmen zur Vermeidung der Verunreinigung von Gewässern und Böden;
- eine Analyse des Areals, das durch die Abfallentsorgungsanlage belastet werden könnte.

Hinsichtlich aller Maßnahmen, die mit dem Abfallbewirtschaftungsplan zu regeln sind, fordert der Verordnungsgeber explizit deren Durchführung gemäß des aktuellen Standes der Technik.

Dem Geiste nach bereits seit mehr als einem Jahrzehnt am Regelwerk der EU angelehnt[25], hinsichtlich der Durchführungsbestimmungen aber auf größere Autonomie der zuständigen föderalen Agenturen und breitere Gestaltungsspielräume von regionalen Fachbehörden vertrauend, reguliert auch die Naturressourcen- (RFRG 1995, /835/), Berg-, Wasser- (RFKWASSER 2006, /834/), Forst- (RFKWALD 2006, /833/) und Umweltgesetzgebung (RFUG 2002, /837/; RFRÜG 1998, /836/) der Russischen Föderation – und mit

25 Die EU hat im Rahmen des Gemeinschaftsprogrammes TACIS die Demokratisierung, die Stärkung der Rechtsstaatlichkeit und den Übergang zur Marktwirtschaft in den aus dem Zusammenbruch der Sowjetunion hervorgegangenen Neuen Unabhängigen Staaten (NUS) gefördert und in diesem Zusammenhang auch bei der Neufassung von Gesetzen in diesen Ländern mitgewirkt. Ein Schwerpunkt war dabei die Stärkung des Umweltschutzes und Bewirtschaftung der natürlichen Ressourcen (EG 2000, /232/).

großen Übereinstimmungen auch diejenige der Republik Belarus[26] – alle bergbaulichen Tätigkeiten einschließlich der Bewirtschaftung damit verbundener Abfallströme. Ferner enthält auch das Russische Aktiengesetz (RFAG 1995, /832/) den Verpflichtungsvorsatz zur Ressourcenschonung und zum Umweltschutz. Auch die russischen und weißrussischen berg-, umwelt- und abfallrechtlichen Gesetze und Regularien nehmen mit ihren Mindestanforderungen vielfach Bezug auf fortschrittliche Methoden und Verfahren bei der Rohstoffgewinnung, der -aufbereitung sowie bei der Beseitigung von Aufbereitungsrückständen und orientieren hier ebenso am Stand der Technik.

Als technisches Aufsichtsorgan für die Bergbau-, die Industrieanlagen- und die nukleare Sicherheit fungiert die föderale Behörde ROSTECHNADSOR[27]. Eine zentrale Funktion im Hinblick auf die Nachhaltigkeit der Ressourcennutzung nimmt die föderale Behörde ROSNEDRA[28] wahr, die – angelehnt an die früheren Regelungen in allen RGW-Staaten – das nationale Inventar mineralischer Ressourcen nicht zuletzt durch staatlich sanktionierte Vorratsberechnungen und die Vorgabe von Mindestwertschöpfungen verwaltet. Alle diese föderalen Behörden verfügen über regionale Niederlassungen in den Bergbauregionen. Für entsprechende Anträge auf Erlaubnisse und Genehmigungen sind diese Regionalvertretungen als verfahrensführende Behörden und bei der Umsetzung sowie im laufenden Betrieb auch als Aufsichtsorgane tätig. Was die Einhaltung der Umweltvorschriften und auch der Abfallbewirtschaftungspläne angeht, kommt den Regionalvertretungen von ROSPRIRODNADSOR[29] die größte Bedeutung zu.

Die Beseitigung der festen Aufbereitungsrückstände wird in individuellen Bewirtschaftungsplänen für jede einzelne Halde[30] mit den Angaben zur Fläche und Höhe für die gesamte Lebensdauer sowie zu den jährlichen Ablagerungsmengen festgelegt und durch die regionale Niederlassung der föderalen Fachbehörde ROSTECHNADSOR genehmigt. Die Gesamtfläche wird in Baustufen parzelliert, welche je nach dem Aufschüttungsgrad schrittweise in Betrieb genommen werden. Ähnlich wie auch in Deutschland beschreiben die jährlichen Betriebspläne[31] das beabsichtigte Aufschütten für den kommenden Jahreszeitraum und berichten über den erreichten Ist-Zustand.

Hinsichtlich der Lagerung und Beseitigung flüssiger Aufbereitungsrückstände haben die Betreiber der Bergbaubetriebe sogenannte Normativdokumente vorzulegen, in denen zulässige Schadstoffgehalte[32] oder auch zulässige Salzkonzentrationen[33] in flüssigen Aufbereitungsrückständen definiert und durch die zuständige Aufsichtsbehörde ROSPRIRODNADZOR zu genehmigen sind. Diese Normativdokumente werden von unabhängigen Sachverständigen erarbeitet.

In den kanadischen Kalibergbauprovinzen Saskatchewan und New Brunswick werden die Errichtung und der Betrieb von Rohstoffgewinnungs- und -aufbereitungsanlagen entsprechend den in der jeweiligen Provinz erlassenen Gesetzen und Regelwerken zugelassen. Die dafür erforderlichen Mindestanforderungen für den Gewässer- und Umweltschutz sind provinzübergreifend im *Canada Water Act* (CWA 1985, /176/), im *Canadian Environmental Protection Act* (CEPA 1999, /148/) und im *Canadian Environmental Assessment Act* (CEAA 2012, /146/) verankert, obgleich zum Beispiel in Saskatchewan weit detailliertere Anforderungsprofile für einzelne Schutzgüter durch den *Saskatchewan Environmental Management and Protection Act* (SEMPA 2002, /915/), den *Saskatchewan Environmental Assessment Act* (SEAA 1980, /912/) die *Saskatchewan Hazardous Substances and Waste Dangerous Goods Regulations* (SHSWR 1989, /928/), die *Saskatchewan Mineral Industry Environmental Protection Regulations* (SMIEPR 1996, /954/) oder die *Saskatchewan Water Regulations* (SWR 2002, /995/) – meist im Sinne von Durchführungsbestimmungen – vorgeschrieben und zu erfüllen sind. Darüber hinaus werden regelmäßig Handbücher für die Erstellung von entsprechenden Antragsunterlagen zur Genehmigung des Baus und Betriebes von Rohstoffgewinnungs- und -aufbereitungsanlagen und

26 Die weißrussischen Pendants sind: Weißrussischer Kodex über das Erdinnere, BRKE2008, /816/; Weißrussischer Waldkodex, BRKWALD 2000, /817/; Weißrussischer Wasserkodex, RBKWASSER 1998, /818/; Weißrussisches Umweltschutzgesetz, RBUG 1992, /820/; Weißrussisches Gesetz über Rückstände, RBRÜG 2007, /819/

27 РОСТЕХНАДЗОР Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору – auf Deutsch: Föderaler Dienst für ökologische, technologische und atomare Aufsicht

28 ROSNEDRA: РОСНЕДРА Федеральное агентство по недропользованию – auf Deutsch: Föderale Agentur für die Nutzung der Ressourcen im Erdinneren

29 РОСПРИРОДНАДЗОР Федеральная служба по надзору в сфере природопользования – auf Deutsch: Föderaler Dienst für die Aufsicht im Bereich der Naturnutzung

30 Проект на солеотвал – auf Deutsch: Planungsunterlagen für Halden

31 План горных работ – auf Deutsch: Plan der Bergbauarbeiten

32 НДС – нормативно допустимое содержание вредных примесей в сточных водах – auf Deutsch: Normativdokument für maximal zulässige Schadstoffgehalte

33 ПДК – предельно допустимые концентрации сточных вод – auf Deutsch: Normativdokument für maximal zulässige Salzkonzentrationen

deren Abfallbewirtschaftungseinrichtungen aktualisiert und publiziert (CEAA 2015, /147/). Die alle umwelt- und damit unmittelbar verknüpften bergrechtlichen Erlaubnisse erteilende Institution ist hier das Umweltministerium der Provinz, vertreten durch den Minister selbst (GOS 2009, /344/). Auch in Nordamerika, ebenso aber auch in anderen Weltregionen nehmen die Gesetz- und Verordnungsgeber mit ihren technischen Mindestanforderungen gleichfalls Bezug auf einen fortschrittlichen Stand der Technik, wenngleich der Terminus nicht überall *sensu stricto* Anwendung findet.

Die Diskussion des Standes der Technik und insbesondere die Notwendigkeit seiner Weiterentwicklung erfolgt in unserer modernen Industriegesellschaft vielfach auch im Zusammenhang mit der Definition von Zielen und Wegen einer nachhaltigen Entwicklung – oder des aus dem angelsächsischen Raum entlehnten Begriffes *Sustainable Development* (▸ Box 1.3). Für das vorliegende Buch musste diese Diskussionsebene gleichfalls Berücksichtigung finden. Die moderne Industriegesellschaft fordert nachhaltige Entwicklung durch die Gleichzeitigkeit und die Gleichberechtigung ökologischer, sozialer und wirtschaftlicher Zielstellungen ein. Nur auf diese Weise kann die ökologische, ökonomische und soziale Leistungsfähigkeit einer Gesellschaft sichergestellt und verbessert werden, wobei sich die 3 Aspekte gegenseitig bedingen (DBT 1998, /184/; WDDB 2004, /1100/).

Eine dementsprechende Verwendung der Begriffe nachhaltige Entwicklung oder *Sustainable Development* ist für die hier zur Rede stehende Aufgabe angezeigt, stellte doch bereits im Jahre 2008 der Sachverständigenrat der Bundesregierung für Umweltfragen (SRU) in einem Gutachten fest, dass sich das Drei-Säulen-Konzept international durchgesetzt habe und eine einseitig auf Ökologie reduzierte Betrachtung dem integrierten und synergistischen Verständnis gewichen sei (SRU 2008, /969/). Dieser, alle 3 Dimensionen – die ökologische, die wirtschaftliche und die soziale Nachhaltigkeit – integrierende Gedanke liegt dem vorliegenden Buch zugrunde. Dort, wo es erforderlich wird, die ökologischen Dimensionen besonders zu betonen, erfolgt dies durch Verwendung des Begriffes ökologisch nachhaltig.

Bei der vergleichenden Betrachtung der an allen Standorten der Kalidüngemittelproduktion betriebenen Methoden, Verfahren und Anlagen galt es dementsprechend auch die ökologische Dimension ihrer Nachhaltigkeit zu beleuchten. Ohne den Anspruch einer quantitativen Ermittlung ganzheitlicher Ökoeffizienzen[34] erheben zu wollen, wurden die Methoden, Verfahren und Anlagen unter Berücksichtigung der an den konkreten Produktionsstandorten geltenden unterschiedlichen Randbedingungen auch hinsichtlich ihrer ökologischen Effizienz bewertet.

Neben solchen mehr abstrakten Aspekten, wie sie aus einem weltweiten Gerechtigkeitspostulat oder auch dem Anspruch nach einer Harmonisierung von Ökonomie, Ökologie und Sozialem erwachsen, sind in dieser Diskussion aber auch die praktischen Belange einer verantwortungsvollen Rohstoffnutzung, einer langfristigen Vorsorgepolitik der Volkswirtschaft sowie eines präventiven Umweltschutzes unter den Bedingungen eines globalisierten Kalimarktes zu behandeln (Frenz 2002, /291/; Chanchitpricha, Bond & Cashmore 2011, /149/; Steiner 2014, /977/; Schernewski & Anders 2014, /878/).

Mit dem Kapitel 2 wird zunächst in den Ursprung und die historische Entwicklung der Produktion von Kalidüngemitteln eingeführt und dabei auch auf die bereits seit gut 100 Jahren kontinuierliche Weiterentwicklung der technischen Methoden, Verfahren und Anlagen zur Verbesserung des Wertstoffausbringens und folglich gleichfalls zur Verminderung von Gewinnungs-[35] und Aufbereitungsrückständen[36] eingegangen.

---

34 Der Weltwirtschaftsrat für nachhaltige Entwicklung (WBCSD 2000, /1099/) definiert Ökoeffizienz zum Beispiel als Quotient aus [dem wirtschaftlichen Wert eines Produktes] zu [seinen Auswirkungen auf die Umwelt].

35 Beim Prozess der Rohstoffgewinnung müssen aus berg-, maschinentechnischen und/oder bergbausicherheitlichen Erwägungen unvermeidbar auch wertstofffreie beziehungsweise -arme Gesteinsvolumina abgebaut werden. Mindestens teilweise gelangen diese Stoffströme mit in den zur Aufbereitungsanlage zu fördernden Rohstoff und vermindern auf diese Weise den durchschnittlichen Wertstoffgehalt (Verdünnung). Solche wertstofffreien beziehungsweise -armen Stoffströme werden hier als Gewinnungsrückstände bezeichnet.

36 Vom Prozess der Rohstoffgewinnung gelangen Rohstoffmengen in die Aufbereitungsanlage, wo sie zu verkaufsfähigen Fertig- und Nebenprodukten verarbeitet werden. Neben den Fertig- und Nebenprodukten fallen beim Aufbereitungsprozess unvermeidbar weitere Stoffströme an, für die eine Verwertung technisch nicht möglich, ökologisch nicht nachhaltig oder wirtschaftlich nicht machbar ist. Diese festen und flüssigen Stoffströme werden hier als Aufbereitungsrückstände zusammengefasst. Solche Aufbereitungsrückstände fallen an allen Standorten der Kalidüngemittelproduktion an und müssen unmittelbar dort oder anderswo – im deutschen juristischen Sprachgebrauch des in der Bundesrepublik Deutschland geltenden Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG 2012, /568/) – einer Beseitigung zugeführt werden.

BOX 1.3

Ursprung des Begriffes nachhaltige Entwicklung und heutiges Verständnis



Portrait Hans Carl von Carlowitz (1645 – 1714)

[Kupferstich von Martin Bernigeroth (1670 – 1733), um 1713 hergestellt. Erstmals veröffentlicht in der 2. Ausgabe von "Sylvicultura Oeconomica, Oder Haußwirthliche Nachricht und Naturmäßige Anweisung Zur Wilden Baum-Zucht". Ein Original des Buches mit Bildnis befindet sich im Besitz der Universitätsbibliothek der TU Bergakademie Freiberg.]

Bereits vor über 300 Jahren hat sich der sächsische Oberberghauptmann Hans Carl von Carlowitz (1645 – 1714) mit Problemen des Berg- und Hüttenwesens und der damit zusammenhängenden Waldnutzung beschäftigt und 1713 in seinem Buch "*Sylvicultura Oeconomica*" den Begriff der nachhaltenden Nutzung in Bezug auf die Forstwirtschaft geprägt (Carlowitz 1713, /145/). In einem plausiblen Selbstverständnis behandelte von Carlowitz dabei ökologische und wirtschaftliche Aspekte als gleichberechtigte Dimensionen der gesellschaftlichen Realität und als Quellen sozialer Entwicklungen. Diese grundlegende Überlegung wird auch vom sogenannten Brundtland Report an die 42. Generalversammlung der Vereinten Nationen (UN 1987, /1039/) geteilt und in unsere Zeit übertragen. Die UN-Kommission unter dem Vorsitz der ehemaligen norwegischen Ministerpräsidentin Gro Harlem Brundtland hatte 1984 den Auftrag erhalten, langfristige Perspektiven für eine Entwicklungspolitik aufzuzeigen, die auf wirtschaftliche und soziale Fortschritte zielen, zugleich aber ressourcen- und umweltschonend sind. Dieses Leitmotiv fand auch Eingang in die nationale Politik vieler Industrieländer, so auch für die Bundesrepublik Deutschland, insbesondere durch die Arbeit der am 01. Juni 1995 berufenen Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages *"Schutz des Menschen und der Umwelt -- Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung"*, die mit Datum 26. Juni 1998 einen Abschlussbericht (DBT 1998, /184/) zur Umsetzung des Leitbildes Nachhaltigkeit vorlegte.

Drei Säulen der Nachhaltigkeit: Gleichberechtigung der ökologischen, sozialen und ökonomischen Dimension

In unserer Gegenwart sprechen wir daher vom sogenannten Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit und adaptieren diese frühen Vorstellungen für die moderne Industriegesellschaft dahingehend, dass nachhaltige Entwicklung allein durch die gleichzeitige und gleichberechtigte Umsetzung von umweltbezogenen, wirtschaftlichen und sozialen Zielen erreicht werden kann.

Im Kapitel 3 folgt eine Beschreibung der heutigen Situation am Kalimarkt, indem die Triebkräfte für den Kalidüngemittelverbrauch, die Kaliproduzenten und ihre Vertriebsstrukturen sowie die Kaliprodukte und deren allgemeine Spezifikationen erläutert werden. Bereits dieser Abschnitt zeigt die aus dem Produktportfolio diktierten, durchaus erheblichen Unterschiede von Verfahren und Anlagen an den einzelnen Standorten auf. Im Kapitel 4 werden die im Einzelnen ausgesprochen verschiedenen Randbedingungen der Standorte der Kalidüngemittelproduktion aufgeführt und soweit erläutert, wie es für die Diskussion der an den einzelnen Standorten praktizierten unterschiedlichen Methoden und Verfahren zur Rohstoffgewinnung und -aufbereitung von Wichtigkeit ist. Das Kapitel 5 beschreibt das heute angewendete Methodeninventar zur Gewinnung der Rohstoffe für die Kalidüngemittelproduktion, das Kapitel 6 die Verfahren zur Aufbereitung und Verarbeitung derselben bis hin zu den verkaufsfähigen Fertigprodukten. Im Kapitel 7 wird noch einmal auf die verkaufsfähigen Fertigprodukte und das mögliche Nebenprodukt-Portfolio eingegangen und insbesondere deren Abhängigkeit von den unterschiedlichen rohstoffgeologischen Randbedingungen sowie den daraus folgenden verschiedenartigen Gewinnungs- und Aufbereitungsmethoden und -verfahren erläutert. In diesem Kapitel werden auch solche Methoden und Verfahren besprochen, mit denen es erfolgreich gelungen ist, Teilströme fester oder flüssiger Aufbereitungsrückstände zu verwerten, also die zur Beseitigung anfallenden Abfallströme zu vermindern. Dabei werden für verschiedene Rohstoffarten charakteristische Massenbilanzen vorgestellt, anhand derer auch der unvermeidbare Anfall von Gewinnungs- und Aufbereitungsrückständen quantitativ erläutert wird. Im Anschluss beschreibt Kapitel 8 detailliert die Methoden, Verfahren und Anlagen zur Entsorgung der festen und flüssigen Rückstände, wie sie an den verschiedenen Standorten der Kaliindustrie derzeit auf der Grundlage rechtskräftiger Erlaubnisse und Genehmigungen genutzt werden.

Die Kapitel 3 bis 8 liefern somit eine zusammenfassende Zustandsbeschreibung zu den an allen Standorten der Kalidüngemittelproduktion betriebenen Methoden, Verfahren und Anlagen, zu den Abläufen ihres bestimmungsgemäßen Betriebes und auch zu möglichen Risiken, wie sie sich heute, also in der Mitte der zweiten Dekade des 21. Jahrhunderts nach mehr als 150 Jahren Entwicklung der Kaliindustrie skizzieren lässt. Ausgehend von dieser Zustandsbeschreibung wird ein allgemein zutreffender Stand der Technik bei der Kalidüngemittelproduktion abgeleitet, soweit dies nach kritischer Würdigung der an den einzelnen Produktionsstandorten sehr verschiedenartigen Randbedingungen möglich ist.

Für dieses Buch fanden öffentlich zugängliche Informationen zu den Standorten der Kalidüngemittelproduktion und den -produzenten Verwendung. Auf diese Quellen wird durch individuelle Querverweise ausdrücklich und soweit Bezug genommen, wie es für die hier zur Rede stehende Ableitung des Standes der Technik von Belang ist. Für das weiterführende Verständnis einzelner Aussagen und Einschätzungen ist es in diesem Kontext mitunter auch erforderlich, in jedem Falle aber hilfreich, die Gesamtinhalte mindestens der zitierten Quellen zu erfassen. Alle diese verwendeten – mehr als 1.000 zitierten Referenzen sind in einer ausführlichen Referenzliste am Ende des Buches aufgeführt.

Naturgemäß sind die veröffentlichten Informationen recht heterogen, so dass nicht für alle Produktionsstandorte gleichermaßen auch alle gewünschten Informationen in öffentlich zugänglichen Datenquellen recherchierbar waren. Dies gilt insbesondere zu speziellen Fragen des Rückstandsmanagements an den verschiedenen Produktionsstandorten, worauf in dem betreffenden Kapitel 8 noch näher eingegangen wird. Um für die vergleichende Analyse dennoch eine für alle Standorte homogene Datengrundlage zu haben, war es vereinzelt erforderlich, ausgehend vom recherchierbaren Faktengerüst eigene Betrachtungen und Berechnungen anzustellen. Insofern gründen sich die Aussagen des vorliegenden Buches auch auf das bei ERCOSPLAN (▸ Box 1.4) – einem seit 1952 in Erfurt in Thüringen ansässigen und heute vom Autor geführten Ingenieurunternehmen[37] – vorliegende einschlägige Fachwissen aus mehr als 6 Jahrzehnte währenden Ingenieurleistungen für die Beratung, die Planung und das Projektmanagement von Investitionsvorhaben der Mineralsalzindustrie in Deutschland, Russland, Belarus, der Ukraine und in China sowie seit mehr als 2 Jahrzehnten auch für solche Vorhaben in Kanada, USA, Israel, Jordanien, Iran, Brasilien, Spanien und Großbritannien und solche im Rahmen dieser Dienstleistungen bekannt gewordenen Erfahrungstatsachen, soweit sie nicht als vertrauliche Informationen klassifiziert sind (ERCOSPLAN 2015, /255/).

37 Mehr Details zur Firmengeschichte und zu solchen Meilensteinen in der Entwicklung des Standes der Technik der Kalidüngemittelproduktion, an denen ERCOSPLAN und seine Vorläuferinstitutionen mitgewirkt haben sowie zu entsprechenden Referenzprojekten finden sich u.a. in Bartl (2003a, /63/), Bartl (2010, /66/), ERCOSPLAN (2005, /241/) und bei Rauche et al. (2005, /811/).

BOX 1.4

ERCOSPLAN – Sechs Jahrzehnte Kaliprojektierung *made* in Erfurt



Stammsitz der ERCOSPLAN Unternehmensgruppe in der Arnstädter Straße 28 in Erfurt

KALI-INGENIEURBÜRO Erfurt – die zentralisierte Planungskompetenz der mitteldeutschen Kaliindustrie

Im Jahre 1952 – vor mehr als 60 Jahren – wurde in Erfurt der VEB Zentrales Projektierungs- und Konstruktionsbüro für die Kaliindustrie und den Nichterzbergbau (ZPK) gegründet, um den in der damaligen DDR nach dem 2. Weltkrieg wieder in Produktion stehenden 12 Kali- und 5 Steinsalzwerken bei der Modernisierung und Produktionserweiterung als Berater und Planer zur Seite zu stehen. Aus diesem – sozusagen Vor-Vorläufer der ERCOSPLAN Unternehmensgruppe – ging 3 Jahre später das KALI-INGENIEURBÜRO Erfurt (KIB) hervor, welches seit 1956 unter verschiedenen Firmennamen und ab Oktober 1958 in dem eigens dafür erbauten Erfurter Bürogebäude Arnstädter Straße 28 – dem heutigen Sitz der ERCOSPLAN Unternehmensgruppe – tätig war und ist.

Nach der politischen Wende in der ehemaligen DDR und der Wiedervereinigung Deutschlands erfolgte im Jahre 1992 die Gründung der ERCOSPLAN Erfurter Consulting- und Planungsbüro GmbH durch ein *management-buy-out*. ERCOSPLAN ist dem stark spezialisierten Geschäftsfeld des Kali- und Steinsalzbergbaus und der -aufbereitung bis heute treu geblieben und bietet noch immer – seit Ende der 1990er Jahre auch weltweit – professionelle Beratung und innovative Projektierungsleistungen für die Gewinnung und Aufbereitung unterschiedlichster Kalirohstoffe sowie für den Umweltschutz bei der Kalidüngemittelherstellung an. Heute beschäftigt die ERCOSPLAN weltweit etwa 200 Mitarbeiter, davon knapp die Hälfte noch immer an ihrem Geburtsort in der Arnstädter Straße 28 der Landeshauptstadt Erfurt in Thüringen.

In den 6 Jahrzehnten Firmengeschichte wurden Planungsleistungen für ein Gesamtinvestitionsvolumen von umgerechnet 13 Milliarden Euro bearbeitet, allesamt für die Kalidüngemittelproduktion. Etwa 55 bis 60 Prozent dieser Planungen wurden auch tatsächlich realisiert, wobei ERCOSPLAN und seine Vorläufereinrichtungen wiederum bei der Bauüberwachung und Bauoberleitung und beim Projektmanagement mitwirken konnten.

ERCOSPLAN – unabhängiger Sachverständiger, Berater und Planer für die Kaliindustrie rund um die Welt

ERCOSPLAN ist als Berater und Planer sowohl für die Kalidüngemittelproduzenten selbst, für Investoren in neue Kaliprojekte, die sogenannten *Junior Mining Companies*, oder als unabhängiger Sachverständiger für Berg- und Umweltbehörden oder auch für Finanzinstitutionen und Aufsichtsorgane der internationalen Finanzhandelsplätze und nationale oder internationale Schiedsgerichte tätig. In den vergangenen Jahren betrug das jährliche Umsatzvolumen von ERCOSPLAN Unternehmensgruppe etwa 20 Millionen Euro, wobei der im Ausland erwirtschaftete Anteil zwischen 60 und 85 Prozent variierte.

Diese Einbeziehung fundierter Kenntnisse zu den Lagerstätten, zu den Methoden, Verfahren und Anlagen der Rohstoffgewinnung und -aufbereitung in der Mineralsalzindustrie ist insofern von besonderer Bedeutung, da die in öffentlich zugänglichen Quellen, wie zum Beispiel den Finanz- beziehungsweise Geschäfts-[38], sowie Umwelt-[39] und Nachhaltigkeitsberichten[40] preisgegebenen Informationen vielfach kein vollständiges oder zusammenhängendes Datengerüst zu einem spezifischen Standort, einem speziellen Verfahren oder einer individuellen Anlage und/oder einem Produzenten vermitteln, vielmehr allein den nach gültigen Rechtsnormen der verschiedenen Staaten und/oder Finanzhandelsplätze geforderten Berichtspflichten Genüge tragen. Insofern galt es zunächst, diese zahlreichen Einzelinformationen unter Nutzung einschlägigen Sachverstandes zu einem synoptischen Bild zusammenzusetzen und auf diese Weise für den Vergleich der einzelnen Standorte sowie der dort praktizierten technischen Methoden, Verfahren und Anlagen aufzubereiten.

Da der weitaus größte Teil der weltweiten Kaliproduktion auf die Herstellung von chloridischen Düngemitteln entfällt, existieren zwangsläufig auch weit mehr Referenzfälle für die dabei genutzten Methoden, Verfahren und Anlagen. Dies gilt sowohl hinsichtlich des Produktionsvolumens wie auch in Bezug auf die Anzahl der Produktionsstandorte, sprich Referenzfälle. Wie später noch im Einzelnen erläutert werden wird (▸ Kapitel 5 und 6), sind die dabei weltweit angewendeten Methoden, Verfahren und Anlagen nicht in vollem Umfang für einen Vergleich mit den an den meisten deutschen Standorten zur Kalidüngemittelproduktion betriebenen Methoden, Verfahren und Anlagen geeignet. Außer dem von K+S betriebenen Werk Zielitz und dem Produktionsstandort von DEUSA in Kehmstedt/Bleicherode, werden an jedem anderen Kaliproduktionsstandort Deutschlands neben KCl-Produkten auch sulfatische und/oder auch andere Spezialdünger für die Landwirtschaft und/oder Industriekaliprodukte[41] hergestellt, was letztlich dem zum Beispiel im deutschen Bundesberggesetz[42] verankerten Gedanken einer nachhaltigen Ressourcennutzung (▸ Abschnitt 4.1) entspricht (▸Box 1.5).

Dieser Umstand ist besonders beim Vergleich einschlägiger Kennziffern zur Beurteilung der Wertstoffausbeute zu würdigen. So gibt die Ausbeute des Wertstoffes KCl, das sogenannte KCl-Ausbringen eines Aufbereitungsverfahrens, wie sie als Nachhaltigkeitskriterium bei der Produktion chloridischer Kalidüngemittelproduke herangezogen wird, allenfalls für diesen Teilstrom der Rohstoffverwertung Auskunft. Diese Kennziffer vermag es aber nicht, die Nachhaltigkeit solcher Aufbereitungsverfahren und -anlagen zu beleuchten, die hinsichtlich einer möglichst hohen Nettoausbeute mehrerer Wertstoffe ausgelegt wurden. Solche auf die multiple Wertstoffgewinnung ausgerichteten und daher technisch oft komplexen, in der industriellen Praxis in aufeinanderfolgenden Etappen auch vielfach optimierten Aufbereitungsverfahren und -anlagen rangieren bezüglich der Ausbeute des Wertstoffes KCl mitunter hinter jenen Verfahren und Anlagen, die allein auf die KCl-Herstellung zielen. Nichtsdestotrotz wird aber gerade durch die Nutzung mehrerer Wertstoffkomponenten ein sehr hohes Maß an Nachhaltigkeit bei der Nutzung des natürlichen Kalirohstoffes erreicht, nicht zuletzt auch die spezifische Menge der mit der Rohstoffaufbereitung unvermeidbar anfallenden Rückstände vermindert.

38 verbindlich festgeschrieben in den folgenden Gesetzen/Richtlinien für Kanada: FAA 1985, /264/; für USA: NYSE 2009, /718/; für Israel: CLI 5759-1999 1999, /161/; beziehungsweise für die EU: TUG 2004, /1027/; und für Großbritannien zusätzlich: TCA 2006 2011, /1004/; beziehungsweise für Deutschland zusätzlich: HGB: Drittes Buch Handelsbücher 2011, /393/

39 verbindlich festgeschrieben in den folgenden Gesetzen/Richtlinien für die EU: EU 2009, /257/; UAG 2002, /1031/; und für Großbritannien zusätzlich: TCA 2006 2011, section 416 (4), /1004/

40 verbindlich festgeschrieben in den folgenden Gesetzen/Richtlinien für die EU: EC 2002b, /223/; und für Deutschland zusätzlich: Aktiengesetz AktG: § 171 Abs. 2, /16/ sowie: Deutscher Corporate Governance Kodex DCGK 2012, /187/

41 Industriekaliprodukte sind solche verkaufsfähigen Fertigprodukte, die keine Anwendung als Düngemittel in der Landwirtschaft finden, sondern als Ausgangsstoffe für die industrielle Herstellung chemischer, pharmazeutischer oder Nahrungsgüterprodukte dienen.

42 vergleiche hierzu insbesondere: BBergG 1980, §§ 1, 48, /79/; aber auch internationale verpflichtende Standards, Richtlinien und Erklärungen: WTO 1994a, /1138/; 1994b, /1139/; 2005, /1140/; EC 2001, /221/; 2012a, /227/; 2012b, /228/; FIDIC 2004, /272/; EU 2009, /257/; UN 2011, /1040/; 2012, /1041/

BOX 1.5

Nachhaltige Ressourcennutzung im hessisch-thüringischen Werra-Kalirevier

Optimale Rohsalznutzung im Verbund mehrerer Produktionsstandorte

Während die heute in Verhieb stehenden deutschen Lagerstätten im Verbundwerk Werra[43] mit 17 Prozent im weltweiten Vergleich relativ geringe, im Kaliwerk Zielitz[44] früher mit bis 27 Prozent höchstens mittelmäßige durchschnittliche KCl-Gehalte aufweisen, stehen vor allem in Saskatchewan, Kanada mit 40 Prozent und an der Oberen Kama, Russland mit über 32 Prozent mittleren KCl-Gehalten hochwertige Chloridtyplagerstätten in Abbau. Um selbst die geringen durchschnittlichen KCl-Gehalte des Verbundwerkes Werra von 17 Prozent zu erreichen, ist eine relativ aufwendige Verschneidung[45] der an unterschiedlichen Lokalitäten des etwa 700 Quadratkilometer großen und auf 2 Abbauhorizonten entwickelten Grubenfeldes anstehenden, unterschiedlich wertstoffhaltigen Rohsalze erforderlich. Um diese nach ökonomischen (hinsichtlich Wertstoffausbringen) und ökologischen (hinsichtlich einzusetzender Prozesswässer und Reagenzien aber auch bezüglich der Rückstandsmengen) Grundsätzen optimierte Rohsalzzusammensetzung zu erreichen, waren eine untertägige Förderverbindung zwischen dem thüringischen Kalibergwerk Unterbreizbach und den hessischen Kalibergwerken Hattorf und Wintershall sowie die Einrichtung verschiedener untertägiger Vorratsbunker erforderlich.

Diese naturgegebenen lagerstättengeologischen Randbedingungen sind im Hinblick auf die Produktion der am stärksten nachgefragten MOP-Kalidüngemittel ein Wettbewerbsnachteil für den deutschen Produzenten. Hinzu kommt, dass zum Beispiel im Verbundwerk Werra ein erheblicher Teil des KCl-Gehaltes im Rohsalz nicht aus Sylvin[46], sondern aus Carnallit[47] entstammt: Das am Standort Unterbreizbach des Verbundwerkes Werra gewonnene und im Förderverbund aller 3 Werra-Werke verarbeitete Rohsalz enthält lediglich 10 Prozent Sylvin,

43 Das Verbundwerk Werra ist mit etwa 44 % der gesamten Produktionskapazität das leistungsstärkste Kaliwerk von K+S.

44 Heute liegt der mittlere KCl-Gehalt im Förderrohsalz des Kaliwerkes Zielitz bei nur noch 21 m%. Das Kaliwerk Zielitz trägt etwa 24 m% zur gesamten Produktionskapazität von K+S bei.

45 Unter Verschnitt oder Verschneidung versteht man im bergmännischen Sprachgebrauch das Mischen verschieden wertstoffhaltiger Rohstoffströme mit dem Ziel, eine optimale Zusammensetzung für den nur in engen Bandbreiten ökonomisch wie ökologisch effizienten Aufbereitungsprozess zu erreichen

46 Das Kalium-Mineral Sylvin (KCl) enthält 63,2 m% K_2O.

47 Das Kalium-Magnesium-Mineral Carnallit (KCl x $MgCl_2$ x 6 H_2O) enthält 16,9 m% der Wertstoffkomponente K_2O.

dafür jedoch über 52 Prozent Carnallit. In einzelnen Feldesteilen werden Rohsalze abgebaut, die bis zu 90 Prozent Carnallit-Mineralgehalt aufweisen, was einem KCl-Gehalt von etwa 24 Prozent entspricht. Im Vergleich dazu ist der mittlere Carnallit-Anteil aufgrund der andersartigen Lagerstättenverhältnisse in den kanadischen und russischen Werken mit weniger als 5 Prozent verschwindend gering. Dieser Fakt beeinflusst nahezu die gesamte Gewinnungs- und Aufbereitungslinie, von der für den deutschen Produzenten erforderlichen höheren Rohsalztonnage bis hin zu Art und Menge zwangsläufig anfallender fester und flüssiger Aufbereitungsrückstände (▸ Kapitel 8). Darüber hinaus sind die im deutschen Kalibergbau ausgesprochen komplizierten geomechanischen Verhältnisse und die daraus resultierenden besonderen bergbausicherheitlichen Herausforderungen letztlich ebenfalls durch diese – von der Natur vorgegebenen – geologischen Randbedingungen, dabei insbesondere vom verbreiteten Auftreten carnallitischer Rohsalze bestimmt.

Hoher Verwertungsgrad als Wettbewerbsvorteil

Die deutsche Kaliindustrie hat diese Wettbewerbsnachteile gegenüber den nach dem 2. Weltkrieg expandierenden kanadischen und sowjetischen Produzenten bereits frühzeitig erkannt und im Sinne einer nachhaltigen Lagerstättenbewirtschaftung weitere Rohsalzkomponenten, wie den Kieserit (insbesondere im Werra-Kalirevier und im Hannoverschen Revier) sowie auch die Polysulfate Langbeinit und Polyhalit (im Unstrut-Kalirevier) für die Erzeugung sulfatischer Kalidüngemittel herangezogen. Eigens hierfür waren seit den 1950er Jahren neuartige Aufbereitungsverfahren bis zur industriellen Reife zu entwickeln, vor allem aber eine gezielte Entwicklung der für diese SOP- und K-Mg-Sulfat-Produkte geeigneten Absatzmärkte zu betreiben. Dank dieser Entwicklungsarbeit ist K+S heute in der Lage, aus den in den Lagerstätten vorhandenen natürlichen Ressourcen an kieseritischem Hartsalz bis über 40 Prozent als Wertstoff zu nutzen. Da die Vorräte an kieseritischem Hartsalz jedoch insgesamt begrenzt sind, werden diese Rohsalzströme mit anderen vermischt, so dass zum Beispiel für das Verbundwerk Werra im Durchschnitt ein Wertstoffgehalt des Rohsalzes von 37 Prozent vorliegt (▸ Abbildung 13).

Vergleichbare Referenzen für solche Produktionsanlagen, wo neben dem KCl auch die sulfatischen K- und/oder Mg-Komponenten der natürlichen Kalirohsalze zur Düngemittelproduktion genutzt werden, bestehen außerhalb von K+S heute nicht (mehr[48]).

Die heute produzierenden anderen Hersteller sulfatischer Kalidüngemittel nutzen eine gänzlich andere Rohstoffbasis und deshalb, aber auch aufgrund anderer klimatischer (▸ Abschnitt 4.3) sowie infrastruktureller Voraussetzungen (▸ Abschnitt 4.4), völlig andersartige Methoden, Verfahren und Anlagen zur Herstellung ihrer sulfatischen Düngemittelprodukte (▸ Abschnitte 5.2 und 6.3).

Bei der hier zur Rede stehenden Ableitung eines möglichst allgemeingültigen Standes der Technik ist diese Einmaligkeit der bei K+S angewendeten Methoden, Verfahren und Anlagen zur kombinierten Herstellung von chloridischen und sulfatischen Kalidüngemittelprodukten auf der Grundlage fester Kalirohsalze als wesentliches Alleinstellungsmerkmal zu berücksichtigen.

Der alle weiteren Verfahrensschritte bestimmende Ausgangspunkt für die Kalidüngemittelproduktion ist die zur Verfügung stehende natürliche Rohstoffquelle (▸ Abschnitt 4.1).

Für die Produktionseinheiten von K+S sind dies feste Kalirohsalze im geologischen Untergrund, wie sie auch von einer Vielzahl der anderen großen Kaliproduzenten der Welt genutzt werden, allerdings stellen letztere allesamt keine oder nur in sehr untergeordneter Weise sulfatische Düngemittel her. Im Hinblick auf eine hinreichende Anzahl von Referenzfällen erfolgte im Rahmen dieses Buches daher eine gewisse Fokussierung auf solche heute genutzten Methoden, Verfahren und Anlagen der Kalidüngemittelproduktion, deren maßgebliche Rohstoffquelle feste Kalirohsalze sind. Auf die Behandlung der anderen Verfahren wurde nicht verzichtet, allerdings auch nicht die gleiche inhaltliche Tiefenschärfe angewendet.

Nichtsdestotrotz ist der methodische Ansatz einer solchen vergleichenden Analyse der an den weltweit 71 Standorten der Kalidüngemittelproduktion angewendeten Methoden, Verfahren und Anlagen für die hier zur Rede stehende Ableitung eines möglichst allgemeingültigen Standes der Technik zielführend und richtig, soweit er die oben erläuterten Einschränkungen zu würdigen vermag. Diese Methode ist insofern auch eine legitime, da vom Gesetzgeber keine anderen Wege zur Definition des Standes der Technik selbst, oder untergeordneten Techniknormen, wie zum Beispiel Allgemein Anerkannte Regeln der Technik oder Beste Verfügbare Technik vorgegeben sind.

48 Die einzigen, zumindest in einigen wesentlichen Aufbereitungsschritten vergleichbaren Produktionsverfahren und -anlagen wurden im ehemaligen DDR-Kombinat KALI, dem Kaliproduzenten der früheren DDR, in den Kaliwerken Merkers bis 1993 und Dorndorf bis 1990, und – diese aber weniger gut vergleichbar – bei den Kaliproduzenten der ehemaligen Ukrainischen Sowjetrepublik, in den Kaliwerken Stebnik (Стебниковский Калужский калийные комбинат) und Kalusz (Калужский калийные комбинат) bis 1990 praktiziert (Bukowski & Jackiewicz 1926, /133/; Landgraeber 1927, /581/; Kityk et al. 1971, /525/; Kityk et al. 1983, /524/; Garkushin 1990, /309/; Petryczenko et. al 1994, /752/; Kulyniak 2002, /571/; Hryniv et. al 2007, /418/; Bukowski & Czapowski 2009, /132/; Czapowski, Bukowski & Poborska-Mlynarska 2009, /177/). Bis 1992 betrieb ITALKALI am Standort Pasquasia auf Sizilien in Italien ebenfalls eine kombinierte Produktion von chloridischen und sulfatischen Kalidüngemitteln, allerdings in recht kleinem Maßstab (Decima & Wezel 1971, /189/; PAP 1979, /725/; 1987, /726/; 1990, /727/; Lugli 1999, /608/; ITALKALI 2002, /442/; Roveri et al. 2008, /853/; Manzi et al. 2011, /620/). Obgleich die dort relativ wertstoffreiche Rohstoffquelle für die sulfatischen Kalidüngemittel mit den in Deutschland zur Verfügung stehenden Rohsalzen nicht vergleichbar ist, waren jedoch auch hier einzelne Prozessschritte ähnlich zu den heute bei K+S angewendeten Methoden. Es muss aber betont werden, dass auch all diese historischen Referenzfälle deutliche Unterschiede aufweisen, da sie niemals elektrostatische Aufbereitungsschritte anwendeten, wie dies aber bei K+S der Fall ist (▸ Abschnitt 6.1.3).

2 URSPRUNG UND GESCHICHTE DER INDUSTRIELLEN PRODUKTION VON KALIDÜNGEMITTELN

Kali[49] (Synonym für den englischsprachigen Terminus *potash*[50]), wissenschaftlich exakter formuliert das Element Kalium (K), spielt als wesentlicher Pflanzennährstoff eine wichtige Rolle in der Landwirtschaft. Gemeinsam mit Stickstoff (N) und Phosphor (P), den 2 anderen Hauptnährstoffen, wird Kalium in großen Mengen für das Pflanzenwachstum benötigt (Neitzel 1996, /704/). Landwirtschaftliche Dauerbewirtschaftung führt zwangsläufig zur Verminderung dieser Nährstoffe im Boden, weshalb die Kompensation dieser Nährstoffverluste durch den Einsatz von Düngemitteln in der Landwirtschaft unerlässlich ist.

Justus von Liebig (1803 – 1873), einer der Begründer der Organischen Chemie und gemeinhin als Vater der modernen Landwirtschaft bekannt, beschrieb diese naturwissenschaftlichen Zusammenhänge in seinem 1840 publizierten Werk "Die organische Chemie in ihrer Anwendung auf Agricultur und Physiologie", kurz Agriculturchemie (Liebig 1843, /591/) genannt, detailliert (Hoffmann 1972, /404/; Emons 2001, /237/). Ohne die pflanzenphysiologische Wirkungsweise verstanden zu haben, waren jedoch die Auswirkungen von Nährstoffentzug und die Notwendigkeit zur Nährstoffkompensation in verschiedenen Kulturen auf empirischem Wege seit Jahrhunderten erkannt worden: Sowohl in den Hochkulturen Chinas als auch bei den amerikanischen Ureinwohnern wurden zum Beispiel Konzentrate eingedampfter Aufgüsse von Holz- und Blattaschen zur Rückführung von Nährstoffen genutzt.

---

49 Kali ist ein nur unscharf definierter, gemeinsprachlicher Begriff für eine Mischung aus verschiedenen abgebauten und industriell hergestellten Salzmineralien mit einem hohen Gehalt an Kalium-Verbindungen. Kali wird sowohl als Begriff für das Rohsalz als auch für das Endprodukt verwendet. Um die Bedeutung besser abzugrenzen, wird das Rohsalz nach seinem hauptmineralischen Bestandteil spezifiziert (z.B. Sylvinit oder Carnallitit) und das Düngemittelprodukt nach der anionischen Bindung des Kaliums spezifiziert (z.B. *Muriate of Potash* – MOP im Gegensatz zu *Sulphate of Potash* – SOP).

50 *Potash*, das englischsprachige Synonym für den im oben genannten Sinne verwendeten deutschen Begriff Kali, geht auf eine (inhaltlich nicht korrekte) Übertragung des gemeinsprachlichen deutschen Begriffes Pottasche zurück. Pottasche bezeichnet Kaliumkarbonat (chemische Formel K_2CO_3). Vor der industriellen Kaliproduktion wurde Pottasche durch Anreicherung von Kaliumkarbonat aus Holzasche durch Auswaschen mit Wasser und anschließendem Eindampfen in großen Bottichen (Pott) gewonnen und unter anderem als Düngemittel eingesetzt.

H. Rauche, *Die Kaliindustrie im 21. Jahrhundert,*
DOI 10.1007/978-3-662-46834-0_2, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

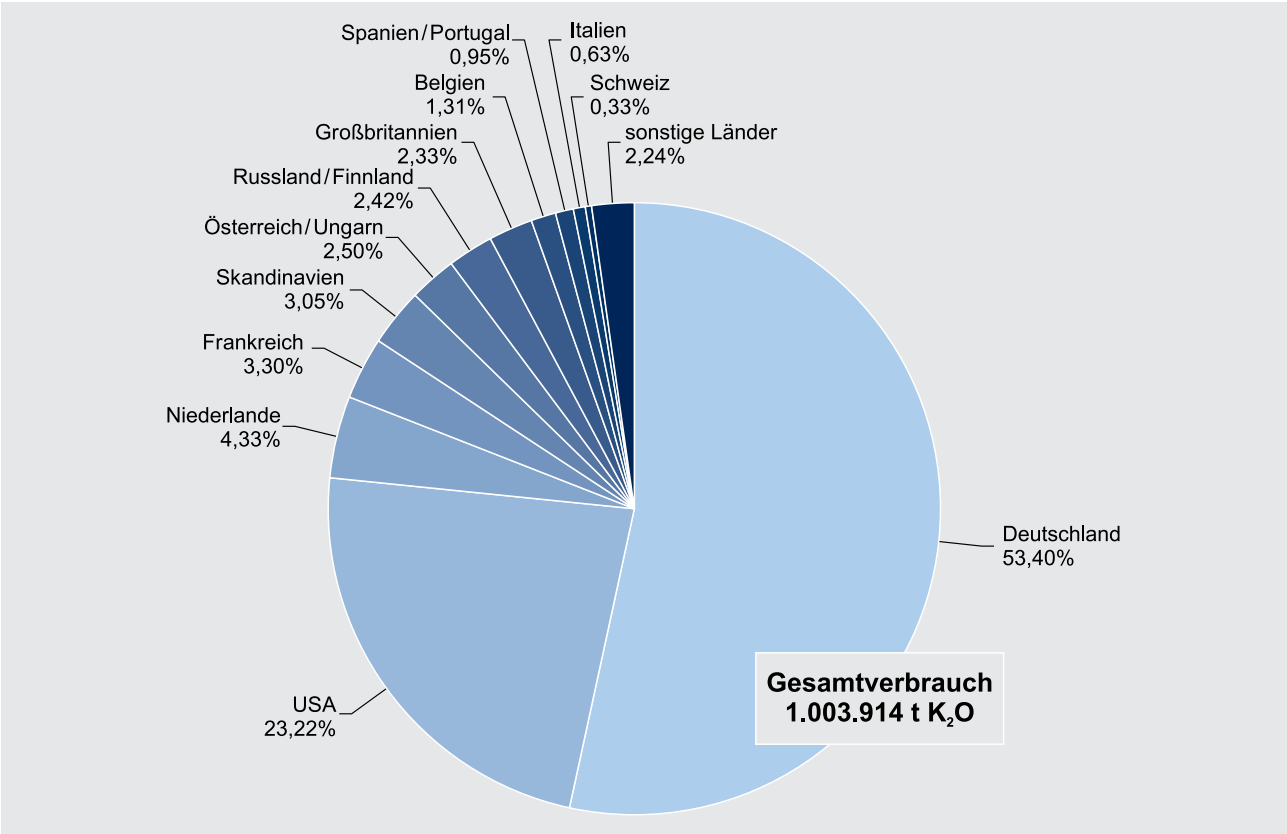


Abbildung 1 Globaler landwirtschaftlicher Kaliverbrauch im Jahr 1913 [nach Nörr 1991, /714/; Emons 2001, /237/, modifiziert]

Die industrielle – also die auf große Produktionsmengen durch Aufbereitung von Kalium-haltigen Mineralsalzen ausgerichtete – Kalidüngemittelherstellung begann jedoch erst nach dem Bekanntwerden Justus von Liebig's systematischer Forschungen, als 1861 in einem vom preußischen Fiskus ursprünglich zur Steinsalzförderung abgeteuften Bergwerk in Staßfurt, südlich Magdeburg gelegen, die planmäßige Gewinnung von Carnallitit[51] und dessen Aufbereitung zu Kalidüngemitteln in der ersten Chlorkaliumaufbereitungsanlage von Adolph Frank begann. Frank, der seine Aufbereitungsanlage bereits seit 1858 mit dem beim Schachtteufen zunächst als Abraumsalze geförderten Haufwerk betrieb, konnte etwa 20 Zentner Rohsalz pro Tag verarbeiten. In der 1861 in Betrieb gestellten Grüneberg-Forsterschen Chlorkaliumfabrik am gleichen Ort war dagegen bereits eine Aufbereitungskapazität von 200 Zentnern pro Tag geschaffen worden (Slotta 1980 /951/; Emons 2001, /237/; BV STASSFURT 2002, /142/).

Bereits 1863 gab es in und um Staßfurt 18 Kaliaufbereitungsanlagen, die noch allein von dem als Doppelschachtanlage von der Heydt/von Manteuffel betriebenen ersten Kalibergwerk der Welt beliefert wurden. Jenseits der damaligen Landesgrenze zwischen Anhalt und Preußen, wurden auf anhaltinischer Seite ebenfalls ab 1862 die beiden Schächte Leopoldshall I und II abgeteuft, die ab 1874 auch ausschließlich ihre eigenen Verarbeitungsanlagen belieferten. In der Folgezeit entstanden weitere Werke am Staßfurter und Ascherslebener Sattel, später im Allertal, im Raum südlich des Harzes sowie im Werra-Kalirevier, im Raum Hannover und am Oberrhein. Im Jahre 1910 produzierten bereits 68 Kaliwerke mit 141 Schächten. Deutschland behielt über 57 Jahre das Weltkalimonopol bis mit dem Versailler Vertrag Elsass-Lothringen – und mit ihm die 3 zur damaligen Zeit auf der westlichen Rheinseite bei Mulhouse produzierenden Werke – an Frankreich fielen (Hermann 1925, /388/; Medemblik 1983, /632/; Weissenberger 1985, /1107/).

[51] Carnallitit: Kalisalzgestein, dessen hauptsächlicher Kalium-Träger das Mineral Carnallit $KMgCl_3$ x 6 H_2O ist. Der K_2O-Gehalt von Carnallit beträgt 16,9 m%.

Während anfänglich lediglich Carnallitit und Kainitit[52] als Kalirohsalz abgebaut wurden, kamen ab 1890 vermehrt Hartsalze[53] in Gewinnung.

Im Vorkriegsjahr 1913 erreichte die Kaliproduktion ihre damalige Rekordförderung von nahezu 12 Millionen Tonnen Rohsalz, das zu etwa einer Million Tonnen K_2O[54] verarbeitet wurde. Mehr als 90 Prozent dieser Produktmenge entfiel auf die landwirtschaftliche Verwendung, knapp die Hälfte davon auf den Exportmärkten, darunter mit 23 Prozent auf die USA (▸ Abbildung 1).

Zwischen den Weltkriegen stieg die Kaliproduktion stetig an. Als wichtige neue Produzenten kamen ab 1931 die USA (Turrentine 1943, /1030/; Prugger & Prugger 1991, /787/) und ab 1933 die Sowjetunion hinzu. Deutschland, Frankreich, die USA und die Sowjetunion produzierten im Jahre 1938 zusammen etwa 5,2 Millionen Tonnen Kalidüngemittel, davon kam mehr als die Hälfte aus deutschen Werken. In den letzten beiden Kriegsjahren des 2. Weltkrieges war die europäische Produktion nahezu vollständig zum Stillstand gekommen, wurde jedoch nach Kriegsende alsbald wieder aufgenommen. Im Jahr 1945 wurden weltweit nur 2,2 Millionen Tonnen Kalidüngemittel produziert, fast 70 Prozent davon stammten aus US-Produktion.

Im Jahr 1955 wurde in Israel die Kaliproduktion aus Salzlösungen des Toten Meeres aufgenommen. In den 1950er und 1960er Jahren kamen auch Italien (1959), Kanada (1962) und die damalige Volksrepublik Kongo (Kongo-Brazzaville; 1969; heute Republik Kongo) als kaliproduzierende Länder hinzu. Die Weltkaliproduktion (▸ Abbildung 2) überschritt im Jahr 1963 erstmals die Marke von 10 Millionen Tonnen K_2O, steigerte sich in nur 10 Jahren auf das Doppelte und betrug bereits im Jahr 1977 mehr als 25 Millionen Tonnen K_2O (KALIVEREIN 1988, /497/).

Seit 1977 gehören auch Großbritannien, seit 1982 Jordanien und seit 1985 Brasilien zu den kaliproduzierenden Ländern.

Die wesentlichen Meilensteine dieser historischen Entwicklung der Kaliindustrie im Mutterland Deutschland und weltweit sind in Abbildung 3 dargestellt.

Bereits die frühen Jahre der Kaliindustrie waren durch einen harten Wettbewerb gekennzeichnet, der zu dramatischen Konkursen einzelner Gewerkschaften[55] führte.

Nach Abklingen des ersten Kali-Berggeschreys wurden ab 1910 zunächst in Form des Reichskalirates bis hin zur endgültigen Verabschiedung des Reichskaligesetzes (oder Kaliwirtschaftsgesetz) im Jahre 1933 mit Hilfe staatlicher Lenkung in Form von Preisregulierung und Produktionskonzentration auskömmliche wirtschaftliche Rahmenbedingungen für den noch jungen Industriezweig geschaffen (Nörr 1991, /714/; Emons 2001, /237/). Doch auch während Deutschland bis zum Versailler Vertrag das Kalimonopol im internationalen Handel wohl zu nutzen wusste (Weissenberger 1985, /1107/), standen national die im Wesentlichen aus Konsolidierungen hervorgegangenen Konzerne Wintershall, Burbach und Salzdetfurth im harten Wettbewerb. Enormer Kostendruck und daraus der Zwang zur Rationalisierung und Modernisierung waren die Folge. Mindestens seit dieser Zeit stehen Steigerungen des Wertstoffausbringens und der Energieeffizienz, aber auch die Lösung der Entsorgungsprobleme dauerhaft im Vordergrund der Entwicklungsstrategien der Kaliindustrie.

Als nach dem 2. Weltkrieg nennenswerte Mengen an Kalidüngemitteln auch außerhalb Deutschlands hergestellt und in angestammte Märkte exportiert wurden, stieg dieser Zwang zur Rationalisierung erneut stark an. Die aufgrund der geografischen Lage kürzeren Transportwege der nordamerikanischen Produzenten, vor allem aber deren höhere Wertstoffgehalte in den Lagerstätten konnten in der Kaliindustrie Ost- und Westdeutschlands letztlich nur durch die Einführung innovativer technischer Methoden und Verfahren unter und über Tage kompensiert werden. Aus diesem Zwang zur Kostenreduzierung resultiert letztlich bis heute die Tatsache, dass die deutsche Kaliindustrie nahezu in allen Bereichen, besonders jedoch in der Rohsalzaufbereitung und beim Umweltschutz, eine internationale Vorreiterrolle eingenommen hat und einnimmt (KFI 1944,

52 Kainitit: Kalisalzgestein, dessen hauptsächlicher Kalium-Träger das Mineral Kainit $(KMgClSO_4)_4 \times 11\ H_2O$ ist. Der K_2O-Gehalt von Kainit beträgt 19,3 m%.

53 Hartsalz ist eine in Deutschland übliche bergmännische Bezeichnung für Kalisalzgesteine, die aufgrund ihrer sulfatischen Beimengungen, vor allem Anhydrit ($CaSO_4$) und Kieserit ($MgSO_4 \times H_2O$), beim Bohren besondere Härte aufweisen. Der hauptsächliche Kalium-Träger im Hartsalz ist Sylvin (KCl). Der K_2O-Gehalt von Sylvin beträgt 63,2 m%. Hartsalze enthalten außerdem Halit (NaCl) und wechselnde Anteile sulfatischer und/oder polysulfatischer Salzminerale sowie Tonminerale.

54 K_2O: Kaliumoxid wird traditionell genutzt, um den Kalium-Wertstoffgehalt in einem Kaliprodukt zu beschreiben, unabhängig von der anionischen Komponente Chlorid oder Sulfat.

55 Der Begriff Gewerkschaft oder vollständig Bergrechtliche Gewerkschaft, bezeichnet hier die frühere Rechtsform einer Kapitalgesellschaft, wie sie für Bergbauunternehmungen seit dem Mittelalter üblich war, in der Bundesrepublik Deutschland seit 1980 aber nicht mehr gebräuchlich ist.

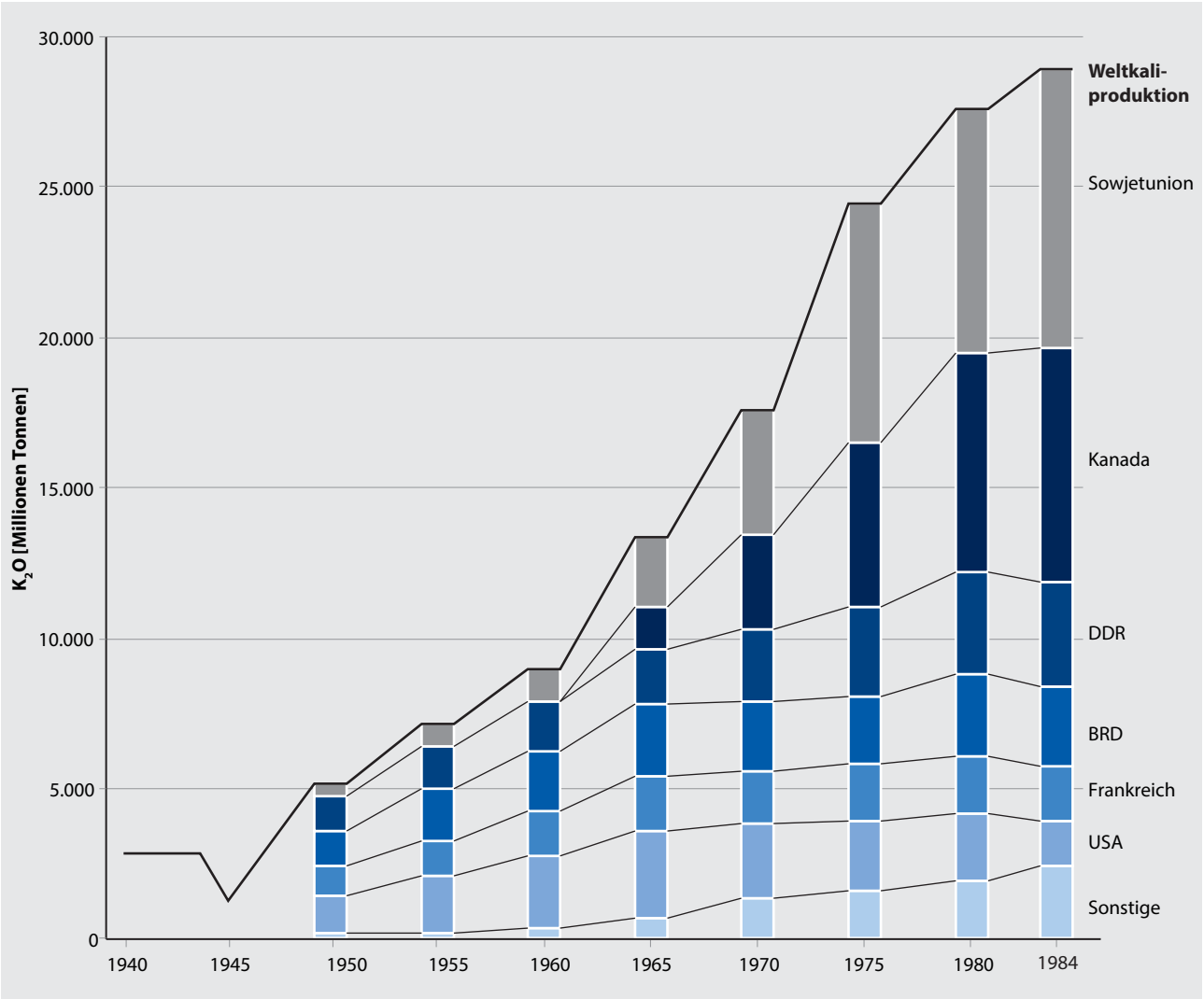


Abbildung 2 Historische Entwicklung der kumulativen Weltkaliproduktion zwischen 1940 und 1985[56]

/517/; 1970, /518/; Gimm 1961, /330/; 1968, /331/; Schubert 1964, /899/; 2008, /902/; Fulda, Gruchot & Michalzik 1966, /301/; Autenrieth 1969a, /35/; Jendersie 1969, /454/; Hoffmann 1972, /404/; Bischofberger & Schubert 1978, /105/; Singewald 1980, /933/; Achorn & Balay 1985, /10/; KALI-VEREIN 1988, /497/; Jeremic 1994, /455/; Garrett, 1996 /315/; Stahl 1996, /972/; Elsass 2000, /235/; Emons 2001, /237/; Bartl 2003a, /63/; Scherzberg 2003, /879/; Riesche 2004, /841/; Herrmann 2007, /391/; Gerling 2009, /323/; Baumgertner & Belyakov 2012, /78/; Middleton 2012, /653/) (▸Box 2.1).

Im Verlauf der mehr als 150jährigen Geschichte der Kaliindustrie hat sich der Stand der Technik bei der Kalidüngemittelproduktion sowohl hinsichtlich der Gewinnungsmethoden als auch in Bezug auf die Rohstoffaufbereitung und die Produktveredlung entscheidend verändert. Wie bereits erwähnt, waren die wesentlichsten Triebkräfte hierfür stets wirtschaftlicher Natur, indem man versuchte, die Lagerstätteninhalte besser zu nutzen – um es in der heutigen Terminologie zu beschreiben, also eine nachhaltige Rohstoffverwertung zu betreiben – und das Wertstoffausbringen zu erhöhen.

56 Kompiliert aus verschiedenen historischen Quellen und früheren Zusammenfassungen zur Weltkaliproduktion (Slotta 1980, /951/; Hauske 1987, /378/; Emons 2001, /237/; Bartl et al. 2003, /66/). Für den Zeitraum 1945 bis 1950 liegen nur wenig zuverlässige und zum Teil widersprüchliche Produktionszahlen einzelner Kaliproduzenten vor, weshalb im Diagramm für diesen Zeitraum lediglich die kumulative Kurve interpoliert, nicht aber die Kaliproduktion einzelner Länder dargestellt wurde.

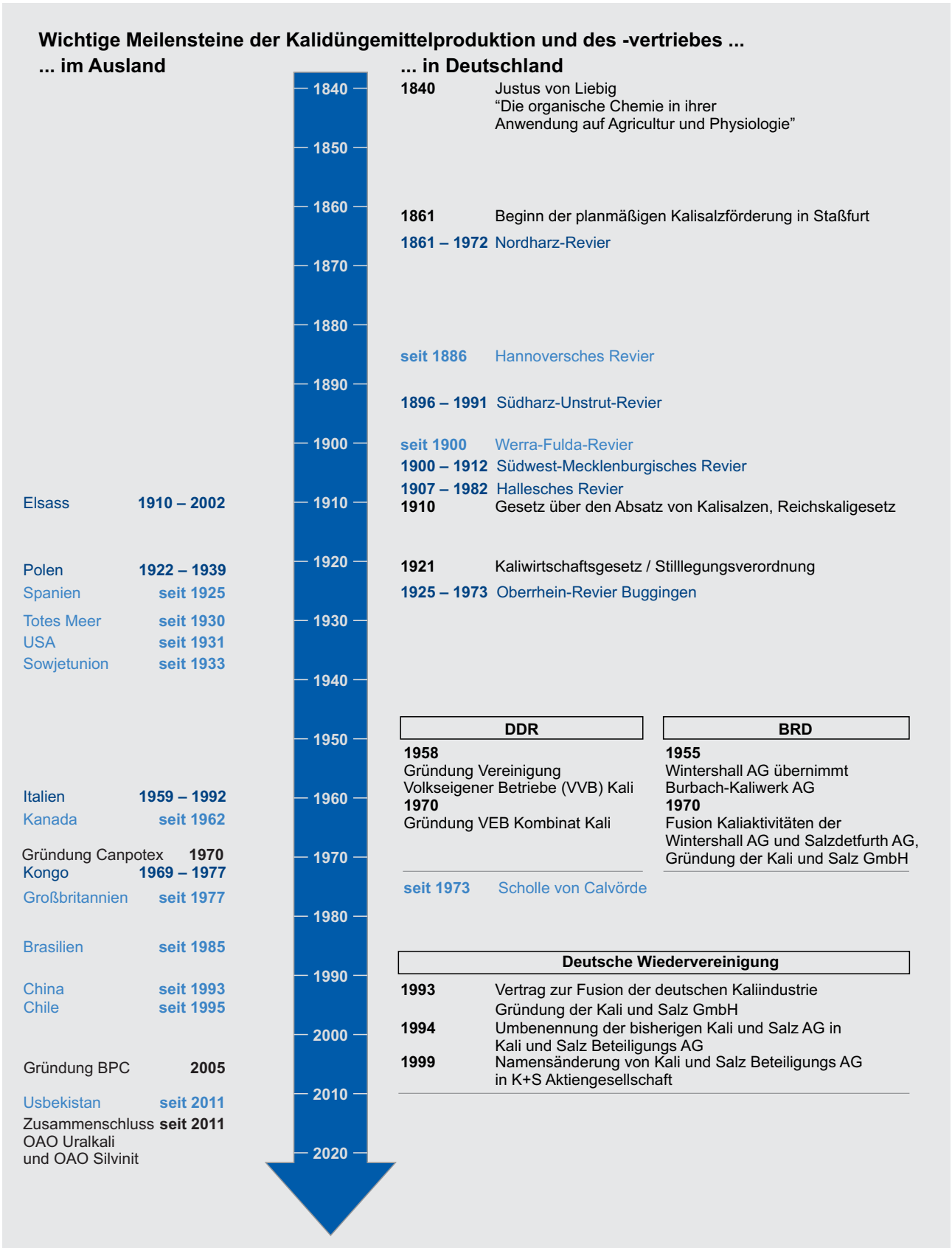


Abbildung 3 Wichtige Meilensteine der historischen Entwicklung der Kaliindustrie: dunkelblau – Produktionszeitraum in bereits stillgelegten Revieren; hellblau – Produktionsstart in noch produzierenden Revieren; schwarz – wissenschaftliche, wirtschaftspolitische und industriehistorische Meilensteine

BOX 2.1

Historische Entwicklung der Beseitigung flüssiger Aufbereitungsrückstände im hessisch-thüringischen Werra-Kalirevier

Entwicklung der ökologischen Dimension der nachhaltigen Ressourcennutzung

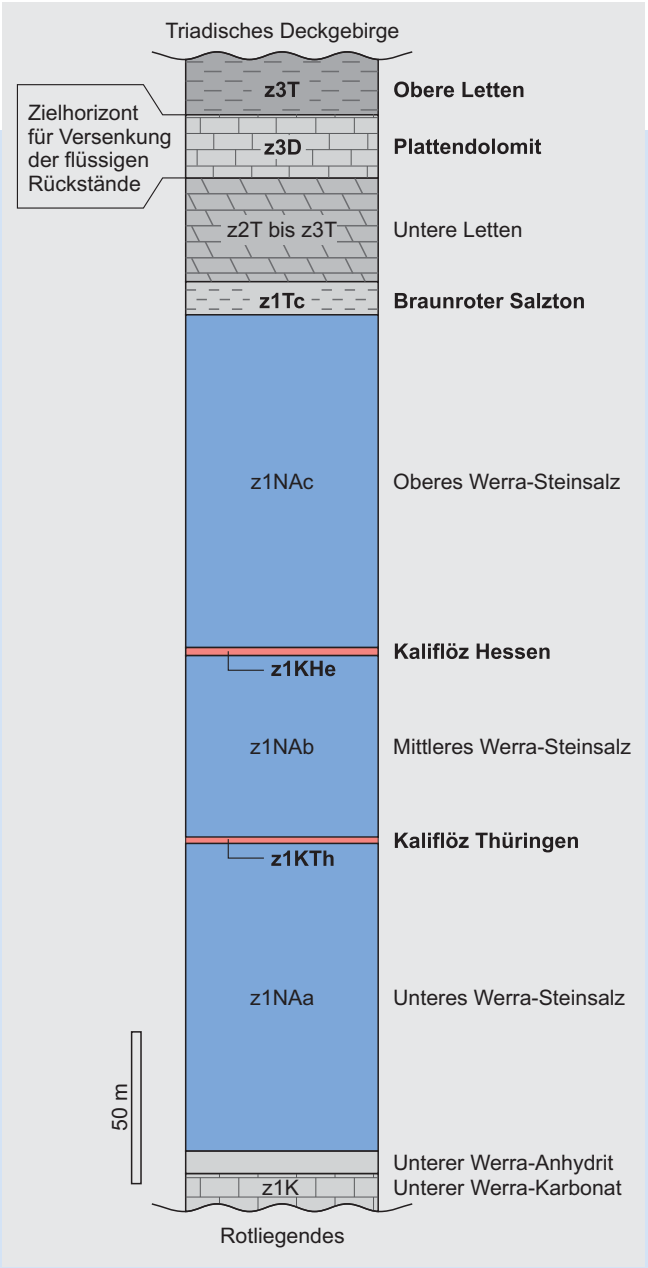
Die auf Fortschritt orientierte Entwicklung der ökologischen Dimension einer nachhaltigen Ressourcennutzung lässt sich ganz besonders für das Werra-Kalirevier aufzeigen: Im Werra-Kalirevier wurden bereits seit den späten 1930er Jahren, in der gesamten deutschen Kaliindustrie mindestens seit den 1950er Jahren, große Anstrengungen unternommen, die besonders bei der Carnallititaufbereitung unweigerlich anfallenden flüssigen Rückstände weiter zu vermindern. Neben den bereits erwähnten Zwängen zur Verminderung des Primärenergieverbrauchs spielten hierbei jedoch auch immer Fragen der Rückstandsentsorgung und des Umweltschutzes eine wachsende und später auch die dominierende Rolle. Insofern waren und sind die zurzeit in der Öffentlichkeit wieder breit diskutierten ökologischen Aspekte der Kalidüngemittelproduktion ein permanentes Betätigungsfeld sowohl für das Führungspersonal in den Betrieben, für die beteiligten Aufsichtsbehörden als auch für die externen ingenieurtechnischen Berater der Kaliindustrie. Ebenso wie heute galt es auch schon vor mehr als einem halben Jahrhundert, einen für die Mehrheit der Industriegesellschaft tragfähigen Konsens durch Abwägung von ökologischen und ökonomischen Interessenslagen herbeizuführen.

Einleitquoten als Instrument der staatlichen Steuerung

Die Ökosysteme von Ulster sowie Werra und in der Folge der Weser wurden durch die mit der Einleitung von flüssigen Aufbereitungsrückständen verbundenen Salzfrachten faktisch seit Beginn der Kalidüngemittelproduktion im Werra-Kalirevier belastet. Diese Belastungen führten bereits in den 1910er Jahren zur Beeinträchtigung der Trinkwassergewinnung aus Uferfiltraten im Unterlauf der Weser bis Bremen. In der Konsequenz wurde auf Initiative des preußischen Staates im Jahre 1913 die sogenannte Kaliabwässerkommission für das Werra- und Fuldagebiet mit Sitz in Vacha, Thüringen, gegründet, deren Vorsitz der Chemiker Hermann Wichelhaus (1842 – 1927) bis 1916 inne hatte. Im Jahre 1920 legte die Kaliabwässerkommission erste zwischen den einzelnen Kaliwerken abgestimmte Einleitungsquoten und Höchstwerte für den Salzgehalt im Flusswasser der Werra fest. Im Jahre 1942 wurden Grenzwerte für die Salzlösungsbeseitigung dergestalt definiert, dass am Referenzpegel Gerstungen die Gesamtchloridkonzentration von 2.500 Milligramm pro Liter und ein Härtewert von 50° Deutscher Härte nicht überschritten werden darf, was 1947 nach der deutschen Teilung bestätigt wurde (Seifert 1953, /914/). Diese Regelung berücksichtigte eine geogene Salzfracht der Werra oberhalb der Einleitungsstellen der Kaliindustrie, die – nach damaligem Verständnis – einer Chloridkonzentration von 100 Milligramm pro Liter und einer Gesamthärte von 14° Deutscher Härte entsprach. Den beiden hessischen Kaliwerken Hattorf und Wintershall wurde eine Quote von etwa 38 Prozent der Chloridfracht und von etwa 32 Prozent der Gesamthärte zugeteilt und den thüringischen Werken die Auslastung der Differenz zugestanden.

ESTA®-Verfahren als bahnbrechende Innovation

Die wesentliche Motivation für die Rückstandsreduzierung entstand für die hessischen Kaliwerke Hattorf und Wintershall in der Folgezeit aus der Tatsache, dass die möglichen Beseitigungswege über die Flüsse Ulster und Werra nach der politischen Teilung Deutschlands zumindest für diese Werke nicht in gleichem Maße zugänglich waren wie zuvor: Auf thüringischer Seite wurde die Versenkung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in den Plattendolomit (Leinekarbonat, Zechstein 3, Oberperm) in den späten 1960er Jahren gänzlich eingestellt. Gleichzeitig erhöhten die ehemaligen DDR-Kaliwerke in Merkers, Dorndorf und Unterbreizbach ihre Produktionskapazitäten, wobei durch diese letztlich nahezu die Gesamtmenge an flüssigen Aufbereitungsrückständen – in den 1970er und 1980er Jahren mit einer jährlichen



Stratigrafische Position des Kluftspeichergesteins Plattendolomit (Leine-Karbonat, Zechstein 3, Oberes Perm), der als Zielhorizont für die Versenkung flüssiger Rückstände der Kalidüngemittelproduktion im Werra-Kalirevier genutzt wird

Salzfracht von durchschnittlich etwa 6,5 Millionen Tonnen – über die Flüsse Ulster beziehungsweise Werra beseitigt wurde und dabei bereits das ökologisch vertretbare Maß in Größenordnungen überschritten wurde (Meijering 1978, /636/; WESER 1979, /1114/; 1988, /1115/; 1990, /1116/; Menk 1980, /638/; Ostermeyer 1980, /723/; Wroz 1982, /1133/; 1983, /1134/; Aurada 1992, /30/; 1997, /31/; Strube 1993, /990/; 2000, /991/; Theile 1996, /1004/; Pörtge 1999, /770/; Aurada & Rödel 2005, /32/; Becker et al. 2014, /81/). Bis zum Ende der 1980er Jahre lag die Chloridbelastung am Referenzpegel der Werra bei Gerstungen durchschnittlich über 10.000 Milligramm pro Liter, Anfang der 1970er Jahre im Jahresmittel mehrfach über 25.000 Milligramm pro Liter und in den Jahren 1976/77 sogar um 40.000 Milligramm pro Liter. Eine ähnliche Entwicklung war für die Gesamthärte festzustellen, die seit 1968 durchschnittlich über 250° Deutscher Härte lag. Während in den früheren DDR-Kaliwerken die Kalidüngemittelproduktion gegenüber dem Umweltschutz absolute Priorität genoss, also die von der Kaliabwässerkommission im Jahre 1947 festgelegten Grenzwerte nicht länger respektiert wurden, bestanden die nach dem Recht der Bundesrepublik Deutschland für die hessischen Werke erteilten wasserrechtlichen Erlaubnisse auf die Einhaltung respektive Unterschreitung dieser Grenzwerte der Gewässerbelastung. Zwischen beiden deutschen Staaten wurden im Rahmen einer Ständigen Regierungskommission Fragen des Kalibergbaus im Werra-Kalirevier und dabei auch regelmäßig die Probleme der Werraversalzung erörtert. Durch dieses Gremium empfohlene Lösungsvorschläge, wie die Finanzierung leistungsfähiger Flotationsanlagen für die ehemaligen DDR-Kaliwerke oder die Bereitstellung des ESTA®-Verfahrens durch die Bundesrepublik kamen aber bis zur Wiedervereinigung nicht zur Verwirklichung.

Entsprechend wichtiger wurden für die hessischen Werke einmal die Reduzierung der flüssigen Rückstände insgesamt und zum anderen deren Beseitigung durch Versenkung in den geologischen Untergrund. Durch Einführung der ESTA®-Aufbereitung in Hessen – und später in Niedersachsen – ist der Anteil an flüssigen Rückständen im Jahre 1974 von 44 Prozent an der Gesamtmenge der Rückstände auf 24 Prozent im Jahr 1988 gesunken (Walterspiel 1989, /1090/; Prugger 1992, /785/).

Für die Beseitigung der verbleibenden Mengen flüssiger Rückstände war die Erweiterung der Versenkräume einerseits, vor allem aber auch ihre nachhaltige Bewirtschaftung für die Kaliwerke Hattorf und Wintershall überlebenswichtig. Glaubte man noch in den 1920er Jahren ▶

Historische Entwicklung der Beseitigung flüssiger Aufbereitungsrückstände im hessisch-thüringischen Werra-Kalirevier

im Werra-Kalirevier mit der Versenkung der flüssigen Aufbereitungsrückstände über Tiefbohrungen, sogenannte Schluckbrunnen in das klüftig-poröse Karbonatgestein des Plattendolomit (Zechstein 3, Oberes Perm) einen zwar technisch aufwendigen, aber quasi unerschöpflichen Weg für die Beseitigung gefunden zu haben, zeigten sich jedoch bald die Schwierigkeiten bei der Erkundung hinreichender Speicherkapazitäten (Beyschlag & Fulda 1921, /96/; Deubel 1942, /194/; 1948, /195/; 1954, /196/; Stolle 1958, /981/; Hoppe 1964, /412/; Finkenwirth 1963, /275/; 1964, /276/; Haase 1963, /359/; Poschke 1965, /771/; Finkenwirth & Fritsche 1993, /274/; Skowronek et al. 1999, /949/; Fritsche 2000, /293/, Käbel 2006, /493/).

Bewirtschaftung des Speicherraumes im geologischen Untergrund

Im Zuge der politischen Wende wurden die thüringischen Kaliwerke Merkers und Dorndorf stillgelegt und das Kaliwerk Unterbreizbach, die alle dem früheren DDR-Kombinat KALI zugehörig waren, schrittweise in das Verbundwerk Werra der heutigen K+S integriert. Unmittelbar nach der politischen Wende begannen aber auch Verhandlungen über eine Reduzierung der Salzbelastung von Werra und Weser durch Einsetzung einer Expertenkommission aus Vertretern der KALI UND SALZ AG und der aus dem ehemaligen DDR-Kombinat KALI hervorgegangenen MITTELDEUTSCHEN KALI AG. Im Ergebnis der Tätigkeit dieser Expertenkommission wurde ein Konzept technischer Maßnahmen zur Werraentsalzung erstellt und durch ein Verwaltungsabkommen vom 30. März 1992 zwischen den Werra- und Weser-Anrainer-Bundesländern vereinbart.

Als wesentlichste Schwerpunkte eines vielerlei Maßnahmen umfassenden Paketes waren der Ersatz der abwasserintensiven Kieserit-Wäsche im Kaliwerk Unterbreizbach durch eine nassmechanische Aufbereitung von vorkonzentrierten Kieserit-Fraktionen aus dem Löseprozess und die untertägige Beseitigung der dabei anfallenden festen Rückstände mit Hilfe des Spülversatzverfahrens vereinbart worden. Darüber hinaus wurde probeweise die Versenkung von flüssigen Aufbereitungsrückständen auch im thüringischen Teil des Werra-Kalireviers, in dem bereits in den 1980er Jahren durch das damalige DDR-Kombinat KALI erkundeten Pufferspeicher der Gerstunger Mulde wieder aufgenommen. Die letztgenannte Maßnahme zielte explizit auf die durch mögliche Ein- und Ausspeicherung orientierte Bewirtschaftung dieses Versenkraumes, so dass gemeinsam mit einem computergestützten Verfahren zur Salzlaststeuerung eine Reduzierung und die Vergleichmäßigung der Salzfrachten in den für die Beseitigung der flüssigen Rückstände genutzten Fließgewässern infolge der Pufferspeicherung möglich wird. Vor der Realisierung dieser Investitionen lag das Aufkommen flüssiger Aufbereitungsrückstände pro verarbeitete Tonne festes Rohsalz im Kaliwerk Unterbreizbach noch bei etwa 2,3 Kubikmeter, seit dem Jahr 2002 bei weniger als 0,75 Kubikmeter. Seit Wirksamwerden dieser technischen Maßnahmen, das heißt seit mehr als einem Jahrzehnt, verbessert sich damit auch der ökologische Zustand des Flusssystems Ulster-Werra-Weser erheblich, obgleich der Beseitigungspfad für flüssige Rückstände über diese Fließgewässer bis heute genutzt wird (ECORING 2008, /229/). Durch die Summe dieser Maßnahmen hat sich das Verhältnis von flüssigen zu festen Aufbereitungsrückständen signifikant zu den letztgenannten hin verschoben, so dass heute weitaus größere Kapazitäten für entsprechende Rückstandshalden erforderlich wurden, das Flusssystem Ulster-Werra-Weser jedoch entlastet wurde.

Während in der Frühzeit der Kaliindustrie im Durchschnitt etwa 65 Prozent des im Rohstoff verfügbaren KCl in die Fertigprodukte gelangte, waren es zwischen den Weltkriegen bereits über 75 Prozent und sind es heute mehr als 87 Prozent.

Eine ebenfalls seit den Anfangsjahren auf der Tagesordnung stehende Aufgabe zur Rationalisierung zielte auf die Verminderung des Primärenergieeinsatzes (Serowy 1952, /922/; Autenrieth 1958, /34/; Hoffmann 1972, /404/; Heinz & von der Osten 1982, /381/; Garrett 1996, /315/; Lamster 2003, /580/; Schmidt & Hirsch 2012, /889/). Insbesondere bei den in Deutschland bis in die 1950er Jahre ausschließlich eingesetzten Löseverfahren stellten die Energiekosten einen, mitunter den wesentlichsten Anteil der sachbezogenen Betriebskosten dar. Diese Rationalisierungsaufgabe löste man vor allem durch die Verminderung des Einsatzes von Wasser als Lösemittel, in dem man die gesamte Wassersalzlösungsbilanz durch mehrfache Rückführung einzelner Stoffströme bis zu einer technisch praktikablen und nahezu vollständigen Ausnutzung der temperaturabhängigen Lösespanne optimierte.

Letztlich war auch die bahnbrechende Entwicklung der völlig trockenen elektrostatischen Aufbereitung im ESTA®-Verfahren[57] durch die damalige KALI UND SALZ AG in den 1960er und 1970er Jahren dieser Zielstellung verpflichtet. Obgleich hier auch wirtschaftliche Motive, insbesondere hinsichtlich der Energieeinsparung und für die Erzeugung von Spezialdüngemitteln, Triebkräfte dieser nahezu 2 Jahrzehnte währenden Forschungs- und Entwicklungsarbeit waren, lieferten nahezu alle technischen Verbesserungen auf diesen Feldern gleichsam auch erhebliche Beiträge zum Umweltschutz, sei es durch die Reduzierung von Aufbereitungsrückständen oder die drastische Verminderung des Wasserverbrauches, zielten also durchaus auch auf eine verbesserte ökologische Effizienz der deutschen Kalidüngemittelproduktion. Die unvermeidbar bei jeder Art der Kalidüngemittelproduktion aus natürlichen Rohstoffen anfallenden festen und flüssigen Aufbereitungsrückstände und die mit dem jeweiligen Stand der Technik auch über die Zeit weiterentwickelten Methoden, Verfahren und Anlagen standen seit der Frühzeit der Kaliindustrie im Interesse der Öffentlichen Diskussion und nicht zuletzt deshalb auch im besonderen Fokus der staatlichen Aufsichtsbehörden, worauf in diesem Buch allenthalben Bezug genommen werden soll. Besonders durch die Beseitigung von festen und flüssigen Rückständen hat die Kaliindustrie in verschiedenen Regionen weltweit einen prägenden Beitrag zur Entwicklung der Kulturlandschaft geleistet und als Folge der von ihr betriebenen Wertschöpfung den Naturraum nachhaltig verändert. Im Mutterland der Kaliindustrie, besonders in Mittel- und Norddeutschland, ist dieser Impakt über anderthalb Jahrhunderte dokumentiert und zeigt in seiner zeitlichen Entwicklung nicht zuletzt auch die Auswirkungen dominierender Wirtschaftsinteressen gegenüber dem Umweltschutz bis hin zur harmonischen Balance zwischen den 3 Säulen der Nachhaltigkeit, also den ökologischen, den sozialen und den ökonomischen Interessen der modernen Industriegesellschaft. Diese letztlich positive Wandlung lässt sich zum Beispiel an den gravierenden Veränderungen im Flusssystem Ulster-Werra-Weser für die vergangenen 110 Jahre zeigen, in denen es von einem natürlichen zu einem – vor allem durch die ehemalige DDR-Kaliindustrie – stark belasteten Fließgewässer in den 1970er bis 1990er Jahren (Aurada 1992, /30/; 1997, /31/; Aurada & Rödel 2005, /32/) und seit gut einem Jahrzehnt nunmehr wieder zu einem renaturierten Flusssystem entwickelt wurde (ECORING 2008, /229/; 2010, /230/) (▸ Box 2.1).

57 ESTA®: Patentiertes Verfahren zur elektrostatischen Aufbereitung polymineralischer Kalisalze. Diese für den gesamten Industriezweig wesentliche Neuerung zur Rohsalzaufbereitung wurde im Zeitraum 1965 bis 1974 im Kaliwerk Neuhof-Ellers der damaligen KALI UND SALZ AG zur industriellen Reife entwickelt: die elektrostatische Aufbereitung (ESTA®) von Kalirohsalzen wurde hier 1974 im industriellen Maßstab zur Abtrennung des Kieserit von Sylvin und Halit eingeführt und ist durch verschiedene Patente rechtlich geschützt. Dieses wasserfreie und daher energetisch effiziente Aufbereitungsverfahren ermöglichte eine ökonomisch vertretbare industrielle Nutzung der Kieserit-Komponente in den Hartsalzen, die früher mangels geeigneter Aufbereitungsverfahren mit dem Rückstand aufgehaldet wurde. Gleichfalls führte die Anwendung dieses im Gegensatz zu Flotation und Heißverlösung trockenen Aufbereitungsverfahren zur drastischen Verminderung der flüssigen Rückstände und lieferte somit einen erheblichen Beitrag zum Umweltschutz.

3 KALIVERBRAUCH UND KALIPRODUKTION HEUTE

Die Kaliindustrie beschäftigt heute weltweit ungefähr 65.000 Arbeitnehmer, die gemeinsam in den vergangenen Jahren durchschnittlich einen jährlichen Umsatz von etwa 18 Milliarden Euro erwirtschafteten. Alle Kalidüngemittelproduzenten gemeinsam hatten mit einer weltweit summierten Ertragssteuerlast von jährlich mehr als 2,5 Milliarden Euro sowie den zusätzlichen Zahlungen von Grund-, Gewerbe- und Lohnsteuern in einer deutlich höheren Größenordnung einen wichtigen Beitrag für die regionalen und nationalen Staatshaushalte ihrer Herkunfts-, respektive Produktionsländer geleistet. Insofern besitzt die Kaliindustrie einen hohen makroökonomischen Stellenwert, der von Land zu Land jedoch erhebliche Unterschiede aufweist.

Aktuelle Studien belegen zum Beispiel für 2 Standorte der K+S in Deutschland, das Werk Werra, Hessen und Thüringen (GMA & BHP–BRUGGER 2013, /336/) und das Werk Zielitz, Sachsen-Anhalt) GMA & BHP–BRUGGER 2014, /337/) neben den volkswirtschaftlichen auch sehr positive sozio- und regionalökonomische Impakte der Kalidüngemittelproduktion: Mit den 4.400 Beschäftigten des Werkes Werra ist K+S der größte und wichtigste regionale Arbeitgeber und sichert in der regionalen Zuliefererindustrie in Hessen und Thüringen weitere 2.500 bis 3.000 Arbeitsplätze. Insgesamt stehen 3.300 regionale mittelständische Betriebe als Lieferanten unter Vertrag und erhielten allein im Jahr 2012 Aufträge für 195 Millionen Euro. Das an diesem Standort mit der Kalidüngemittelproduktion erwirtschaftete Steueraufkommen von rund 80 Millionen Euro kommt zum überwiegenden Anteil den Standortgemeinden und der Region zu Gute. Die gesamte Wertschöpfung in Form von Löhnen, Steuern und Einkaufsleistungen des Werkes summiert sich jährlich auf mehr als 420 Millionen Euro. Insgesamt rund 16.000 Bürger verdanken ihre Existenzgrundlage vollständig oder überwiegend dem Kalibergbau im Werra-Kalirevier (GMA & BHP–BRUGGER 2013, /336/).

Mit rund 1.800 Beschäftigten gehört das Werk Zielitz zu den bedeutendsten Arbeitgebern im Bundesland Sachsen-Anhalt. Auch hier partizipieren Standortgemeinden und die Region von der Kalidüngemittelproduktion. Im Jahr 2013 betrugen die Lieferantenumsätze des Werkes Zielitz rund 115 Millionen Euro. Allein durch die aktuell geplanten Investitionsvorhaben des Werkes sollen mehr als 1.200 weitere Beschäftigungsverhältnisse in der Region geschaffen werden (GMA & BHP–BRUGGER 2014, /337/).

Mit diesen von unabhängigen Wissenschaftlern erstellten Studien lässt sich anhand aktueller sozioökonomischer Zahlen für den Wirtschaftsstandort Deutschland exemplarisch belegen, wie an beiden Standorten die von der Kalidüngemittelproduktion ausgehende Wertschöpfung auch Beschäftigung sichert und Lebensqualität in den Regionen schafft. Solch signifikante und stets wertvolle Beiträge der Kalidüngemittelproduktion für die Volkswirtschaften lassen sich auch für andere kaliproduzierende Staaten nachweisen, wie zum Beispiel für Kanada (Pepper & Strathdee 1986, /746/; Kulshreshtha 1988, /570/; Childers 1990, /155/;

H. Rauche, *Die Kaliindustrie im 21. Jahrhundert,*
DOI 10.1007/978-3-662-46834-0_3, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

TCBC 2010, /1003/; PSK 2014, /788/) oder auch die Russische Föderation (NMRP 2012, /717/; LRP 2007, /606/) sowie die Republik Belarus (Kirienko 2011, /522/) und Israel (Pindyck 2014, /762/). Für alle der 71 Standorte der Kaliindustrie weltweit gilt dies heute in ähnlicher Weise, wenngleich auch national und regional verschiedene ökonomische Komponenten und Randbedingungen auf ihre Stellung als bedeutender Wirtschaftsfaktor einwirken. Wie wesentlich die Beiträge der Kaliindustrie für die wirtschaftliche und soziale Entwicklung ganzer Regionen waren, wird nicht zuletzt dann in seiner gesamten Bedeutung sichtbar, wenn es – aus welchen wirtschaftlichen oder gesamtpolitischen Gründen auch immer – zur Einstellung der Produktion gekommen ist.

Welche enormen Anstrengungen der dann erforderliche Strukturwandel von den betroffenen Regionen und darüber hinaus von den Ländern und Staaten abverlangt, zeigen die Beispiele der vergangenen 3 Jahrzehnte, wo es in der Karpaten-Vorsenke in der Ukraine (Kulyniak 2002, /571/; Bukowski & Czapowski 2009, /132/), am Oberrhein im Elsass in Frankreich (MDPA 2004a, /631/; 2004b, /632/, 2004d, /634/) sowie auch im Südharz- und im Unstrut-Kalirevier in Deutschland (Hartwig, Scholz & Tschernatsch 2001, /374/; Rauche Thoma & Hartmann 2001, /814/; Bartl 2003c, /65/; Schmidt 2003, /888/; Slotta 2003, /952/, Kuyumcu 2012, /574/, Natau 2012, /701/; Kröger-Herke, Rauche & Azimi, 2012, /562/) nach fast oder mehr als 100jähriger Betriebsdauer zur Stilllegung der Kalidüngemittelproduktion gekommen ist.

In den folgenden Kapiteln werden zunächst die Motivation für den Kalidüngemittelverbrauch und die Triebkräfte für die Kalidüngemittelnachfrage (▸ Abschnitt 3.1) diskutiert, Kalidüngemittelproduzenten und deren Vertriebsstrukturen vorgestellt (▸ Abschnitt 3.2) und abschließend die Anforderungen an die Kaliprodukte und ihre handelsüblichen Spezifikationen betrachtet (▸ Abschnitt 3.3).

3.1 Notwendigkeit der Kalidüngemittelproduktion sowie Triebkräfte für den Kalimarkt und Entwicklungstrends

Die Bereitstellung von Kalidüngemitteln ist von essentieller Bedeutung für die Ernährung der rasant anwachsenden Weltbevölkerung. Die wesentlichen Triebkräfte der steigenden Nachfrage nach Düngemitteln insgesamt, besonders aber auch nach Kalidüngemitteln sind

- der gestiegene Bedarf an Lebensmitteln aufgrund der wachsenden Weltbevölkerung;
- das veränderte Essverhalten, vor allem der gestiegene Fleischkonsum einer ständig anwachsenden Mittelschicht in Entwicklungsländern

sowie

- ein erhöhter Verbrauch von Biokraftstoffen, besonders in den Industrieländern.

Vom Beginn bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts, also in weniger als 50 Jahren, wird die Weltbevölkerung um 50 Prozent wachsen; von etwa 6 Milliarden Menschen Ende 1999 auf nahezu 9 Milliarden Menschen im Jahre 2050 (▸ Abbildung 4). Nie zuvor in der Menschheitsgeschichte hat das Bevölkerungswachstum so rasant zugenommen wie seit dem 2. Weltkrieg. Noch im Jahre 1950 lag die Weltbevölkerung bei etwa 2,5 Milliarden. Zu Beginn des 3. Jahrtausends gab es 6 Milliarden Menschen, wobei die höchsten Geburtenzahlen in Entwicklungsländern zu verzeichnen waren. Die Weltbevölkerung wird weiter rasant anwachsen, so dass im Jahr 2050 Afrika 20 Prozent und Asien 60 Prozent der Menschheit beherbergen werden.

Ende des 20. Jahrhunderts wurden lediglich 3 Prozent der Erdoberfläche als Ackerland genutzt. Trotz der Tatsache, dass dieser Flächenanteil aufgrund seiner traditionellen Nähe zu den Siedlungsgebieten zunehmend der Urbanisierung zum Opfer fällt, steigt die Gesamtanbaufläche jedoch zurzeit aufgrund von Abholzung noch an. Der Bedarf an Ackerland wird auch weiterhin mit der Bevölkerung wachsen, was zunehmend eine Rodung auf Grenzertragsböden nach sich zieht. Neben den dramatischen Auswirkungen auf die CO_2-Bilanz ist die Nutzung derartiger Rodungsflächen vielfach verantwortlich für die Erosion von fruchtbaren Bodenschichten, dadurch vermehrt auftretende Dürren, sowie den Verlust essentieller Bodennährstoffe und die Versalzung der Böden.

Der Trend einer Reduzierung der statistisch pro Kopf zur Verfügung stehenden landwirtschaftlichen Nutzfläche (▸ Abbildung 4) wird zusätzlich durch die veränderten Essgewohnheiten einer besonders in den Schwellenländern rasant anwachsenden Mittelschicht verstärkt. Eine Folge der Einkommenserhöhung in diesen mittleren gesellschaftlichen Schichten während der letzten 20 Jahre ist ein starker Anstieg des Fleischkonsums. Für die Produktion von einem Kilogramm Fleisch werden bis zu 7 Kilogramm Pflanzenfutter benötigt. Der vermehrte Fleischkonsum verstärkt somit zusätzlich den erhöhten Bedarf an landwirtschaftlicher Pflanzenproduktion.

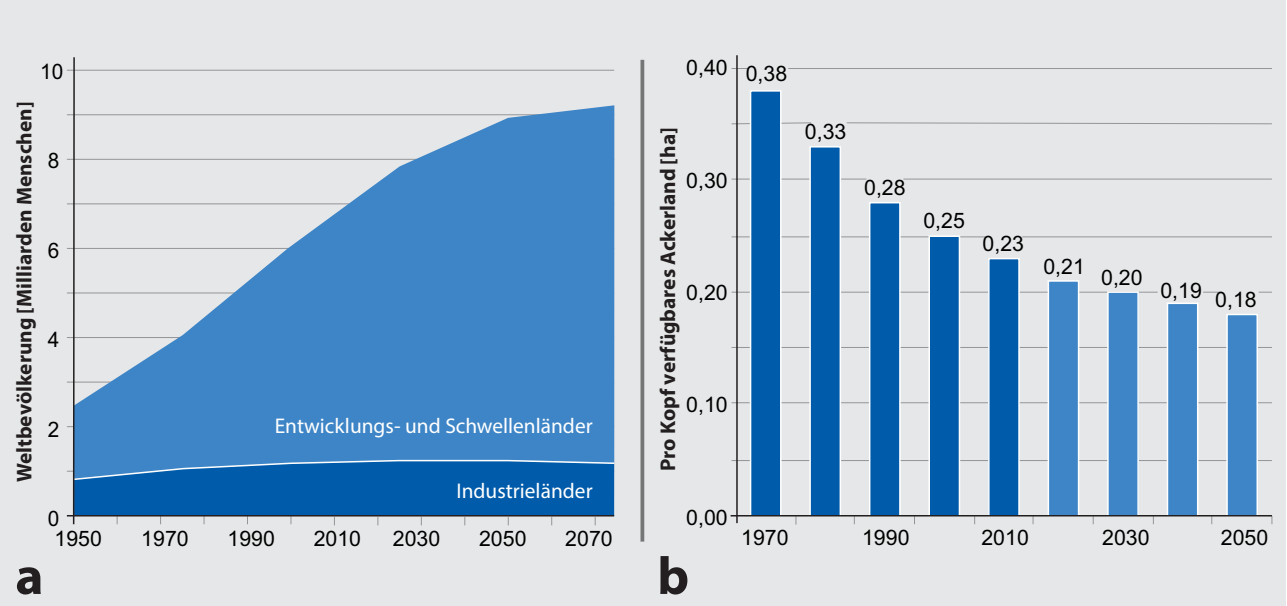


Abbildung 4 Wichtige Triebkräfte für den wachsenden Bedarf an Düngemitteln zur Nahrungsgüterversorgung einer rasch anwachsenden Weltbevölkerung: a – Historisches Wachstum der Weltbevölkerung seit 1950 und Vorhersage bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts; b – Entwicklung von weltweit verfügbarem Ackerland pro Kopf [nach PRB 2012, /774/]

Eine dritte Triebkraft für die verstärkte Düngemittelnachfrage ist die ebenfalls seit etwa 2 Jahrzehnten stetig anwachsende Biokraftstoffproduktion, die besonders durch die Industrieländer betrieben wird.

Die Auswirkungen dieser Entwicklung waren nicht zuletzt drastische Anstiege der Nahrungsgüterpreise, was in der Öffentlichkeit breit diskutiert wurde. Ausgehend von diesen globalen Trends erwarten seriöse Marktprognosen bis zum Jahr 2020 und darüber hinaus eine weltweit steigende Nachfrage[58] an Kalidüngemitteln. Abbildung 5 zeigt den Verlauf des weltweiten Verbrauchs von Kalidüngemitteln der letzten Jahre einschließlich einer Vorhersage bis zum Jahre 2025 in Tausend Tonnen K_2O pro Jahr.

Bis zum Frühsommer 2012 wurde in nahezu allen Prognosen mittelfristig von einer jährlichen Wachstumsrate der Kalidüngemittelnachfrage von mehr als 5 Prozent für die kommenden Jahre ausgegangen, die sich ab 2015 auf etwa 3 Prozent verringern sollte. Für das Ende des Prognosezeitraums 2020 wurde eine Nachfrage von 70 Millionen Tonnen KCl_{equ}[59], erwartet (▸ Abbildung 6).

Ausgehend von der Entwicklung seit 2009 wurden diese früheren Prognosen zum Wachstum der Nachfrage bereits ab Mai 2012 nach unten korrigiert, gehen nunmehr mittelfristig und über alle regionalen Märkte gemittelt von einem jährlichen Zuwachs unter 2 Prozent aus. Zur Verdeutlichung zeigt Abbildung 6 die prognostizierten Importe für das Jahr 2020, aufgeschlüsselt nach Regionen. Die wichtigsten Märkte werden auch noch danach Asien, hier insbesondere Indien und China, Lateinamerika, besonders Brasilien, Nordamerika und Europa sein.

Nach mehr als einem Jahrzehnt der Überkapazitäten und der Niedrigpreisverkäufe, vor allem aufgrund des Zusammenbruchs der ehemaligen Sowjetunion in den späten 1980er Jahren, hat sich der Kalidüngemittelmarkt seit etwa 1998 sukzessive erholt (Tang, Liu & Gu 1998, /999/; Beinhorn 2003, /86/; FAO 2008, /266/; Baumgertner & Belyakov 2012, /78/; Evans 2012, /261/; Middleton 2012, /653/; Schernewski & Anders 2014, /878/; Steiner 2014, /977/).

58 Soweit in den folgenden Abschnitten im Besonderen nicht anders bezeichnet, werden die Kaliproduktion und der Kaliverbrauch als Summe aller Kalium-haltigen Produkte widergegeben, also auch einschließlich der Produkte, die geringere Nährstoffgehalte als Standardprodukte aufweisen.

59 KCl_{equ}: Kurzbezeichnung für KCl-Äquivalent, einem Maß für den Kalium-Nährstoffgehalt in einem Kaliprodukt, das der Vergleichbarkeit von Produktionsmengen unabhängig von der Art des Kalidüngemittels dient.

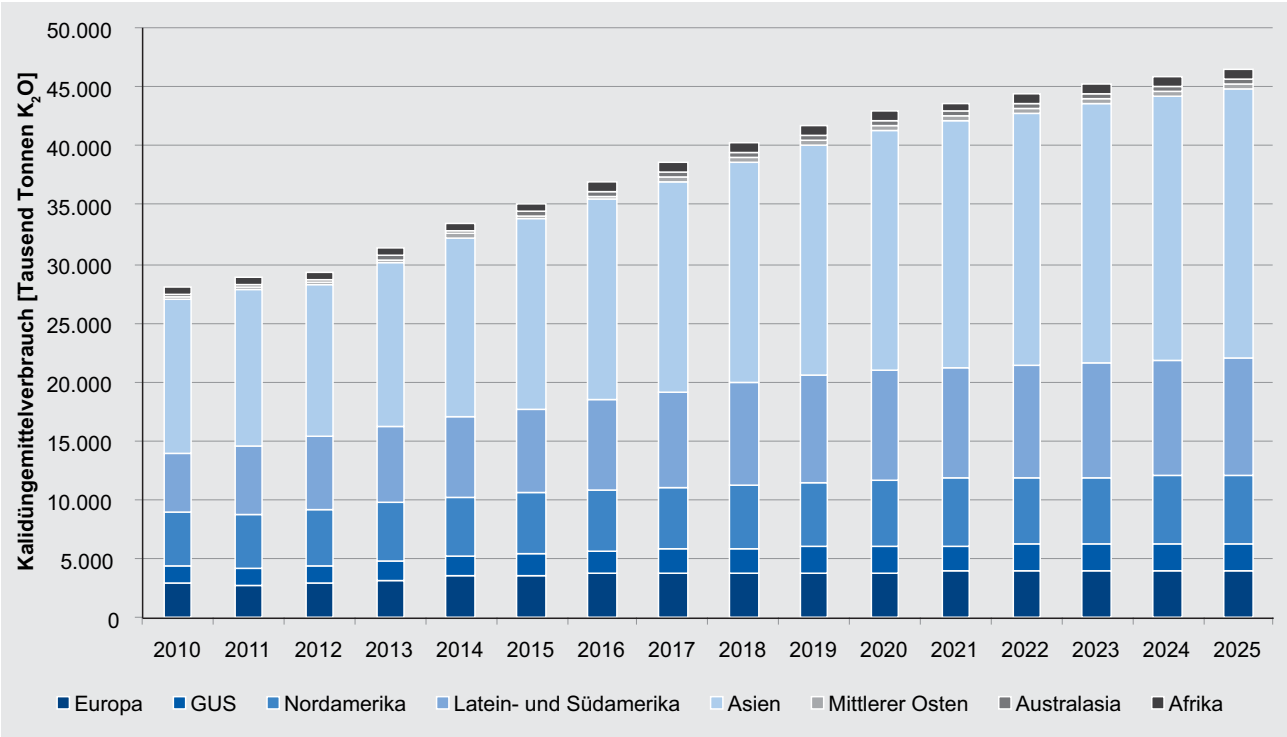


Abbildung 5 Weltweiter Verbrauch an Kalidüngemitteln seit 2010 und voraussichtliche Weiterentwicklung bis 2025[60]

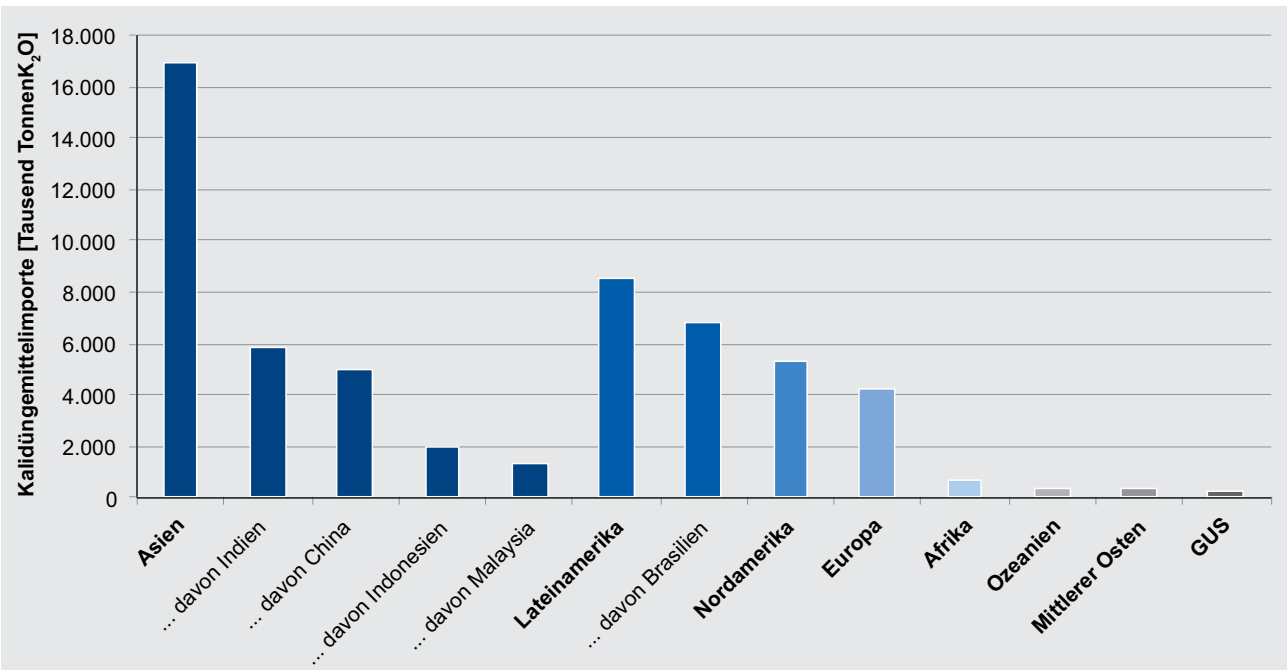


Abbildung 6 Prognose der Kalidüngemittelimporte in die verschiedenen Marktregionen für das Jahr 2020[60]

60 Dargestellt ist der aus öffentlich zugänglichen Quellen und Branchen-Informationssystemen sowie internen Informationen der ERCOSPLAN-Unternehmensgruppe (ERCOSPLAN 2015, /255/) abgeschätzte Gesamtbedarf an Kalium-Nährstoff in K_2O.

Die weltweite Nachfrage nach Kalidüngemitteln erreichte 2007 einen vorläufigen Höhepunkt von etwa 58 Millionen Tonnen KCl_{equ}, fiel in den Jahren 2008 und 2009 zunächst wieder stark ab. Dieser Nachfragerückgang wurde hauptsächlich durch einen Kaufstopp in den großen Importländern, aufgrund der ab 2006 rasant steigenden Kalipreise, verursacht und führte zum Aufbrauchen nahezu aller Lagerbestände in den Hauptverbraucherländern. Diese Entwicklung wurde durch eine Weltfinanzkrise überlagert, die ebenfalls zur Minderung des Handelsvolumens an Kaliprodukten beitrug. Schon im Jahr 2011 wurden bereits wieder mehr Kaliprodukte als im Vorkrisenjahr 2007[61] nachgefragt, allerdings zu deutlich niedrigeren Preisen. Die erneut starken Zuwächse seit 2009 wurden hauptsächlich durch die erheblich ansteigende Nachfrage in Asien, hier vor allem Indien, China und Südostasien, sowie in Südamerika, hier besonders Brasilien verursacht. Im Jahr 2013 wurden weltweit knapp 59 Millionen Tonnen KCl_{equ} verkauft und geliefert. Für das Folgejahr 2014 liegen noch keine verlässlichen Zahlen vor. Es ist jedoch zu erwarten, dass mehr als 60 Millionen Tonnen KCl_{equ} nachgefragt worden sind.

Im Januar 2015 lagen die erzielbaren Preise für kurzfristige Verkäufe (sogenannter *spot market*) für eine metrische Tonne MOP[62] *standard* in Vancouver, British Columbia, Kanada bei 285 bis 325 US-Dollar fob[63] und für MOP *granular* in Nordwest Europa bei 292 bis 302 Euro cif[64] (rund 339 bis 350 US-Dollar), wobei letztere aufgrund der Lieferbedingungen jedoch einen höheren Anteil an Transportkosten sowie die üblicherweise vom Versender zu tragende Versicherung beinhalten. Für langfristige Lieferverträge mit Lieferdaten für das erste und zweite Quartal 2015 wurden zum Beispiel für MOP nach Südostasien Preise von 330 US-Dollar pro Tonne cfr[65] ausgehandelt. Der Preisdruck am Kalimarkt ist zwar nicht mehr so immens wie noch vor 2 Jahren, hält aber dennoch weiter an. Abbildung 7 verdeutlicht die Preisentwicklung der chloridischen und sulfatischen Kalidüngemittelprodukte der letzten Jahre.

In jüngster Vergangenheit wurde der Wettbewerb insbesondere durch den Zerfall der Vertriebsgesellschaft BELARUSIAN POTASH COMPANY (BPC) im Juli 2013 (WELT ONLINE 2013, /1110/) und die darauf folgenden Ereignisse in der Republik Belarus und in Russland verstärkt, so dass auch seriöse Medien vom "Kalikrieg" zwischen diesen beiden Ländern sprachen (▸ Box 3.1).

Im Ergebnis dieser Entwicklungen muss wohl zumindest für die kommenden Monate von einem weiterhin niedrigen bis moderaten Preisniveau für Kalidüngemittel ausgegangen werden. Analysten schätzen derzeit, dass sich das Preisniveau bis Jahreswechsel 2015/16 auf durchschnittlich 345 US-Dollar pro Tonne MOP *standard* fob Vancouver einpegeln wird und so auch weiterhin bis Ende 2016 lediglich linear einem allgemeinen Preisgleitungsindex auf dann vielleicht 370 US-Dollar folgt. Inwieweit mittel- und langfristig signifikant höhere oder sogar die relativ hohen Preise von 2007 bis 2009 wieder erreicht werden können, bleibt schwer abzuschätzen und soll hier auch nicht zum Gegenstand von Spekulationen werden.

Was die stabile Produktion der etablierten Produzenten angeht, ist der Markt zurzeit auch dadurch besorgt, dass das Bergwerk Solikamsk 2 von URALKALI im November 2014 von einem starken Zufluss von Grundwasser betroffen war und es aufgrund dieser Havarie zur Produktionsminderung bei dem weltgrößten Produzenten gekommen ist (URALKALI 2014, /1051/). Hinzu kommt in jüngster Zeit ein förmliches Angebot des kanadischen Produzenten PCS zur Übernahme aller Aktien der K+S Gruppe (K+S 2015c, /492/), was im Falle der tatsächlichen Umsetzung zu einer in der Geschichte der Kaliindustrie wohl einmaligen Marktkonsolidierung führen würde.

Zurzeit produzieren weniger als 10 Unternehmen 90 Prozent der weltweiten Kaliproduktionsmenge in weniger als 60 Produktionseinheiten, die bis auf eine Ausnahme alle auf der Nordhalbkugel der Erde gelegen sind. Diese räumliche Verteilung hat die fehlende Parität zwischen Produktion und Nachfrage in den Regionen zur Folge, woraus sehr lange Transportwege zwischen den Lieferanten und den Verbrauchern resultieren.

61 Das Kalenderjahr 2008 war im zweiten Halbjahr bereits von geringeren Handelsvolumina gekennzeichnet, weshalb hier auf das letzte nicht von Hochpreisentwicklung und Finanzkrise berührte Kalenderjahr 2007 Bezug genommen wird.

62 MOP – *Muriate of Potash* – ist die internationale Bezeichnung für klassische KCl-Düngemittelprodukte, deren Herstellung sowohl auf der Grundlage chloridischer als auch sulfatischer Kalilagerstätten möglich ist. Im deutschen Sprachgebrauch wird MOP aufgrund seines K_2O-Gehaltes von 60 m% auch als K60 oder wegen dem Mindestanteil von 95 m% KCl auch als KCl95 bezeichnet.

63 Incoterm fob = *free on board* (frei an Bord) gibt an, dass der Versender die Transport- und Verladekosten bis auf das Schiff im vereinbarten Verladehafen trägt.

64 Incoterm cif = *cost insurance freight* (Kosten, Versicherung, Fracht) gibt an, dass der Versender die Transport-, Verlade- und Versicherungskosten bis zum Bestimmungshafen trägt.

65 Incoterm cfr = *cost and freight* (Kosten und Fracht) gibt an, dass der Versender die Transport- und Verladekosten bis zum Bestimmungshafen trägt.

BOX 3.1

Der "*Kalikrieg*" zwischen der Republik Belarus und der Russischen Föderation

Absatzflaute belastet Vertriebspartnerschaft

Nach Monaten interner Auseinandersetzungen zwischen URALKALI und BELARUSKALI in den Verwaltungsgremien des gemeinsamen Vertriebsorgans BELARUSIAN POTASH COMPANY (BPC) kam es im Sommer 2013 zum offenen Bruch zwischen beiden und damit auch zur Aufkündigung des gemeinsamen Exportgeschäftes. Während URALKALI – ähnlich wie auch nordamerikanische, europäische und Produzenten im Mittleren Osten – auf die niedrigen Kalidüngemittelpreise zunächst durch die Drosselung der Produktion reagierte und durch die damit verbundene Verknappung eine Preisstabilisierung herbeizuführen versuchte, bediente das staatlich gelenkte Unternehmen BELARUSKALI weiterhin die mit Niedrigpreisen notierten Exportmärkte. Eigens dazu wurde kurz vor Jahresende 2012 die Exklusivitätsvereinbarung für den Kaliexport mit BPC per Dekret des Präsidenten der Republik Belarus[66] aufgehoben. Als sich auch Mitte des Folgejahres keine signifikante Verbesserung der Erlössituation abzeichnete und BELARUSKALI auch weiterhin am eigenständigen Vertrieb festhielt, verkündete der Generaldirektor von URALKALI, Wladislaw A. Baumgertner im Juli 2013 eine Abkehr von der bisherigen Verkaufsstrategie *price over tonnage* hin zu *tonnage over price*, also zur Vermarktung höherer Fertigproduktmengen zu den vom Markt diktierten Niedrigpreisen und ebenfalls den künftig autonomen Vertrieb über das Tochterunternehmen URALKALI TRADING[67].

66 22.12.2012: Erlass des belarussischen Präsidenten (Decree No. 566) und Aufhebung der Exklusivitätsvereinbarung zwischen BELARUSKALI und der Vertriebsorganisation BPC. BELARUSKALI ist es fortan erlaubt, seine Produkte auch über andere, vom belarussischen Präsidenten zu benennende Vertriebsorganisationen zu verkaufen.

67 29.07.2013: Ankündigung des russischen Produzenten URALKALI, dass er künftig seine Produkte nicht mehr über die Vertriebsorganisation BPC verkaufen wolle (URALKALI 2013b, /1049/). URALKALI will Exporte fortan über sein Tochterunternehmen URALKALI TRADING abwickeln.
30.07.2013: Pressemitteilung von URALKALI mit dem Inhalt, dass bereits eine Vertragsoption über eine Lieferung von 500.000 t MOP an einen chinesischen Abnehmer für 300 USD/t für die Lieferung noch in 2013 unterzeichnet worden sei (URALKALI 2013c, /1050/). Kurseinbrüche bei den etablierten Kaliproduzenten mit Verlusten von 5 bis 24 % innerhalb eines Tages (BLOOMBERG 2013, /106/)

Enorme Bilanzverluste an den Kapitalmärkten

Da alle großen Kalidüngemittelproduzenten börsennotierte Unternehmen sind, reagierten die Finanzmärkte weltweit umgehend auf diese Nachricht, so dass es in weniger als einem Tag zu dramatischen Kurseinbrüchen kam. Die im DAX[68] notierte K+S AG verlor an diesem Tag mehr als ein Fünftel ihres Börsenwerts, was rund 1,5 Milliarden Euro entsprach (FP 2013, /282/; WIWO 2013a, /1124/; 2013b, /1125/). Weltweit addierten sich die spontanen Verluste der Kalidüngemittelproduzenten und -vertriebsgesellschaften auf über 20 Milliarden US-Dollar.

Diese heftige Reaktion der Finanzmärkte erklärt sich aus der dominanten Stellung von BPC am Kalimarkt: Vor diesem spontanen Zerfall war BPC seit der Fusion von URALKALI und SILVINIT im Jahre 2011 mit einem Marktanteil von über 40 Prozent der weltweit größte Kalidüngemittelexporteur.

BELARUSKALI wies am 19. August 2013 die Anschuldigungen von Baumgertner zurück und bezeichnet private Interessen von Aktionären und persönliche Ambitionen von Führungskräften des ehemaligen Partners URALKALI als Triebkräfte für den Bruch der Partnerschaft (BELARUSKALI 2013, /87/). Am 26. August 2013 wurde Baumgertner vom weißrussischen Ministerpräsidenten nach Minsk eingeladen. Nach dem Treffen wurde er bei seiner Ausreise am Flughafen in Minsk festgenommen. Ihm wurden Amtsmissbrauch in seiner Funktion als *Chairman* von BPC und persönliche Bereicherung vorgeworfen. Laut weißrussischen Medien wurden auch weitere Vorstandsmitglieder sowie ein Großaktionär der URALKALI durch Interpol per Haftbefehl gesucht (HANDELSBLATT 2013, /367/; REUTERS 2013a, /830/), was auch diplomatische Aktivitäten nach sich zog (REUTERS 2013b, /831/).

Großer wirtschaftlicher Schaden für die Republik Belarus

Der Republik Belarus wurde durch URALKALIs Entscheidung nach eigenen Angaben ein Schaden in Höhe von 100 Millionen US-Dollar zugefügt (BELTA 2013a, /89/; 2013b, /90/; BD 2013, /80/). Ende August spitzte sich der Konflikt weiter zu. Russland drosselte Öllieferungen nach Belarus und verbot die Einfuhr von Schweinen und Schweinefleischprodukten aus dem Nachbarland. Ein Importstopp für weißrussische Milchprodukte wurde ebenfalls erwogen (FAZ 2013, /267/). Der russische Oligarch und damals größte Einzelaktionär von URALKALI, Suleiman Kerimow, wurde auf Antrag der weißrussischen Behörden per internationalem Haftbefehl gesucht; Interpol dementierte dies am 11. September 2013 jedoch (RIANOVOSTI 2013, /838/).

68 DAX – Abkürzung für Deutscher Aktienindex, dem wichtigsten deutschen Börsenindex. Er spiegelt die Entwicklung der 30 größten und umsatzstärksten Unternehmen wider, die in dem Teilbereich des Regulierten Marktes (sogenannte *Prime Standard*) mit den höchsten Transparenzstandards an der Frankfurter Wertpapierbörse gelistet sind.

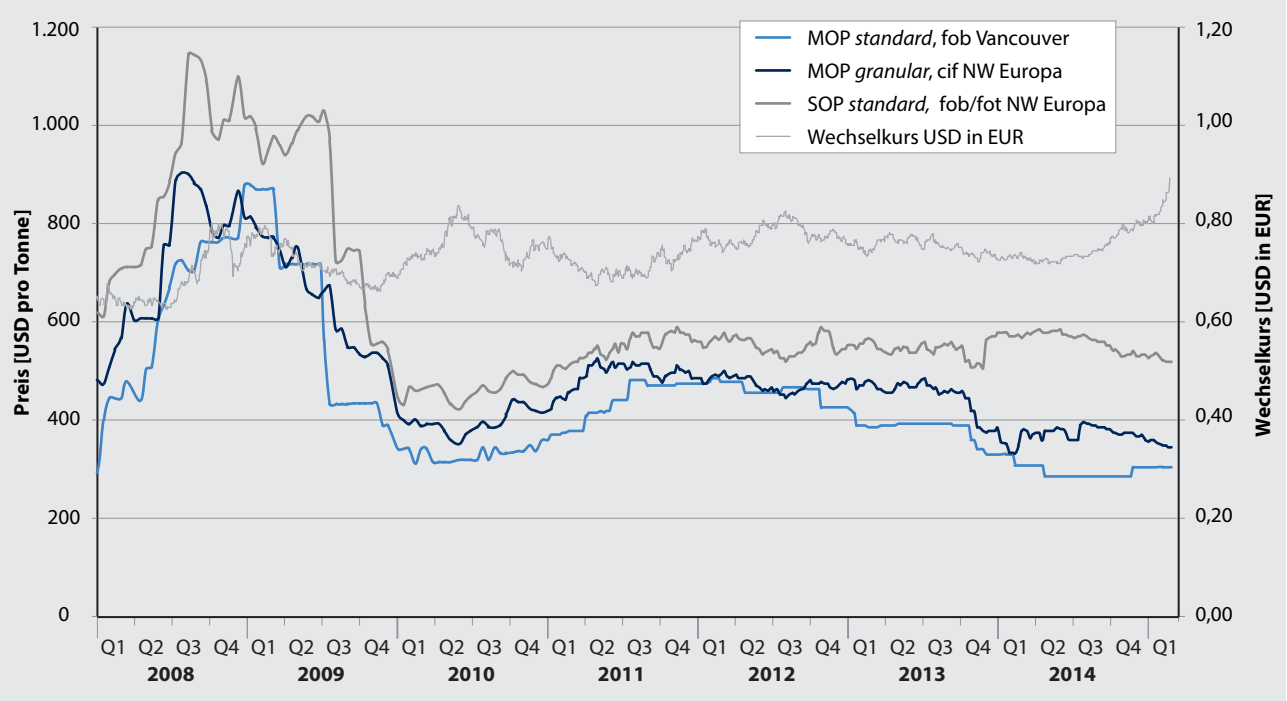


Abbildung 7 Preisentwicklung von chloridischen (MOP) und sulfatischen (SOP[69]) Kalidüngemitteln zwischen 2008 und 2014[70]

Die weltweit steigende Nachfrage und die damit verbundenen Preissteigerungen, aber auch die für den größten Teil der Exportware langen Transportdistanzen sind wichtige Gründe für den weltweiten Boom der Kalisalzexploration der letzten Jahre, der erstmals seit den 1970er Jahren nicht nur zur Erweiterung bestehender Produktionseinheiten (*brownfield* Projekte), sondern nunmehr auch zur Erkundung neuer Lagerstätten und zur Entwicklung von *greenfield* Projekten führte. Außer in bekannten Kalirevieren Kanadas, Russlands und Belarus, werden heute Kalisalze auch in Zentral- und Südostasien, Südamerika, West- und Ostafrika sowie auch in bislang nicht in Produktion stehenden Evaporitbecken Nordamerikas erkundet.

Um der steigenden Nachfrage künftig gerecht zu werden, haben fast alle etablierten Kalidüngemittelproduzenten umfangreiche Modernisierungen und/oder Kapazitätserweiterungen ihrer Anlagen geplant und zum Teil auch bereits realisiert. In Summe dürfte durch diese sogenannten *brownfield* Projekte in Nordamerika, Russland, Belarus und im Mittleren Osten bis Ende des Jahrzehntes eine gegenüber dem Beginn dieser Maßnahmen zusätzliche Produktionskapazität von etwa 15 Millionen Tonnen Kalidüngemittelprodukte vorhanden sein. Die Vorteile der so genannten *brownfield* Projekte sind vor allem

- bestehende Erfahrungen mit Infrastruktur und Transport;
- langfristige Kundenbeziehungen;
- schnellere Inbetriebnahme zusätzlicher Kapazitäten;
- geringere Investitionskosten pro Tonne im Vergleich zu *greenfield* Projekten

sowie die aus all diesen Vorzügen resultierende einfachere Finanzierung solcher *brownfield* Projekte[71].

Wie in Tabelle 2 dargestellt, sind die größten Anteile der Produktionserhöhungen in den nordamerikanischen Werken geplant und mittlerweile auch fast vollständig realisiert worden. Die in Kanada und USA produzierenden Kalidüngemittelhersteller PCS undMOSAIC haben nicht nur ihre Kapazität in Saskatchewan, Kanada erhöht,

69 SOP – *Sulphate of Potash* – ist der international übliche Handelsname für solche hochwertigen Kalidüngemittelprodukte, die Kaliumsulfat (K_2SO_4) als Träger der Kalium-Nährstoffkomponente enthalten und wirtschaftlich sowie ökologisch besonders effizient nur auf Grundlage sulfatischer Kalilagerstätten hergestellt werden können.

70 Dargestellt ist der aus öffentlich zugänglichen Quellen und Branchen-Informationssystemen sowie internen Informationen der ERCOSPLAN-Unternehmensgruppe (ERCOSPLAN 2015, /255/) ermittelte *Average Market Price*.

71 http://www.k-plus-s.com/de/news/presseinformationen/2013/presse-130422.html

sondern untergeordnet auch in New Mexico, USA, und New Brunswick, Kanada. Insgesamt werden in Nordamerika durch diese *brownfield* Projekte zusätzliche Produktionskapazitäten für etwa 10 Millionen Tonnen Fertigprodukte geschaffen (Middleton 2012, /653/).

Tabelle 2 Derzeitige Produktionskapazitäten und zukünftige schrittweise Erhöhung ausgewählter Produzenten bis 2020

	Kapazität [Millionen Tonnen KCl]		
Produzent	**2014**	**2016**	**2020**
URALKALI (Russland)	16,80		19,00
PCS (Kanada)	12,40	13,00	
MOSAIC (USA, Kanada)	13,00	14,00	16,50
BELARUSKALI (Belarus)	11,50	11,00	12,40
China	8,00	8,50	9,00
K+S (Deutschland)	7,10	9,10	9,95
ICL (Israel, Spanien, Großbritannien)	6,00	6,50	6,50
INTREPID (USA)	0,90	1,00	1,20

Die Erweiterungen des russischen Produzenten URALKALI und des weißrussischen Produzenten BELARUSKALI sind in etwas geringerem Umfang ausgefallen:

Das wichtigste *brownfield* Projekt von URALKALI besteht in der Kombination des neuen Bergwerkes Ust-Yaiwa mit der Erweiterung der beiden bestehenden Aufbereitungsanlagen Berezniki 3[72] und Berezniki 4 in denen die Rohsalze aus dem zukünftigen Bergwerk Ust-Yaiwa verarbeitet werden sollen. Hier werden etwa 1,5 Millionen Tonnen zusätzliche Fertigproduktkapazität geschaffen.

Derzeit werden die Schächte für das neue Bergwerk Ust Yaiwa geteuft. Darüber hinaus sind Erweiterungen in den Kaliwerken Berezniki 2 sowie Solikamsk 2[73] und Solikamsk 3 im Bau, die in Summe noch einmal zu einer zusätzlichen Fertigproduktkapazität von 2,0 Millionen Tonnen führen (Baumgertner & Belyakov 2012, /78/, FT 2013, /294/).

Die Investition von BELARUSKALI in neue Kapazitäten konzentriert sich auf die Erschließung neuer Teile der Lagerstätte Starobinsk sowie einer *greenfield* Entwicklung auf der Lagerstätte Petrikovsk (MR BELARUS 2011, /684/).

Mittelfristig, das heißt bis zum Jahr 2022, wird der russische Kalidüngemittelproduzent URALKALI jedoch seine Produktionskapazität verdoppeln und beabsichtigt, zu Beginn des nächsten Jahrzehnts über eine Produktionskapazität von 19 Millionen Tonnen Fertigprodukt zu verfügen (Baumgertner & Belyakov 2012, /78/; ▸Box 3.2).

Weiterhin sind kleinere Produktionserweiterungen im Mittleren Osten geplant. Trotz Bemühungen zur Produktionserhöhung in China werden es die chinesischen Produzenten voraussichtlich in absehbarer Zeit nicht schaffen, die inländische Nachfrage nach Kaliprodukten allein zu decken. China bleibt daher für alle großen Produzenten ein wichtiger Zielmarkt.

Als Ergebnis der steigenden Nachfrage und der Entwicklung der Kalipreise während der vergangenen 10 Jahre sind neben diesen Projekten zur Kapazitätserweiterung vorhandener Produktionseinheiten heute weltweit auch neue Projekte in Entwicklung. Aufgrund der Vielzahl der neuen Projekte und ihrer verschiedenen Entwicklungsstadien zeigt Tabelle 3 nur diejenigen Projekte, die mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit in naher Zukunft in Produktion kommen könnten.

72 Die Produktionseinheit am Standort Berezniki werden bei URALKALI als BKPRU bezeichnet. BKPRU ist die deutsche Transliteration der russischen Abkürzung БКПРУ für Березниковское Калийное Производственное Рудоуправление, also auf Deutsch: Betriebsverwaltung des Kalibergwerks von Berezniki.

73 Die Produktionseinheit am Standort Solikamsk werden bei URALKALI als SKRU bezeichnet. SKRU ist die deutsche Transliteration der russischen Abkürzung СКРУ für Соликамское Калийное Рудоуправление, also auf Deutsch: Betriebsverwaltung des Kalibergwerks von Solikamsk.

BOX 3.2

Die Unternehmenspolitik des Marktführers URALKALI

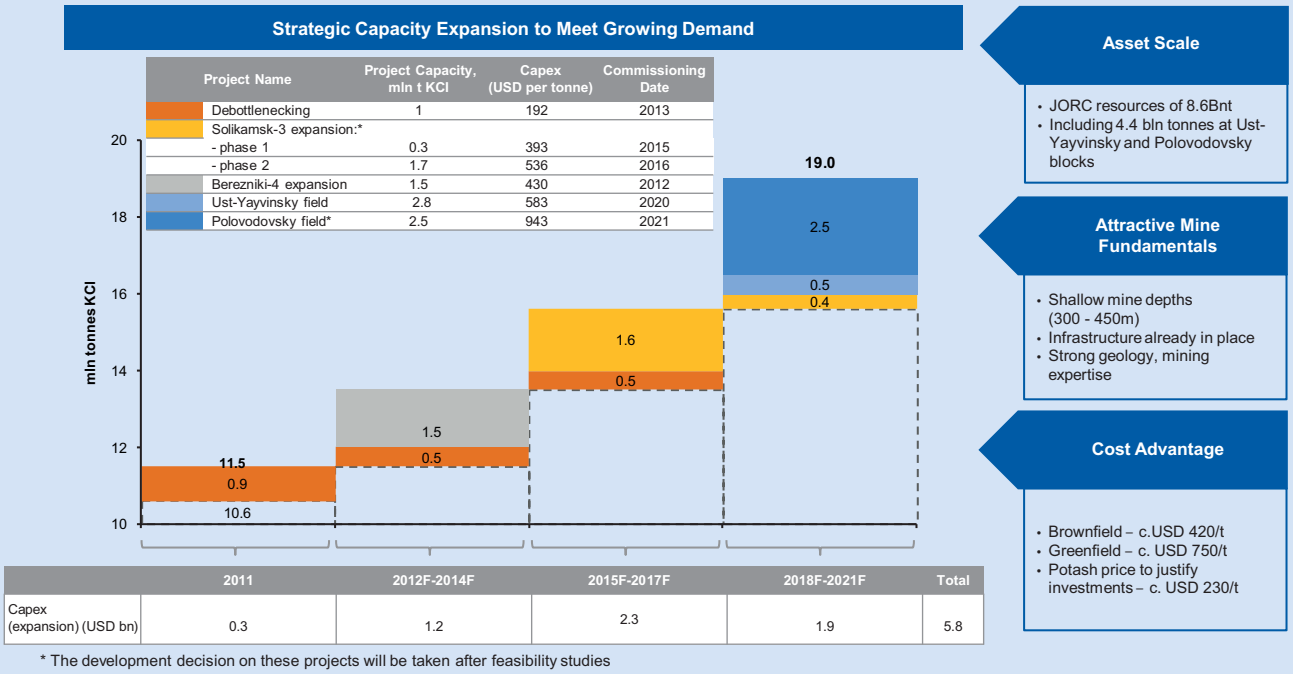
URALKALI betreibt heute 3 Bergwerke in und um die Stadt Solikamsk sowie 2 weitere Bergwerke in der Nähe der Stadt Berezniki. An beiden Lokationen bestehen jeweils 3 Verarbeitungsfabriken, welche MOP *standard* als auch MOP *granular* herstellen. Die Produktion betrug im Jahr 2014 rund 12 Millionen Tonnen KCl-Fertigprodukte.

Konzentration der Produktion und Konsolidierung

Die Politik des Unternehmens war seit dem Beginn des neuen Jahrtausends hauptsächlich auf die Steigerung der Produktionskapazität bei gleichzeitiger Optimierung und Kostensenkung gerichtet. Allein für den Zeitraum 2011 bis 2021 war ein vierstufiges Investitionsprogramm mit einer Gesamtsumme von 5,8 Milliarden US-Dollar vorgesehen, was schematisch im Bild aufgezeigt ist. Dies und die Schaffung des Vertriebsorgans BPC im Jahre 2005 dienten dem Ausbau einer eigenen strategischen Position in dem sich konzentrierenden Kalimarkt. Seit 2011 sind die 2 großen russischen Kaliproduzenten, URALKALI und SILVINIT, fusioniert und nun unter dem Dach der Aktiengesellschaft URALKALI tätig. Auch dadurch konnte die strategische Position von URALKALI hin zum Marktführer weiter ausgebaut werden. Heute stellt dieses Unternehmen den weltgrößten Kaliproduzenten mit einer nominalen Produktionskapazität von etwa 17 Millionen Tonnen Fertigprodukt dar.

Ambitionierter Ausbau der Produktionskapazitäten

Den Änderungen des Marktes und den damit einhergehenden Preisminderungen für Kalidüngemittelprodukte Rechnung tragend, modifizierte URALKALI zwar ab Mitte 2013 die Zeitpläne für die umfangreichen Investitionen, hält aber grundsätzlich am Ausbau der Produktionskapazitäten an den Standorten Solikamsk und Berezniki weiter fest. Mit den Grundwasserzuflüssen in das Bergwerk Solikamsk 2 kam es im November 2014 zur Einstellung der Gewinnungsarbeiten unter Tage, was sich kurz- und mittelfristig auf die Gesamtproduktionskapazität von URALKALI auswirken wird.



	2011	2012F-2014F	2015F-2017F	2018F-2021F	Total
Capex (expansion) (USD bn)	0.3	1.2	2.3	1.9	5.8

* The development decision on these projects will be taken after feasibility studies

Vier-Stufen-Plan zur Erhöhung der Produktionskapazität von URALKALI im Zeitraum 2011 bis 2021 [aus Baumgertner & Belyakov 2012, /78/]

Eine große Zahl von ihnen befindet sich in Saskatchewan, Kanada (Middleton 2012, /653/; Phinney & Ma 2012, /759/; BHPB 2013, /100/; 2015, /101/), und in Osteuropa (IM 2014, /433/), aber auch in Südamerika (Lima Faria 2012, /593/; Hambrook 2012, /366/) und Afrika (Abasov 2012, /4/; Evans 2012, /261/; Hughes 2012, /422/; Longbo et al. 2012, /601/; Stenvold 2012, /978/).

Nicht nur in Nordamerika, sondern grundsätzlich fällt weltweit auf, dass – gemessen am heutigen Anteil der Soltechnischen Gewinnung – eine unproportional größerer Teil dieser neuen Kaliprojekte auf die Anwendung der Soltechnischen Gewinnung ausgerichtet sind, darunter auch das bereits im fortgeschrittenem Baustadium befindliche Legacy-Projekt von K+S POTASH CANADA in Saskatchewan, Kanada.

Sollte es zur Realisierung dieser *greenfield* Projekte kommen, dann wird der wohl stärkste Effekt vom Eintritt des weltweit agierenden und größten Bergbaukonzerns BHP BILLITON PLC. (BHPB) in den Kalimarkt ausgehen. Projekte in Saskatchewan sind jedoch weit von den großen Zielmärkten entfernt, was zunächst erheblichen Bahntransport zum derzeit wichtigsten Exporthafen Vancouver, British Columbia, oder zu neuen Kalihäfen an der Pazifikküste und sodann stets große Seewege erfordert. Einen gewissen Engpass stellt hierbei die begrenzte Kapazität des CANADIAN PACIFIC (CP) Schienennetzes dar, welches bereits durch die zusätzlichen Kapazitäten der *brownfield* Projekte eine Herausforderung erfahren wird.

Tabelle 3 Ausgewählte fortgeschrittene *greenfield* Projekte mit hohen Produktionskapazitäten

BHP BILLITON
Jansen Projekt, Saskatchewan, Kanada: Bergmännische Gewinnung von Sylvinit Bis zu 10,0 Millionen Tonnen MOP pro Jahr, schrittweise Inbetriebnahme zwischen 2019 und 2030[74] Zurzeit im Bau
EUROCHEM
Gremiachenskij Projekt, Region Volgograd, Russland: Bergmännische Gewinnung von Sylvinit Phase I – 2,3 Millionen Tonnen MOP pro Jahr, Produktionsstart 2015[74]; Phase II – Ausbau auf 4,6 Millionen Tonnen MOP pro Jahr, Produktionsstart 2017, volle Kapazität in 2020 Zurzeit im Bau
EUROCHEM
Kovdorskij-Usolskij Projekt, Region Perm, Russland: Bergmännische Gewinnung von Sylvinit 3,4 Millionen Tonnen MOP pro Jahr, Produktionsstart 2019, volle Kapazität in 2022 Zurzeit im Bau
K+S Canada
Legacy Projekt, Saskatchewan, Kanada: Soltechnische Gewinnung von Sylvinit Phase I – 2,0 Millionen Tonnen MOP pro Jahr, geplant für Ende 2017, Produktionsstart Mitte 2016; Phase II – Zusatzkapazität von 0,86 Millionen Tonnen MOP pro Jahr, Produktionsstart in 2023 Zurzeit im Bau
WESTERN POTASH
Milestone Projekt, Saskatchewan, Kanada: Soltechnische Gewinnung von Sylvinit Geplante Kapazität von 2,8 Millionen Tonnen MOP pro Jahr, Baubeginn für 2016 geplant

74 Im Zusammenhang mit den Zuflüssen in das Bergwerk Solikamsk 2 ist eine frühere Realisierung dieses Projektes angedacht.

ACRON

Talitzkij Projekt, Region Perm, Russland: Bergmännische Gewinnung von Sylvinit
Phase I – 1,0 Million Tonnen MOP pro Jahr für 2021;
Phase II – 2,0 Millionen Tonnen MOP pro Jahr für 2023
Zurzeit im Bau

URALKALI

Polovodovskij Projekt, Region Perm, Russland: Bergmännische Gewinnung von Sylvinit
2,5 Millionen Tonnen MOP pro Jahr, Realisierungszeitpunkt zurzeit in Diskussion[75]

Weitere *greenfield* Projekte finden sich zum Beispiel in Russland: URALKALI plant ein neues Kaliwerk auf dem Polovodovskij-Feld, ACRON ein weiteres auf dem Talitzkij-Feld und EUROCHEM auf dem Kovdorskij-Usolskij-Feld. Alle, so auch die zukünftigen Produktionsstandorte von URALKALI, liegen auf der Obere Kama Lagerstätte im westlichen Vorland des Ural, in der Region Perm. Damit haben diese Produktionseinheiten zweifellos ebenfalls den Nachteil langer Wege zu den Exporthäfen an der Ostsee, am Schwarzen Meer und am Pazifik, allerdings gegenüber Saskatchewan den Vorteil einer mittlerweile gut ausgebauten industriellen Infrastruktur sowie erheblicher Kapazitätsreserven für den Produkttransport entlang der Schienen- und Wasserwege.

Eine andere Kategorie der *greenfield* Projekte ist in Tabelle 4 zusammengefasst. Diese sind durch ihre Nähe zu den wachsenden Märkten in China und Südostasien charakterisiert. Mit Ausnahme des thailändischen Udon South Projektes orientieren diese jedoch, zumindest während ihrer ersten Ausbaustufen, auf relativ geringe Produktionskapazitäten. Die Tabelle zeigt auch den enormen Kapazitätszuwachs, der durch diese Projekte zu erwarten ist, sollten sie tatsächlich in nächster Zeit realisiert werden. Diese Kapazitätserweiterung käme noch zusätzlich zu der insbesondere von den kanadischen und russischen Produzenten zurzeit laufenden Erhöhung der Produktionskapazität durch die sogenannten *brownfield* Projekte hinzu. Bei Umsetzung aller oder auch nur des größeren Teiles dieser Projekte wäre daher langfristig eine Überkapazität an MOP zu erwarten. Anders als noch vor Jahresfrist etabliert sich ein derartiger Marktausblick bei den Analysten und macht auch die Finanzierung von *greenfield* Projekten zunehmend schwieriger. Es ist daher mittelfristig nicht zu erwarten, dass alle diese *greenfield* Kapazitäten tatsächlich realisiert werden.

Während im vergangenen Jahrzehnt die Kalidüngemittelpreise auskömmliche Erträge – in den Jahren 2006 bis 2010[76] sogar hohe Gewinne – ermöglichten, wird sich aber bei Umsetzung auch nur eines Teiles der oben aufgeführten Projekte wieder ein Preisniveau einstellen, das alle Produzenten zu Kosteneinsparungen zwingt. Standort- und lagerstättenbedingt ist es den nordamerikanischen und insbesondere den russischen und weißrussischen Produzenten möglich, ihre überwiegenden MOP-Produkte zu ausgesprochen geringen Betriebskosten herzustellen (Baumgertner & Belyakov 2012, /78/; Middleton 2012, /653/), weshalb deren Wettbewerbsfähigkeit auch zukünftig am geringsten beeinträchtigt sein wird.

75 Die Zeitpläne für die Inbetriebnahme der verschiedenen Ausbaustufen entstammen den öffentlich zugänglichen Presseinformationen. Es ist jedoch bekannt, dass sich diese Projekte im Bauablauf wie auch in der Inbetriebnahme verzögern werden.

76 Mit Ausnahme des Jahres 2009: Im Jahr 2009 haben staatliche chinesische zum Teil auch indische Importeure für Düngemittel zunächst ihre MOP-Lagerbestände reduziert und neue Lieferverträge saisonal verspätet erst in 2010 abgeschlossen.

Tabelle 4 Ausgewählte *greenfield* Projekte nahe den Wachstumsmärkten China/Südostasien

LAO KAIYUAN

Nongphu Projekt, Khammouane Provinz, Laos: Bergmännische Gewinnung von Sylvinit und Carnallitit
Phase I – 500.000 Tonnen MOP pro Jahr
Phase II – 2,5 Millionen Tonnen MOP pro Jahr
Zurzeit im Bau; einzelne Anlagen seit dem III. Quartal 2013 im Probebetrieb (kumulative Produktmenge seit Inbetriebnahme bis 31. Dezember 2014: 51.400 Tonnen MOP[77] und Steinsalz)

ASIA PACIFIC POTASH CORPORATION

Udon South Projekt, Provinz Udon Thani, Thailand: Bergmännische Gewinnung von Sylvinit
2,1 Millionen Tonnen MOP pro Jahr
Baubeginn für 2017 geplant

ASEAN POTASH MINING PUBLIC COMPANY LTD.

Bamnet Narong Projekt, Provinz Chayaphun, Thailand: Bergmännische Gewinnung von Carnallitit
1,1 Millionen Tonnen MOP pro Jahr
Baubeginn für 2016 geplant

SINOAGRI MINING

Dong-Tai Projekt, Khammouane Provinz, Laos: Pilotanlage für 100.000 Tonnen MOP pro Jahr seit 2014 in Betrieb
geplante Kapazität 1,1 Millionen Tonnen MOP pro Jahr bis 2014
Baubeginn verzögert

SINOHYDRO MINING

Thangone Projekt, Vientiane Provinz, Laos: Soltechnische Gewinnung von Carnallitit
Pilotanlage für 120.000 Tonnen MOP pro Jahr seit Juli 2013 im Probebetrieb (kumulative Produktmenge seit Inbetriebnahme bis 31. Dezember 2014: 31.623 Tonnen MOP[78])
Ausbau auf 1,0 Millionen Tonnen MOP im Jahr in Planung

VILACHEMSALT

Nonglom Projekt, Khammouane Provinz, Laos: Soltechnische Gewinnung von Carnallitit
Phase I – 320.000 Tonnen MOP pro Jahr
Phase II – 500.000 Tonnen MOP pro Jahr
Pilotanlage zurzeit im Bau

77 Gemäß Berichterstattung des Betreibers LAO KAIYUAN an die zuständige Bergaufsichtsbehörde, das *Department of Mines* beim *Ministry of Energy and Mines* der Volksrepublik Laos.

78 Gemäß Berichterstattung des Betreibers SYNOHYDRO MINING an die zuständige Bergaufsichtsbehörde, das *Department of Mines* beim *Ministry of Energy and Mines* der Volksrepublik Laos.

3.2 Kaliproduzenten und Vertriebsstrukturen

Mehr als 70 Prozent der weltweiten Kalidüngemittelproduktion werden auf der Grundlage sylvinitischer Rohsalze produziert (▸ Abbildung 8a). Andere feste Rohsalze, wie Carnallitit und langbeinitisch-polyhalitische[79] Rohsalze, spielen als Rohstoffquellen mit wenigen Prozent Anteil am Fertigproduktvolumen demgegenüber nur eine untergeordnete Rolle. Mehr als 25 Prozent der Weltkaliproduktion wird aus natürlichen Lösungen, vor allem aus dem Toten Meer, erzeugt. Hinsichtlich der Gewinnungsmethode dominiert nach wie vor die Bergmännische Gewinnung fester Rohsalze unter Tage (▸ Abbildung 8b). Heute werden etwa 4 Prozent der weltweiten Produktion von Kalierzeugnissen mit Hilfe Soltechnischer Gewinnungsverfahren hergestellt, der überaus größte Teil davon am Standort Belle Plaine in Saskatchewan, Kanada.

Die 10 größten Produzenten, die zusammen mehr als 90 Prozent der Weltkaliproduktion erzeugen, sind PCS, MOSAIC und AGRIUM, welche in Kanada und den USA ansässig sind und produzieren; INTREPID, welches in den USA ansässig ist und produziert; BELARUSKALI und URALKALI, welche beide in der ehemaligen Sowjetunion entstanden sind und heute in der Republik Belarus beziehungsweise der Russischen Föderation produzieren; die ICL Gruppe, welche in Israel ansässig ist und mit den Unternehmen DSW in Israel, ICL IBERIA S & S in Spanien und CPL in Großbritannien produziert; die APC, welche in Jordanien ansässig ist und produziert, und die K+S, welche in Deutschland ansässig ist und bislang nur dort produziert; sowie SQM, welcher in Chile ansässig ist und produziert. Chinas Kalidüngemittelproduktion setzt sich aus einer Vielzahl kleinerer Produzenten zusammen und hat sich im letzten Jahrzehnt verdreifacht. Für den Rest der Kalidüngemittelproduktion sind 4 weitere kleinere Produzenten verantwortlich, wovon einer in Südamerika ansässig ist. Die Produktionszahlen der größten Kalidüngemittelproduzenten sind für das Jahr 2013 in Abbildung 9 dargestellt.

Mit dem gesellschaftsrechtlichen Vollzug der Fusion von URALKALI und SILVINIT im Jahre 2011 wurde URALKALI zum weltgrößten Kalidüngemittelproduzenten mit einer nominalen Produktionskapazität von damals etwa 11,5 Millionen Tonnen Fertigprodukt.

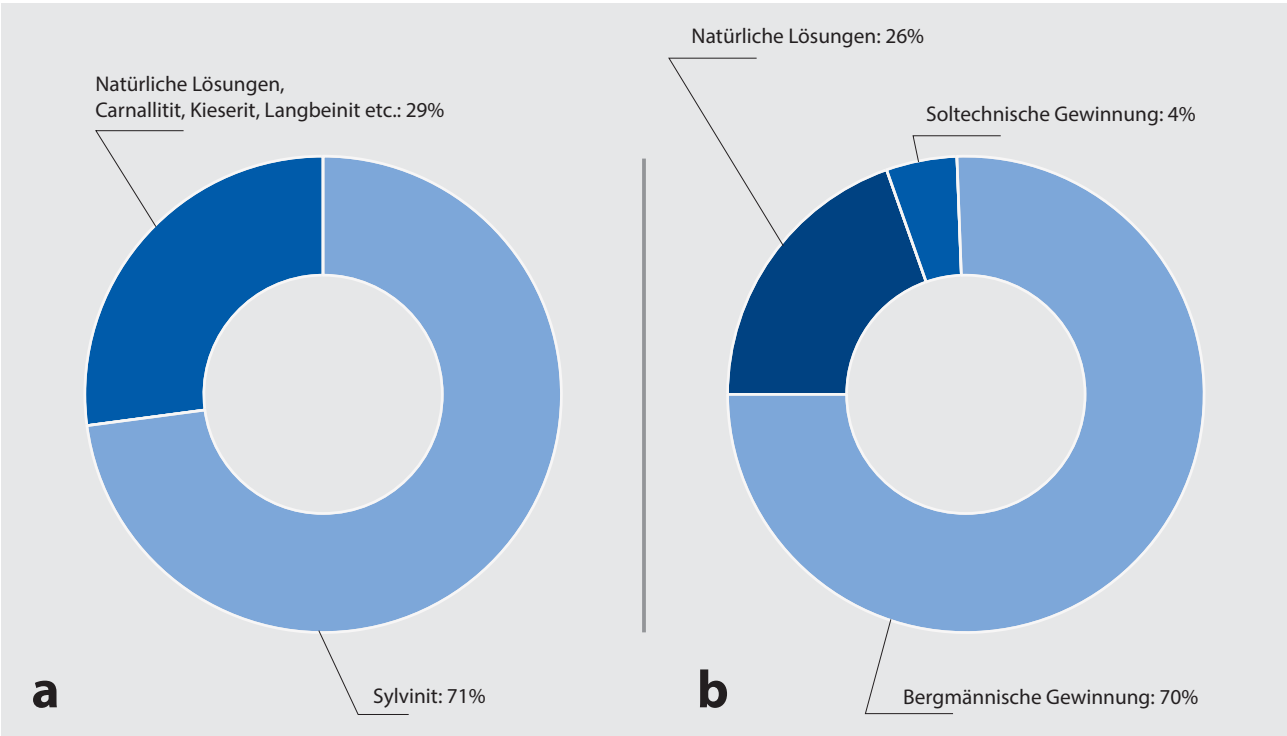


Abbildung 8 Herkunft der Weltkalidüngemittelproduktion des Jahres 2013; a – nach den Rohstoffquellen; b – nach den Gewinnungsmethoden

79 Langbeinitisch-polyhalitische Rohsalze sind Kalisalzgesteine, die neben dem Kalium-Mineral Sylvin auch höhere Anteile der Doppelsalze Langbeinit ($K_2Mg_2(SO_4)_3$) und Polyhalit ($K_2Ca_2Mg(SO_4)_4$ x 2 H_2O) enthalten. Der K_2O-Gehalt von Langbeinit beträgt 22,7 m%, der von Polyhalit 15,6 m%.

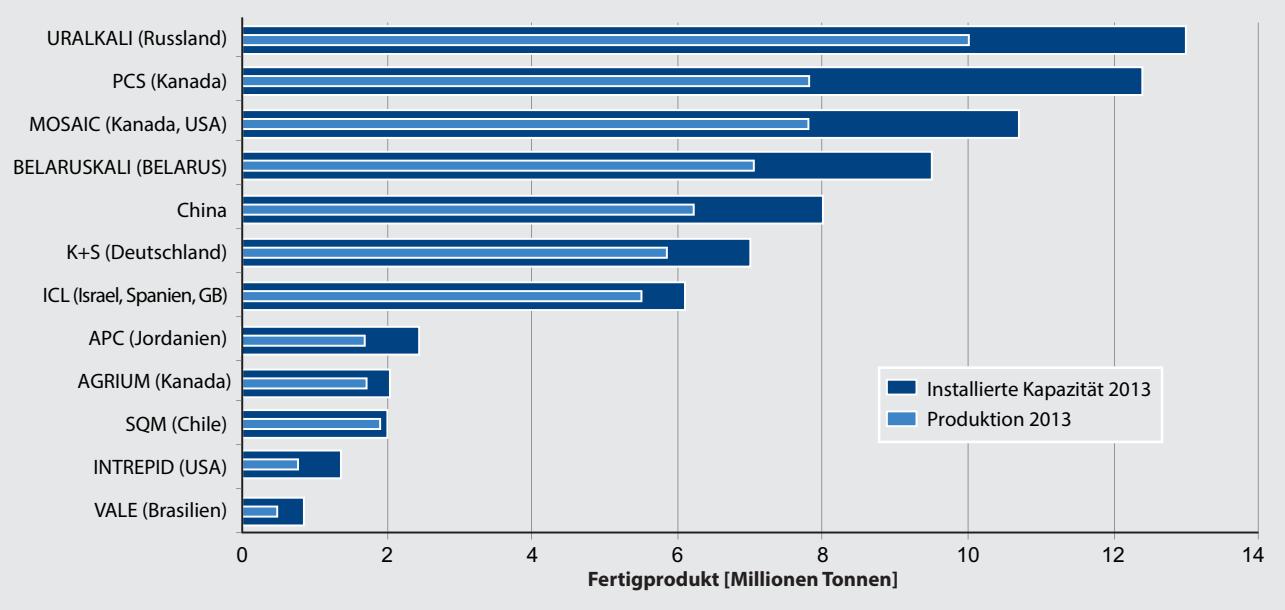


Abbildung 9 Tatsächliche Produktion des Jahres 2013 und installierte Produktionskapazität der größten Kalidüngemittelproduzenten[80]

Als Ergebnis der räumlichen Verteilung der großen Produzenten und der maßgeblichen Konsumenten wird ein Ungleichgewicht zwischen produzierenden und verbrauchenden Weltregionen sichtbar (▸ Abbildung 10), was für das Gros des Exportgutes zu sehr langen Transportrouten führt (▸ Abbildung 18). Obwohl Kalidüngemittel in mehr als 12 Ländern produziert werden, exportieren nur 6 davon größere Mengen auf den internationalen Markt.

Die größten Abnehmer für Kalidüngemittelexporte sind Lateinamerika und Asien. Von den beiden großen Kaliproduktionsstandorten Berezniki und Solikamsk an der Oberen Kama im Ural-Vorland, Region Perm, in Russland, und dem Standort Soligorsk im südlichen Zentralteil der Republik Belarus wurden im Jahr 2010 etwa 54 Prozent ihrer KCl-Exporte nach Asien verkauft. Exporte der Produzenten im Mittleren Osten, DSW und APC, lagen in diesem Zeitraum etwa 65 bis fast 90 Prozent.

Um diese Exporte zu organisieren, nutzen die exportorientierten Produzenten teilweise gemeinsame Vertriebsorganisationen (▸ Tabelle 5). Der größte Teil der nach Übersee gerichteten Exporte der kanadischen Produzenten wird von den *Neptune Terminals* in Vancouver, British Columbia, Kanada, und dem *Bulk Terminal No. 5* in Portland, Oregon, USA, aus verschifft. Beide Kaliterminals sind im Besitz der Firma CANPOTEX und werden durch sie betrieben. CANPOTEX wurde 1970 als Vertriebsorganisation gegründet, um die internationalen Exporte der in Saskatchewan ansässigen Produzenten zu organisieren. Die Vertriebsorganisation verfügt daher über Verladeeinrichtungen an jedem der Kaliwerke und übernimmt die Transporte und die Vermarktung der Kalidüngemittelprodukte außerhalb Kanadas und der USA.

Tabelle 5 Weltweit wichtigste Vertriebsorganisationen für Kalidüngemittelexporte und deren Anteile am internationalen Handel[81] im Jahr 2012

Organisation	Produzenten	Anteil am internationalen Handel in 2012[81] [%]
BPC	BELARUSKALI, URALKALI	40
CANPOTEX	PCS, MOSAIC, AGRIUM	23
ICL Gruppe	DSW, ICL IBERIA S & S, CPL	13

80 Aus darstellerischen Gründen wurden in diesem Diagramm Kalidüngemittelproduzenten mit einem Produktionsvolumen <500.000 t/a nicht berücksichtigt. Dargestellt sind die aus öffentlich zugänglichen Quellen und Branchen-Informationssystemen sowie internen Informationen der ERCOSPLAN-Unternehmensgruppe (ERCOSPLAN 2015, /255/) hochgerechneten Mengen an Kalifertigprodukten.

81 ohne Handel Kanada – USA

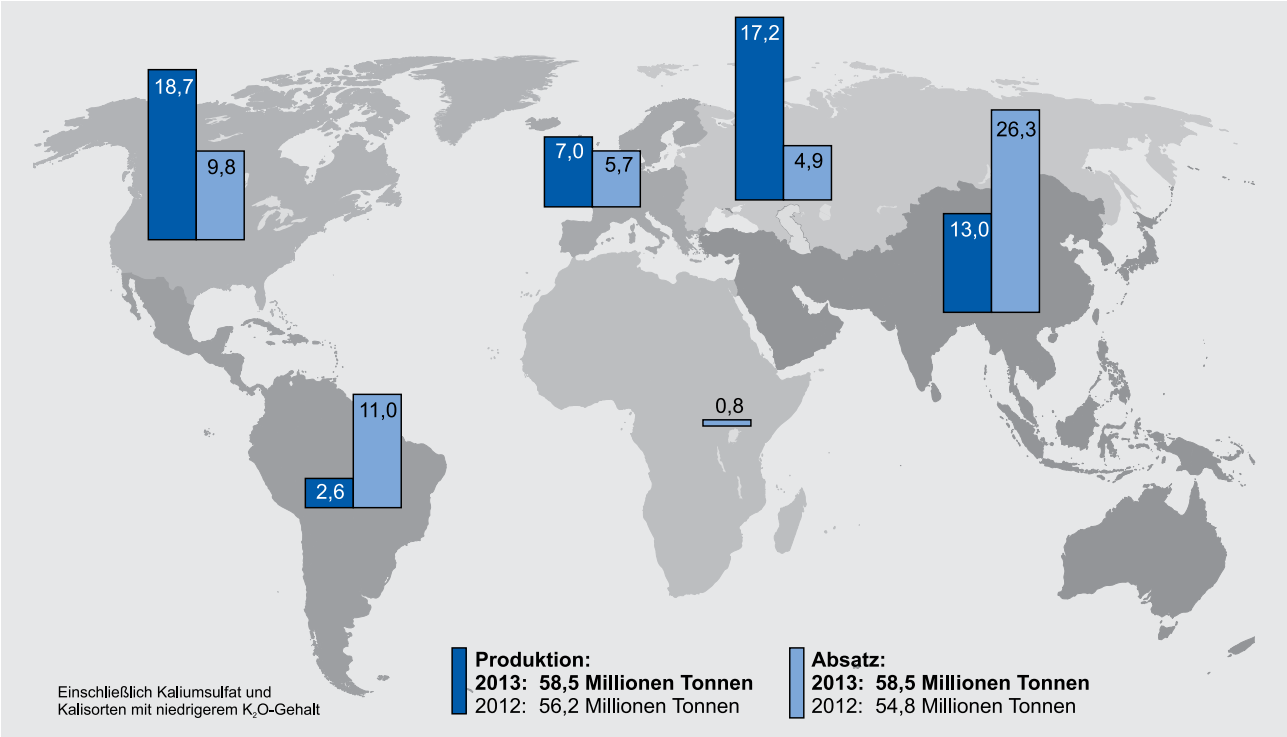


Abbildung 10 Weltweite Kalidüngemittelproduktion und -absatz, dargestellt in Millionen Tonnen KCl_{equ} [nach K+S 2015a, /490/]

Derzeit plant CANPOTEX einen neuen Hafen bei Prince Rupert in British Columbia. CANPOTEX verkauft in der Regel zwischen 7 und 9 Millionen Tonnen Kalidüngemittel pro Jahr und ist ebenfalls im Seefrachtgeschäft tätig. Da etwa 70 Prozent der Geschäfte auf *cost and freight* Basis (cfr) abgewickelt werden, ist die Vertriebsorganisation in der Lage, Ladungen flexibel zu kombinieren. Eigentümer von CANPOTEX sind PCS, MOSAIC und AGRIUM, wobei jedes Unternehmen über einen Anteil proportional zu seiner Produktionskapazität verfügt. Etwa 70 Prozent der gesamten CANPOTEX-Exporte entfallen auf die 5 größten Abnehmerländer Brasilien, China, Indien, Indonesien und Malaysia. Das Kaliwerk Penobsquis, New Brunswick, Kanada, der PCS, nahe der kanadischen Ostküste gelegen, exportiert etwa 95 Prozent seiner Fertigprodukte ebenfalls nach Übersee und nutzt hierfür das PCS-eigene *Barrack Point Potash Terminal* im Ostteil des Hafens von Saint John, in der Bay of Fundy, New Brunswick.

Auch die Produzenten in Russland und Belarus verkaufen einen großen Anteil ihrer Produktion im Ausland. Diese Exportmärkte bedienten die beiden Kaliproduzenten URALKALI und BELARUSKALI bis zum Ausbruch des "Kalikrieges" 2012/13 (▸Box 3.1) durch die gemeinsame Vertriebsorganisation BPC über verschiedene Häfen der Ostsee und des Schwarzen Meeres. Der größte Teil wird im modernen *Baltic Bulk Terminal* (BBT) in St. Petersburg abgewickelt, der von URALKALI im Jahr 2001 in Betrieb genommen wurde. Gesellschafter der BPC waren bis in die jüngste Zeit zu 50 Prozent URALKALI, zu 45 Prozent BELARUSKALI und zu 5 Prozent die staatliche Eisenbahngesellschaft der Republik Belarus.

Zwischen 1994 und 2001 hat die INTERNATIONAL POTASH COMPANY (IPC), ein aus dem früheren sowjetischen staatlichen Außenhandelsbetrieb SOYUSKALI hervorgegangenes Privatunternehmen, alle Produkte von URALKALI, SILVINIT und BELARUSKALI exportiert. 2006 wurde BPC als ein *Joint Venture* zwischen URALKALI und BELARUSKALI gegründet. BPCs Anteil an den weltweiten Kaliexporten lag im Jahr 2010 noch bei 30 Prozent (▸Tabelle 5), betrug später aber aufgrund der Fusion zwischen URALKALI und SILVINIT etwa 40 Prozent. Wie sich BPCs Rolle auf dem internationalen Kalimarkt künftig gestalten wird, ist aufgrund der mit dem "Kalikrieg" aufgekündigten Partnerschaft von URALKALI und BELARUSKALI momentan nicht abschätzbar.

Die weiteren Großexporteure sind K+S über das Kaliterminal im Hamburger Hafen, DSW über Terminals in Eilat am Roten Meer sowie verschiedene israelische Häfen am Mittelmeer und APC über den Hafen in Aqaba, Jordanien, ebenfalls am Roten Meer.

3.3 Anforderungen an Kaliprodukte und handelsübliche Spezifikationen

Der größte Teil der weltweiten Kalidüngemittelproduktion entfällt auf Standardkalidüngemittel, die als MOP mit einer Standardqualität von 95 Prozent KCl (entspricht 60 m% K_2O) gehandelt werden und daneben auch spezifische physikalische Anforderungen erfüllen müssen (IFDC 1979, /430/; 1996, /431/; Klein & Goldsmith 1992, /531/). Kleinere Anteile entfallen auf Kaliumsulfat (K_2SO_4), welches nur von einigen Produzenten hergestellt und als SOP gehandelt wird, und auf Kaliumnitrat (KNO_3) oder werden mit anderen Nährstoffen zu NPK-, K-Mg- und anderen Mischdüngern verschnitten. Der SOP-Anteil an den weltweit gehandelten Kalidüngemitteln beträgt zurzeit etwa 6 Prozent. SOP-Produkte enthalten mindestens 50 Prozent K_2O, etwa 18 Prozent Schwefel (S) und weniger als 2 Prozent Chlorid (KCl, NaCl). Kaliumnitrat-Produkte (KNO_3) enthalten etwa 45 Prozent K_2O, 13 Prozent Stickstoff (N und NO_3) und wenig oder kein Chlorid. Daneben werden auch K-Mg-Düngemittel hergestellt, die gleichfalls sulfatische Nährstoffe (K_2SO_4 und $MgSO_4$), diese jedoch in sehr unterschiedlichen Anteilen enthalten.

Hinsichtlich der physikalischen Produktqualität, die im Wesentlichen das Korngrößenspektrum beschreibt, werden beide Produktlinien, MOP und SOP, als feinkörnigeres Standard- (*standard*) oder als grobkörnigeres granuliertes (*granular*) Produkt verkauft (▸ Abbildung 11).

Die Kalidüngemittelprodukte der einzelnen Hersteller unterscheiden sich in Farbe, Reinheit und Korngröße. Nahezu jeder Kalidüngemittelproduzent nutzt KCl als Basis für verschiedene weitere Produkte. Die meisten Produzenten bieten feines/standard sowie granuliertes MOP mit weißer oder rötlicher Färbung an; nur einige produzieren auch *industrial grade*[82] (KCl 98 und KCl 99). Besonders in den letzten Jahrzehnten werden durch die moderne Landwirtschaft grobkörnige Düngemittelprodukte mit mittleren Korngrößen von 1 bis 5 Millimeter bevorzugt. Ein relativ kleiner, in den letzten Jahrzehnten aber zunehmender Anteil der Kalidüngemittel wird speziell für einzelne Böden und/oder Pflanzenkulturen maßgeschneidert hergestellt, wobei sowohl die physikalischen (i. W. die Körnung) wie auch die chemischen Eigenschaften (z. B. Beimengung weiterer Makro- oder Mikro-Nährstoffkomponenten) angepasst werden (Rug & Kahle 1990, /864/; Kirk-Othmer 2005, /523/).

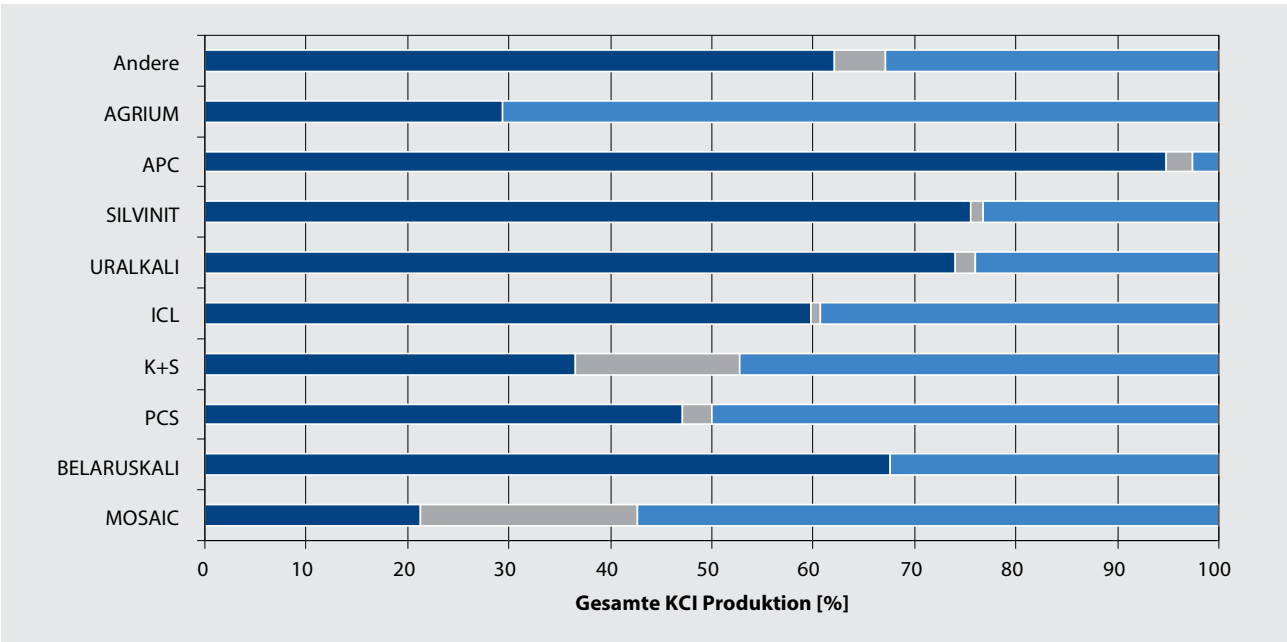


Abbildung 11 Anteile der von den einzelnen Kalidüngemittelproduzenten hergestellten verschiedenen KCl-Produktsorten *standard* und *coarse* (dunkelblau), *industrial* (grau) und *granular* (hellblau), beispielhaft dargestellt für das Jahr 2010

82 Als *industrial grade* wird ein Kaliprodukt bezeichnet, welches mehr als 98 m% KCl enthält und vornehmlich in der pharmazeutischen, chemischen und Lebensmittelindustrie eingesetzt wird.

Die wesentlichen Handelsbezeichnungen und die dafür geltenden Qualitätsanforderungen sind (Klein & Goldsmith 1992, /531/):

MOP *standard*

- wasserlösliches K_2O mit mindestens 60 Prozent entspricht >95 Prozent KCl;
- Nebenbestandteile NaCl, $MgCl_2$, $MgSO_4$, K_2SO_4 und $CaSO_4$;
- anhaftende Feuchte etwa 0,2 Prozent;
- Korngröße[83] von 0,2 bis 1,7 Millimeter

MOP *granular*

- wasserlösliches K_2O mit mindestens 60 Prozent entspricht >95 Prozent KCl;
- Nebenbestandteile NaCl, $MgCl_2$, $MgSO_4$, K_2SO_4 und $CaSO_4$;
- anhaftende Feuchte etwa 0,2 Prozent;
- Korngröße von 2 bis 4 Millimeter

  Granuliertes MOP wird zunehmend beliebter. Es wird für direkte Düngung sowie zum Mischen mit anderen Nährstoffen eingesetzt. Daneben gibt es ein dem granulierten MOP sehr ähnliches, gröberes Kristallisationsprodukt mit der Bezeichnung *coarse*, das sich vom *granular* hauptsächlich in der mittleren Korngröße (0,8 bis 2,0 mm) unterscheidet.

SOP *standard*

- wasserlösliches K_2O mit mindestens 50 Prozent entspricht >93 Prozent K_2SO_4;
- Sonstige Sulfate $MgSO_4$, $CaSO_4$ mit 3 bis 4 Prozent;
- NaCl + KCl mit <2 Prozent;
- Feuchte maximal 1,5 Prozent;
- Korngröße von 0,1 bis 0,5 Millimeter

SOP *granular*

- wasserlösliches K_2O mit mindestens 50 Prozent entspricht >93 Prozent K_2SO_4;
- Sonstige Sulfate $MgSO_4$, $CaSO_4$ mit 3 bis 4 Prozent
- NaCl + KCl mit <2 Prozent;
- Kristallwasser 2,6 Prozent;
- Korngröße von 2 bis 4 Millimeter

Die Produktanforderungen und Spezifikationen unterliegen nur geringen Schwankungen zwischen den regionalen Märkten. Die chemische Zusammensetzung der KCl-Produkte wird beispielhaft für Kalidüngemittel am südostasiatischen Markt in Tabelle 6 angegeben. In der Landwirtschaft wird die Kalium-Nährstoffkomponente größtenteils in Form eines auf Kaliumchlorid (KCl) basierten Düngemittels zugeführt. Dieses MOP-Düngemittel wird meist mit einer Reinheit von 60 Prozent K_2O oder 95 Prozent KCl angeboten.

Tabelle 6 Charakteristische Qualitätsstandards von KCl-Produkten, dargestellt am Beispiel des regionalen Marktes in Südostasien

Düngemittel	Wertstoffgehalt [m%]								
	KCl	K_2O	K	Mg	Na	Ca	SO_4	Cl	Unlösliches
KCl95 (MOP)									
standard	95,0 – 95,9	60,0 – 60,6	50,3	0,03	1,35	0,03	0,05	47,7	0,50
granular	95,0 – 95,9	60,0 – 60,6	50,3	0,03	1,35	0,03	0,05	47,7	0,50
KCl98									
standard	98,3	62,0	51,7	0,005	0,40	0,001	0,40	47,4	0,01
granular	98,5	62,0 – 62,1	51,6	0,04	0,40	0,001	0,05	47,6	0,01
KCl99									
	99,7 – 99,9	63,0 – 63,2	52,4	0,001	0,02	0,001	0,005	47,4	---

83 Diese Angaben kennzeichnen die Korngrößenverteilung und schwanken je nach Hersteller, etwa 10 – 15 % des Produktes dürfen größere beziehungsweise kleinere Korngrößen aufweisen.

Wie im weltweiten Durchschnitt, so werden auch von den einzelnen regionalen Märkten mehr als 90 Prozent der Kalidüngemittel als MOP nachgefragt. In den USA und Kanada enthalten die MOP-Produkte zwischen 60 Prozent und 62 Prozent K_2O. MOP-Düngemittel sind dort in 5 verschiedenen Sorten erhältlich, wobei die Korngröße das wesentlichste Kriterium für die Differenzierung ist: (1) weiß, löslich, (2) *special standard*, (3) *standard*, (4) *coarse* und (5) *granular*. Das weiße, vollständig lösliche MOP-Produkt wird idealerweise zur Flüssigdüngung angewendet. Das MOP *granular* wird häufig zum Verschnitt mit anderen Nährstoffkomponenten für die Herstellung von PK-, NK- oder NPK-Mischdüngern genutzt.

Kaliumsulfat wird für die landwirtschaftliche Nutzung in der Regel unter dem Handelsnamen SOP verkauft und enthält dann etwa 50 Prozent K_2O und 18 Prozent Schwefel (S). Da sein Chloridgehalt unter 2,5 Prozent beträgt, wird es für die Düngung von chloridempfindlichen Pflanzen, wie Obstbäume oder Tabak eingesetzt und um dem Boden die Nährstoffkomponente Schwefel zuzuführen.

Neben diesen klassischen Kalidüngemittelprodukten für die landwirtschaftliche Nutzung existieren auch diverse Kaliproduktsorten für den Einsatz als Rohstoffe in der chemischen, der pharmazeutischen oder auch in der Lebensmittelindustrie, die als sogenannte Industriekali zusammengefasst werden (Childers 1990, /79/). Diese weisen in der Regel einen höheren K_2O Gehalt im Produkt auf und werden zum Beispiel als KCl98 und KCl99 gehandelt. Der größte Teil der Kalidüngemittelproduzenten weltweit stellt neben landwirtschaftlichen Kaliprodukten auch Industriekali her, dies jedoch in weitaus geringerer Tonnage (▸ Abbildung 11). Bei lediglich 2 Kalidüngemittelproduzenten, der in USA und Kanada produzierenden MOSAIC (etwa 22%) und der deutschen K+S (etwa 16%) erreicht die Industriekaliherstellung größere Anteile an der Gesamtkaliproduktion.

Aufgrund der verschiedenartigen Lagerstätteninhalte sind nur wenige der Produzenten in der Lage, K-Mg-Sulfat und SOP auf direktem Wege und damit sowohl ökonomisch wie auch ökologisch besonders effizient zu produzieren. Aufgrund der zusätzlich zu Sylvin[84] und Carnallit[85] als Kalium-Träger in einigen deutschen Lagerstätten auftretenden hohen Kieserit-Gehalte[86] ist K+S in der Lage, solche Produkte auf direktem Wege, also allein unter Ausnutzung der im Rohsalz vorhandenen Stoffkomponenten, ohne den Zusatz chemischer Reaktionspartner zu erzeugen. Für die hier zur Rede stehende Ableitung eines möglichst allgemeingültigen Standes der Technik bei der Kalidüngemittelproduktion hat dieses Faktum insofern Bedeutung, da die hierbei zum Einsatz kommenden Methoden, Verfahren und Anlagen nahezu ausschließlich von K+S eingesetzt werden, woraus ein gewisses Alleinstellungsmerkmal dieses Kalidüngemittelproduzenten resultiert (▸ Kapitel 1 sowie Abschnitte 4.1 und 6.1). Es ist daher wenig zielführend, im Sinne der beabsichtigten Ableitung des Standes der Technik bei anderen Produzenten nach vergleichbaren Methoden, Verfahren und Anlagen zu suchen. Für das vorliegende Buch wurde aus eben diesem Grunde die Produktion von SOP- beziehungsweise K-Mg-Düngemitteln nur am Rande, die mit anderen Produzenten zumindest mit gewissen Einschränkungen weitgehend vergleichbare MOP-Produktionslinie vordergründig behandelt.

Wie bereits im Kapitel 1 mit Bezug auf die Methodik im Rahmen der hier angestellten Untersuchungen erläutert wurde, sind die vielfältigen Randbedingungen der Kalidüngemittelproduktion weltweit sehr unterschiedlich. Die Bedeutung dieser standortspezifischen, hier insbesondere der lagerstättengeologischen Rahmenbedingungen für die Wahl der Aufbereitungsmethoden, die berg- und verfahrenstechnische Auslegung und den Betrieb der Produktionsanlagen kommt im Zusammenhang mit der Produktion sulfatischer Kalidüngemittel sehr drastisch zum Ausdruck. Andere Randbedingungen, wie sie aus dem Klima, der geografischen Lage, der naturräumlichen Verhältnisse und der industriellen Infrastruktur folgen, sind ebenso wesentliche Einflussfaktoren. All diese entscheiden letztlich darüber, ob eine spezifische Methode oder ein spezielles Verfahren an einem anderen Standort überhaupt technisch oder auch wirtschaftlich machbar und darüber hinaus auch ökologisch vertretbar ist.

Für die Ableitung eines möglichst allgemeingültigen Standes der Technik bei der Kalidüngemittelproduktion müssen deshalb zunächst diese sehr verschiedenartigen Randbedingungen untersucht und in ihren Auswirkungen auf die Wahl der für die Rohstoffgewinnung und -aufbereitung sowie die Produktveredlung angewendeten Methoden, Verfahren und Anlagen diskutiert werden. Das Verständnis und die Würdigung dieser sehr verschiedenartigen Randbedingungen sind daher die wesentlichsten Voraussetzungen überhaupt für die vergleichende Analyse der an den weltweit 71 Standorten betriebenen Methoden, Verfahren und Anlagen. Diese Randbedingungen sollen deshalb im folgenden Kapitel 4 behandelt werden.

84 Das Kalium-Mineral Sylvin (KCl) ist wesentlicher Wertstoffträger der Hartsalze und Sylvinite und enthält 63,2 m% K_2O.

85 Das Kalium-Magnesium-Mineral Carnallit ($KCl \times MgCl_2 \times 6\ H_2O$) enthält 16,9 m% der Wertstoffkomponente K_2O. Seine $MgCl_2$- und Kristallwasser-Anteile sind die maßgebliche Ursache für den Anfall der flüssigen $MgCl_2$-Rückstände

86 Das Magnesiumsulfat-Mineral Kieserit ($MgSO_4 \times H_2O$) wird hauptsächlich zur Herstellung sulfatischer Düngemittel und/oder K-Mg-Düngemittel verwendet.

4 RANDBEDINGUNGEN DER KALIDÜNGEMITTELPRODUKTION

Die bei der Kalidüngemittelproduktion zum Einsatz kommenden Methoden, Verfahren und Anlagen werden in ihrer Anwendbarkeit wie auch hinsichtlich ihrer technischen und ökologischen Effizienz und damit auch in ihrer ökonomischen Attraktivität allein durch die an den verschiedenen Standorten natürlich vorgegebenen und vom Menschen geschaffenen Randbedingungen kontrolliert. Im Folgenden werden die im Einzelnen ausgesprochen verschiedenartigen Randbedingungen der Standorte der Kalidüngemittelproduktion soweit erläutert, wie es für die Diskussion der praktizierten unterschiedlichen Methoden und Verfahren zur Rohstoffgewinnung und -aufbereitung von Wichtigkeit ist.

Der Abschnitt 4.1 erläutert die lagerstättengeologischen Besonderheiten, welche vornehmlich durch den Lagerstätteninhalt kontrolliert werden. Dies betrifft sowohl die Art und Menge der Wertstoffkomponenten, als auch die nicht nutzbaren Beimengungen. Ihre Verteilung unterliegt Gesetzmäßigkeiten, die in vielfältiger Weise durch die Struktur der Lagerstätte vorbestimmt sind. In Abschnitt 4.2 werden hydrogeologische und andere bergbausicherheitliche Randbedingungen erläutert, welche wesentlichen Einfluss auf die Wahl und die Effizienz der Gewinnungsmethoden ausüben. Neben den lagerstättengeologischen Randbedingungen beeinflussen vor allem die klimatischen Verhältnisse an einem konkreten Produktionsstandort die Wahl der möglichen Methoden und Verfahren aber auch die Auslegung der Anlagen zur Gewinnung und Aufbereitung der natürlichen Rohstoffe und zur Produktveredlung, was anschließend im Abschnitt 4.3 dargelegt werden soll. Schließlich sind infrastrukturelle und logistische Randbedingungen zu beachten, die weniger stark von den natürlichen Gegebenheiten an einem konkreten Standort abhängen. Diese sind aber stark von den vom Menschen mit dem Aufbau der Industriekomplexe geschaffenen und in der Folgezeit nur noch bedingt veränderlichen Standortsituationen abhängig, die dann wiederum über die grundsätzliche Anwendbarkeit, über die technische und ökologische Effizienz und über die ökonomische Attraktivität von spezifischen Methoden, Verfahren und Anlagen zur Rohstoffgewinnung und -aufbereitung beziehungsweise zur Produktveredlung und -lagerung entscheiden. Solche Randbedingungen werden im Abschnitt 4.4 behandelt.

H. Rauche, *Die Kaliindustrie im 21. Jahrhundert,*
DOI 10.1007/978-3-662-46834-0_4, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

Daneben üben die für einen konkreten Standort geltenden rechtlichen Rahmenbedingungen, wie sie aus regionalen[87], föderalen beziehungsweise nationalen[88] und territorialen[89] Richtlinien, Anordnungen und Gesetzen folgen, ebenfalls einen Einfluss aus. Während in den vergangenen Jahren solche juristischen Randbedingungen für die Kalidüngemittelproduzenten in der EU zunehmend harmonisiert wurden, bestehen zu den russischen und weißrussischen sowie den kanadischen Regelungen noch immer erhebliche Unterschiede, sowohl hinsichtlich Arbeits- und Bergbausicherheit wie auch des Umweltschutzes.

Die grundsätzliche Anwendbarkeit spezifischer Methoden, Verfahren und Anlagen zur Rohstoffgewinnung und -aufbereitung, aber auch zur Veredlung und Lagerung von Kalidüngemittelprodukten wird von diesen unterschiedlichen Gruppen von Randbedingungen entscheidend beeinflusst. Letztlich bestimmen diese auch die technische und ökologische Effizienz und damit auch ihre ökonomische Attraktivität. Es darf daher nicht verkannt werden, dass eine qualitativ auch noch so hochwertige Lagerstätte samt geschaffener Infrastruktur gegegenenfalls nicht von Nutzen sein kann, wenn sich ändernde rechtliche Rahmenbedingungen eine effektive Gewinnung oder Aufbereitung der natürlichen Rohstoffe und/oder die Entsorgung der dabei anfallenden Rückstände nicht mehr ermöglichen. Für die im Rahmen dieses Buches zur Rede stehende Ableitung des Standes der Technik bei der Kalidüngemittelproduktion sollen solche rechtlichen Rahmenbedingungen jedoch keine weiterführende Diskussion erfahren. Eine kurze Erläuterung der den meisten solcher Richtlinien, Anordnungen und Gesetzen in Deutschland übergeordneten Rechtsnorm, also der angemessenen Sorgfalts- oder Verkehrssicherungspflicht wurde bereits im Kapitel 1 vorgenommen.

Über die an den einzelnen Standorten der Kaliindustrie verschiedenen natürlich vorgegebenen und vom Menschen geschaffenen Randbedingungen geben die STANDORT-STECKBRIEFE in Kapitel 10 Auskunft.

4.1 Lagerstättengeologische Randbedingungen

Die zur Kalidüngemittelherstellung benötigte Wertstoffkomponente ist das Element Kalium, das in der Natur vor allem in Form anorganischer Salze oder auch in silikatischer Bindung zum Beispiel in Glimmer-, Feldspat- oder Tonmineralen vorkommt. Für die Kalidüngemittelproduktion sind heute allein die anorganischen Salze, die auch als Kalisalze bezeichnet werden, von Interesse. Diese Kalisalze kommen einmal in gelöster Form in natürlichen Gewässern als (flüssige) wässrige Lösungen unmittelbar an der Erdoberfläche oder im Porenraum oberflächennaher Sedimente vor. In der Regel weisen diese natürlichen Lösungen relativ geringe Konzentrationen auf. Andererseits treten Kalisalze in (festen) Gesteinen mehr oder minder tief im geologischen Untergrund auf. Diese Vorkommen sind in der geologischen Vergangenheit durch solare Evaporation wässriger Lösungen, mehrheitlich des ozeanischen Wassers, seltener kontinentaler Seen entstanden. In Verbindung mit anderen Salzen bilden diese natürlichen chemischen Sedimente Hunderte bis Tausende Meter mächtige Gesteinsformationen, welche über geologische Zeiträume durch andere Sedimente überdeckt und dadurch vor dem Einfluss von Niederschlägen oder auch zirkulierender Grundwässer und somit vor ihrer Wiederauflösung geschützt wurden.

Hinsichtlich des Stoffbestandes sind 2 Haupttypen von festen Kalisalzlagerstätten zu unterscheiden, die auch hinsichtlich einer vergleichenden Analyse der Wertstoffinhalte wesentlich sind: der Sulfattyp und der Chloridtyp. Der Sulfattyp ist durch das Auftreten von Mineralen mit Magnesium und Kalium in sulfatischer Bindung (SO_4) charakterisiert (Valjashko 1961, /1056/; Wardlaw & Hartzell 1963, /1091/; Butler 1969, /140/; Hsü 1972, /419/; Petrichenko 1973, /751/; Petrichenko 1979, /750/; Kovalevich 1975, /549/; 1976, /550/; Schreiber & Hsü 1980, /893/; Hite 1983, /395/; Sonnenfeld 1984, /959/; Hardie 1990, /370/; 1991, /371/; Sun & Lock 1990, /992/; Ayora, Garcia-Veigas & Pueyo 1994, /44/; Yang, Spence & Krouse 1995, /1147/; Ghazi 2000, /328/; Warren 2009, /1095/). In seiner normativen Zusammensetzung spiegelt dieser Typ etwa die chemische Zusammensetzung des heutigen Meerwassers wider (Roedder & Skinner 1968, /847/; Herrmann 1979, /390/; Roedder 1984, /846/; Horita & Matsuo 1986, /414/; Borstel & Knippig 1991, /122/; Grishina & Knipping 1995 /351/; Roberts & Spencer 1995, /844/; Benison & Goldstein 1999, /91/; Timofeeff, Blackburn & Lowenstein 2000, /1010/; Goldstein 2001, /340/; Lowenstein et al. 2001, /604/; Siemann & Ellendorff 2001, /931/; Timofeeff et al. 2001, /1011/; Warren 2009, /1095/).

87 Für einen deutschen Produktionsstandort sind dies die rechtlichen Rahmenbedingungen der EU.

88 Für einen deutschen Produktionsstandort sind dies die rechtlichen Rahmenbedingungen der Bundesrepublik Deutschland.

89 Für einen deutschen Produktionsstandort sind dies die rechtlichen Rahmenbedingungen des Landes, in dem sich der Standort befindet.

Dem überwiegenden Teil der heute bekannten Kalisalzlagerstätten fehlen solche sulfatischen K-Mg-Minerale jedoch, da es im Zuge der Evaporation des Meerwassers bereits zu stofflichen Verschiebungen infolge bakterieller SO_4-Reduktion und/oder des $CaCl_2$-Eintrages in das Evaporationsbecken durch Zustrom meteorischer Wässer kam.

Überhaupt verlief die Evaporation in den oftmals Tausende Quadratkilometer großen Sedimentationsbecken räumlich nicht homogen und auch zeitlich recht asynchron (Valjashko 1961, /1056/; Schreiber & Hsü 1980, /893/; Notholt 1983, /716/; Warren 2009, /1095/; 2015, /1096/). Darüber hinaus kam es beckenweit aber auch zu synchronen Trans- und Regressionsereignissen, die in den Evaporiten heute lithologisch und strukturell manifestiert sind. Die sogenannten Tonlöser, also gering mächtige Lagen aus Tonmineralen zeugen vom Eintrag feinklastischer Sedimentströme in das flachmarine Evaporationsbecken. Sie stellen markante Trennflächen im Gesteinsverband dar, denen wesentliche Bedeutung für die First- und Stoßsicherheit bei der Bergmännischen Gewinnung zukommt, und beeinflussen nicht zuletzt auch den Aufwand und die Effizienz für die Soltechnische Gewinnung oder aber der Aufbereitung mittels Flotation.

Im Verlauf ihrer geologischen Entwicklungsgeschichte sind die Kalisalze in den Lagerstätten durch frühe diagenetische Prozesse im Ablagerungsraum, durch Temperaturerhöhung infolge wachsender Versenkung durch Überlagerung von anderen Sedimenten (Thermometamorphose), vor allem aber durch migrierende fluide Phasen (Hydrometamorphose) in vielfacher Weise verändert worden (Stolle 1961, /982/; Clark & Schwerdtner 1965, /159/; Döhner 1970, /202/; Döhner & Elert 1975, /204/; Knipping 1988, /532/; 1992, /534/; Knipping & Türck 1992, /535/; Knipping, Siemann & Herrmann 1992, /536/; Döhner 2001, /203/).

Im Zuge des tertiären Basaltvulkanismus erfolgte zum Beispiel im Werra-Kalirevier die Umwandlung des primären Carnallitit in einen wertstoffreichen Sylvinit über einen hydrothermal (Hydrometamorphose) und thermisch (Thermometamorphose) induzierten Umbildungsprozess, bei dem fluide Phasen (Salzlösungen, Gase) eine wesentliche Rolle spielten (Konitz & Schäbitzer 1964, /546/; Koch & Oettel 1969, /540/; Koch 1978, /539/; Koch & Vogel 1980, /541/; Knipping 1989, /533/; Borstel & Knipping 1990, /121/; Jahne & Pader 1994, /450/; Kovalevich & Peryt 1995, /551/; Jahne & Zeibig 2001, /451/; 2002, /452/). Dies war mit einer erheblichen Volumenreduzierung verbunden, die je nach Carnallit-Gehalt der primären Salzgesteine bis zu 50 Prozent betragen kann, was zu einer Auflockerung des Gesteinsgefüges führte. Damit verbunden, kam es zur Einspeicherung der an diesen Prozessen beteiligten fluiden Phasen (Salzlösungen, Gase) im Poren- und/oder Kluftvolumen. Allein dieser für alle heute in Abbau stehenden Kalilagerstätten einmalige Prozess hat derart schwierige lagerstättengeologische Randbedingungen für den Bergbau geschaffen, dass es seit der Frühzeit der bergmännischen Nutzung der Werra-Lagerstätte bis in die jüngste Vergangenheit große Anstrengungen zur Beherrschung der damit verbundenen Gefahren bedurfte und es trotzdem nicht vollständig gelungen ist, Unfälle zu vermeiden.

Mineralbestand und Gefüge der Kalisalzgesteine entsprechen daher in den seltensten Fällen denen des Sedimentationsraumes. Während im Bereich der geotektonisch stabilen Tafeln die Kalilagerstätten auch nach Hunderten von Millionen Jahren noch weitgehend ungestört und ruhig gelagert sind (Kühnel 1953, /569/; Reed 1962, /821/; Peirce & Gerrard 1965, /740/; Hite 1973, /394/; Mayrhofer 1983, /627/; Prugger et al. 2002, /782/; Kuznetsov 2006, /576/; Halabura & Hardy 2007, /364/; Halabura 2009, /363/; Labbe & Kelly 2009, /579/; Yang, Jensen & Berenyi 2009, /1146/), haben die tektonischen Prozesse anderenorts zu intensiven Lagerungsstörungen in Form von Falten, Abscherungen, Großboudinagen oder auch bis hin zu Diapiren geführt (Kityk et al. 1971, /525/; Zänker 1974, /1152/; Jahne, Voitel & Haase 1983, /453/; Waugh & Urquhart 1983, /1098/; Nachsel & Franz 1983, /698/; Webb & Barnett 1986, /1103/; Tarasov, Garkushin & Globa 1987, /1000/; Rauche & Schwandt 1988, /808/; Rauche 1990, /794/; Jockel & Rauche 2000, /458/; Rauche 2004, /798/; Czapowski, Bukowski & Poborskha-Mlynarska 2009, /177/; Petrova et al. 2010, /752/; Pozdeev et al. 2014, /773/). Besonders diese stofflichen und strukturellen Umbildungsprozesse sind für die Herausbildung sehr individueller und stets standortspezifischer Rahmenbedingungen vor allem für die Gewinnung, weniger auch für die Aufbereitung der Kalisalze verantwortlich. Nicht selten entscheiden diese Randbedingungen allein darüber, ob eine Kalilagerstätte überhaupt beziehungsweise mit welchem ökonomischen Nutzen sie abgebaut und ihre Rohstoffe zu verkaufsfähigen Fertig- und Nebenprodukten aufbereitet werden können. Solche Aspekte sind bei der Bewertung einer Kalilagerstätte zwingend zu berücksichtigen (Jockel & Rauche 2000, /458/; Rauche & Grüschow 2000, /805/; Rauche 2004, /798/; Halabura & Hardy 2007, /364/), entscheiden sie doch letztlich darüber, wie groß die Differenz zwischen Menge oder dem Volumen der Geologischen Vorräte[90] und der Gewinnbaren Vorräte ist (▸ Box 4.1). Abbildung 12 zeigt eine Auswahl typischer Kalisalzgesteine, wie sie als Rohstoffe für die Kalidüngemittelindustrie abgebaut werden.

90 In diesem Buch werden – soweit im Einzelfall nicht anders angegeben – die Definitionen der mineralischen Vorräte und der Vorratsklassen nach dem kanadischen CIM Code genutzt (CIM 2010, /158/).

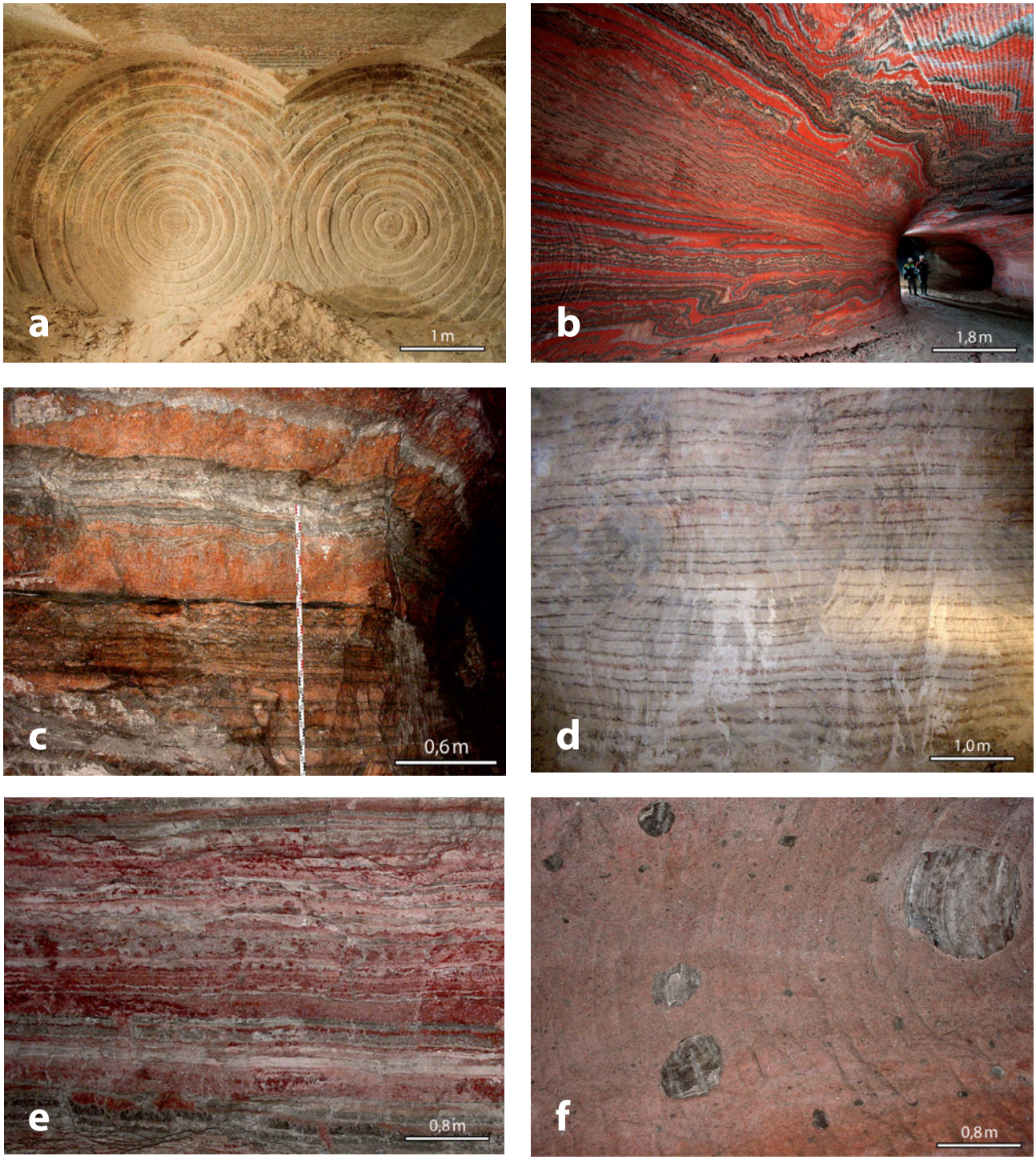


Abbildung 12 Auswahl typischer Kalisalzgesteine, wie sie als feste Rohstoffe zur Kalidüngemittelproduktion gewonnen wurden oder heute beziehungsweise zukünftig werden: a – Sylvinit im Kalilager Esterhazy (Prairie Evaporite Formation, Mittleres Devon), Saskatchewan, Kanada, mit einem Wertstoffgehalt von 22 m% K_2O; b – Sylvinit im Kalilager Krasnyj II (Kungur, Unteres Perm), Obere Kama, Russland, mit einem Wertstoffgehalt von 20 m% K_2O; c – Hartsalz im Kalilager Staßfurt (Zechstein 2, Oberes Perm), ehemaliges Südharz-Kalirevier, Deutschland, mit einem Wertstoffgehalt von 11 m% K_2O und 6 m% $MgSO_4$; d – Hartsalz im Kalilager Hessen (Zechstein 1, Oberes Perm), Werra-Kalirevier, Deutschland, mit einem Wertstoffgehalt von 8 m% K_2O und 11 m% $MgSO_4$; e – Carnallitit im Kalilager Staßfurt (Zechstein 2, Oberes Perm), ehemaliges Südharz-Kalirevier, Deutschland, mit einem Wertstoffgehalt von 9 m% K_2O; f – Carnallitit in der Maha Sarakham Formation (Obere Kreide), Sakhon-Nakon-Becken, Thailand, mit einem Wertstoffgehalt von 9 m% K_2O [Mit freundlicher Genehmigung für Foto a von Martin Mraz, Prag, Tschechische Republik; für Foto b von PAO Uralkali, Berezniki, Russland; für Foto d von K+S KALI GmbH, Kassel, Deutschland]

BOX 4.1

Geologische Vorräte und Gewinnbare Vorräte

Wie in anderen Branchen der Bergbauindustrie ebenfalls, ist bei der Gewinnung von Kalirohstoffen zwischen den Geologischen Vorräten und den Gewinnbaren Vorräten zu unterscheiden. Nach international gebräuchlichen, heute meist aus dem angelsächsischen Raum entlehnten Klassifikationsprinzipien, wie zum Beispiel dem des CANADIAN INSTITUTE OF MINING, METALLURGY AND PETROLEUM (CIM), können diese hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit ihres Vorhandenseins in Teilmengen abgegrenzt werden:

Kategorien Geologischer Vorräte

Geologische Vorräte (aus dem Englischen: *mineral resource*) werden mit zunehmendem geologischem Kenntnisstand in die Kategorien *inferred*, *indicated* und *measured* unterteilt. Geologische Vorräte der Kategorie *inferred* können im Vergleich zu Geologischen Vorräten der Kategorie *indicated* anhand weniger vorhandener geologischer Daten identifiziert werden. Geologische Vorräte der Kategorie *indicated* wiederum basieren auf weniger geologischen Daten als Geologische Vorräte der Kategorie *measured*. Der Begriff Geologische Vorräte umfasst Mineralisationen und natürliche Rohstoffe von ökonomischem Wert, welche durch Erkundungsmaßnahmen sowie entsprechende Probenahmen identifiziert und bewertet wurden. Durch weiteren Erkenntniszuwachs und unter Berücksichtigung und Anwendung von technischen, wirtschaftlichen, rechtlichen, ökologischen, sozioökonomischen und behördlichen Faktoren können diese zu den Gewinnbaren Vorräten klassifiziert werden.

Kategorien Gewinnbarer Vorräte

Den Geologischen Vorräten werden die Gewinnbaren Vorräte (aus dem Englischen: *mineral reserve*) als eine Teilmenge der ersteren gegenübergestellt. Gewinnbare Vorräte werden je nach dem der Bewertung zugrunde liegenden Kenntnisstand in die Kategorien *probable* und *proven* unterteilt. Gewinnbare Vorräte der Kategorie *probable* basieren auf einem niedrigeren Kenntnisstand der geologischen Rahmenbedingungen als Gewinnbare Vorräte der Kategorie *proven*. Gewinnbare Vorräte sind der wirtschaftlich abbaubare Teil der Geologischen Vorräte der Kategorien *measured* oder *indicated*, was mindestens durch eine vorläufige Machbarkeitsstudie (aus dem Englischen: *Preliminary Feasibility Study*) nachgewiesen sein sollte. Diese Studie muss angemessene Informationen zu Abbau-, Aufbereitungs-, wirtschaftlichen und anderen bergbausicherheitlich relevanten Faktoren beinhalten, die demonstrieren, dass eine Gewinnung der Vorräte zum Zeitpunkt der Berichterstattung wirtschaftliche gerechtfertigt werden kann. Gewinnbare Vorräte berücksichtigen Vertaubungszonen sowie Abbauverluste.

Die Rolle von Sachverständigen bei der Vorratsbewertung

Gewinnbare Vorräte sind der Teil der Vorräte, welche unter Anwendung aller Abbauparameter zu einer errechneten Tonnage und einem errechneten Wertstoffgehalt führen, die unter Berücksichtigung aller relevanten Aufbereitungs-, wirtschaftlichen, marktrelevanten, rechtlichen, ökologischen, sozioökonomischen und behördlichen Faktoren nach Meinung des/der verantwortlichen Sachverständigen (aus dem Englischen: *Qualified Person*) die Grundlage eines wirtschaftlich machbaren Projektes bilden. Gewinnbare Vorräte berücksichtigen Vertaubungszonen, welche gemeinsam mit den Vorräten abgebaut und an eine Aufbereitungsanlage geliefert werden. Der Begriff der Gewinnbaren Vorräte schließt nicht zwangsläufig ein, dass die Abbauvorrichtungen schon vorhanden oder in Betrieb genommen sind oder dass alle behördlichen Genehmigungen vorliegen, jedoch besagt seine Verwendung bereits, dass es begründete Erwartungen für derartige Genehmigungen gibt.

Sowohl die gering wertstoffhaltigen natürlichen Lösungen, vor allem aber die festen Kalisalze sind heute Rohstoffquellen für die Kalidüngemittelproduktion (▸ Abbildung 13). Die natürlichen Lösungen weisen Wertstoffgehalte zwischen 0,5 und 5 Prozent KCl auf (Garrett 1969a, /312/; Neitzel 1971, /703/; Behrens 1980, /84/; Jianqi, Chengyu & Keqin 1983, /457/; Zhiqiang & Zhiqiang 1983, /1155/; Sonnenfeld 1984, /959/; Sun & Lock 1990, /992/; Amira et al. 1992, /20/; Dapeng & Bingxiao 1992, /182/; Liu et al. 2008, /599/; Hao et al. 2014, /369/). Diese geringen Wertstoffkonzentrationen sind letztlich der Grund dafür, dass solche Lagerstätten natürlicher Lösungen nur dort für eine wirtschaftliche Nutzung interessant sind, wo die klimatischen Randbedingungen (▸ Abschnitt 4.3) die Anwendung solarer Evaporation und/oder Kühlungskristallisation zur Erzeugung von höher konzentrierten technischen Lösungen und/oder Kristallisaten als Zwischenprodukte für die Weiterverarbeitung erlauben.

Im Gegensatz zu den natürlichen Kalium-haltigen Lösungen weisen die festen Kalisalzlagerstätten deutlich höhere Wertstoffanteile auf, da bereits mit ihrem geologischen Bildungsprozess im Zuge der Evaporation eine Wertstoffkonzentration stattgefunden hat. Untereinander zeigen aber auch sie erhebliche Unterschiede bezüglich der Wertstoffinhalte (▸ Abbildung 13), die ihre Ursache vor allem in den zwischen Sulfat- und Chloridtyp verschiedenartigen Bedingungen im Sedimentationsraum haben (Stolle 1961, /982/; Shock & Davis 1969, /927/; Hite 1983, /395/; Waugh & Urquhart 1983, /1098/; Webb & Barnett 1986, /1103/; Tarasov, Garkushin & Globa 1987, /1000/; Sonnenfeld 1991, /960/; 1992, /961/; 2000, /962/; Shuai 1992, /929/; Zhang, Gen & Wang 2001, /1154/), aber auch in postdiagenetischen Überprägungen der Lagerstätte begründet sind (Braitsch 1962, /123/; Valjashko 1962, /1057/; Keys & Wright 1965, /516/; Mayhew 1965, /626/; Boehner 1983, /112/; Hardie 1990, /370/; 1991, /371/; Warren 1999, /1093/; 2000, /1094/). Auch innerhalb einer Lagerstätte sind die Wertstoffgehalte oftmals räumlich sehr stark veränderlich (Pierce & Anderson 1942, /761/; Lotze 1957, /603/; Pearson 1962, /739/; Pendery 1969, /744/; Shea 1969, /925/; Matthews & Egleson 1973, /625/; Mayrhofer 1983, /627/; Rauche & Grüschow 2000, /805/; van der Klauw & Grüschow 2007, /1058/), was insbesondere auch für die deutschen Kalilagerstätten charakteristisch ist (Baar 1944, /45/; 1945, /46/; 1952, /47/; Richter-Bernburg 1953, /839/; Stolle 1961, /982/; Gimm 1968, /331/; Mayrhofer 1983, /627/; Käding 1995, /494/; Doehner & Elert 1975, /204/; Beer 1996, /83/).

Die Struktur der Lagerstätte ist eine andere bedeutsame Randbedingung, die besonders die grundsätzliche Anwendbarkeit, die technische und ökologische Effizienz und die ökonomische Attraktivität der Methoden, Verfahren und Anlagen zur Rohstoffgewinnung beeinflusst (Kühnel 1953, /569/; Elston & Shoemaker 1962, /236/; McWhorter 1962, /629/; Pearson 1962, /739/; Keys & Wright 1965, /516/; Linn 1965, /598/; Gimm 1968, /331/; Jendersie 1969,

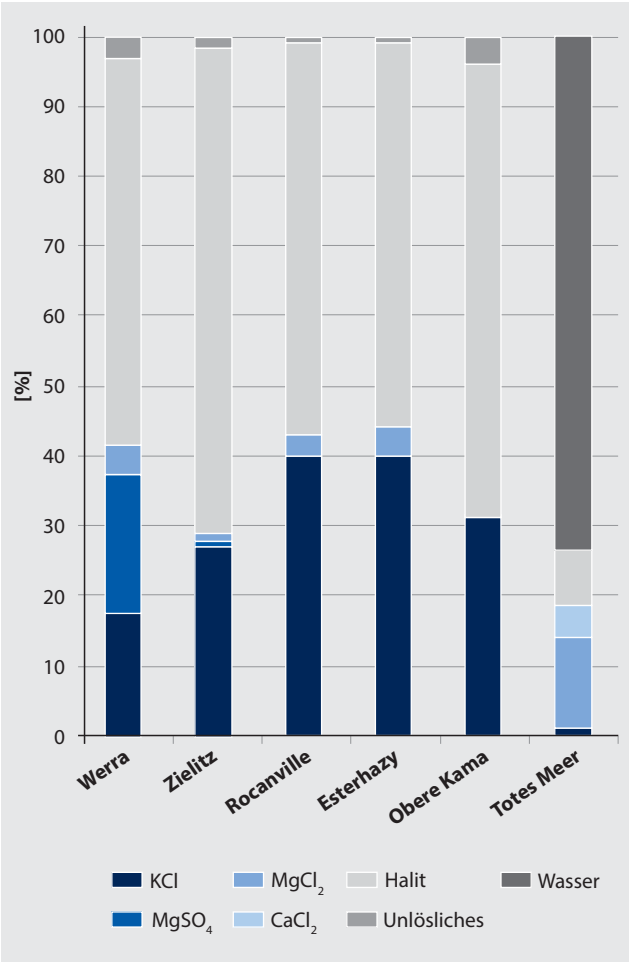


Abbildung 13 Wertstoffinhalte ausgewählter fester Kalisalz-Lagerstätten in Deutschland, Kanada und Russland sowie der natürlicher Lösungen des Toten Meeres

/454/; Evans & Linn 1970, /262/; Kityk et al. 1983, /524/; Baar 1973, /52/; Zänker 1974, /1152/; Boehner 1983, /112/; Kityk et al. 1983, /524/; Kurtanjek 1983, /573/; Mayrhofer 1983, /627/; Webb & Barnett 1986, /1103/; Rauche & Schwandt 1987, /807/; Rauche 1988, /793/; 1990, /794/; 2004, /798/; Rauche & Grüschow 2000, /805/; Jockel & Rauche 2000, /458/; Döhner, Heynke & Rauche 2003, /205/; Czapowski, Bukowski & Poborska-Mlynarska 2009, /177/; Halabura 2009, /363/; Hughes 2012, /422/). Traditionell wird die Struktur der Lagerstätte durch die vom deutschen Kalibergbau geprägten Begriffe Flache Lagerung und Steile Lagerung umschrieben. Diese Termini beziehen sich auf das Einfallen der in der Regel lithostratigrafisch definierten Kalisalzlager, also ihren mittleren Neigungswinkel gegenüber der Horizontalen. Ursprünglich wurden dadurch die subhorizontalen Lagerungsverhältnisse, wie sie etwa im Werra- oder im Südharz-Kalirevier vorkommen, von den aus den Revieren Hannover, Nordharz und Südwest-Mecklenburg her bekannten, steilen Flanken der Salzdiapire und Salzantiklinalen unterschieden.

Die deutschen Lagerstätten weisen auch hinsichtlich der Lagerungsverhältnisse gewisse Besonderheiten auf: Während die Lagerstätten der Flachen Lagerung an der Oberen Kama in Russland (Irensk-Folge, Unteres Perm), in der Pripyat-Senke in Belarus (Oresskij-Folge, Oberes Devon) und auch im Westkanadischen Becken in Saskatchewan (*Prairie Evaporite Formation* der *Elk Point Group*, Mittleres Devon) tatsächlich über Zehner Kilometer hinweg annähernd horizontal gelagert sind, treten in den ebenfalls der Flachen Lagerung zugehörigen Kalilagerstätten des Südharz- und Werra-Kalireviers (Zechstein, Oberes Perm) auch Abschnitte auf, in denen die gesamte salinare Schichtenfolge zwar subhorizontal gelagert ist, das oder die Kalilager jedoch auch steiles bis vertikales Einfallen aufweisen können.

Der bergmännische Gewinnungshorizont folgt in der Regel dem lithostratigrafisch definierten Kalisalzlager, soweit dies berg- und maschinentechnisch möglich ist. Je nach Mächtigkeit und Wertstoffverteilung nutzt er Teile dieser geologischen Einheit (selektive Gewinnung) oder muss hangende und/oder liegende, gering- oder nicht mineralisierte Gesteinsschichten mit abbauen, um die für die Gewinnungsausrüstungen erforderliche Mindesthöhe herzustellen und/oder um maximal zulässige Neigungen nicht zu überschreiten. Dabei kommt es zur sogenannten Verdünnung, das heißt der Wertstoffgehalt des Lagerstättenhorizontes wird durch das beibrechende wertstoffarme oder -freie Material im Fördergut verdünnt. Es liegt auf der Hand, dass daher für diese beiden strukturellen Formen einer Kalisalzlagerstätte, ähnlich wie im Kohlebergbau auch, gänzlich verschiedene bergmännische Abbauverfahren zur Anwendung kommen müssen (▸ Abschnitt 5.1.1). Dem Prinzip nach gilt dies ebenso bei der Soltechnischen Gewinnung (▸ Abschnitt 5.1.2).

Der bei weitem überwiegende Anteil von etwa 97 Prozent der heute in Verhieb befindlichen festen Kalisalzlagerstätten weist eine Flache Lagerung auf, wo das Generaleinfallen der Kalisalzlager im Normalfall weniger als 10° beträgt.

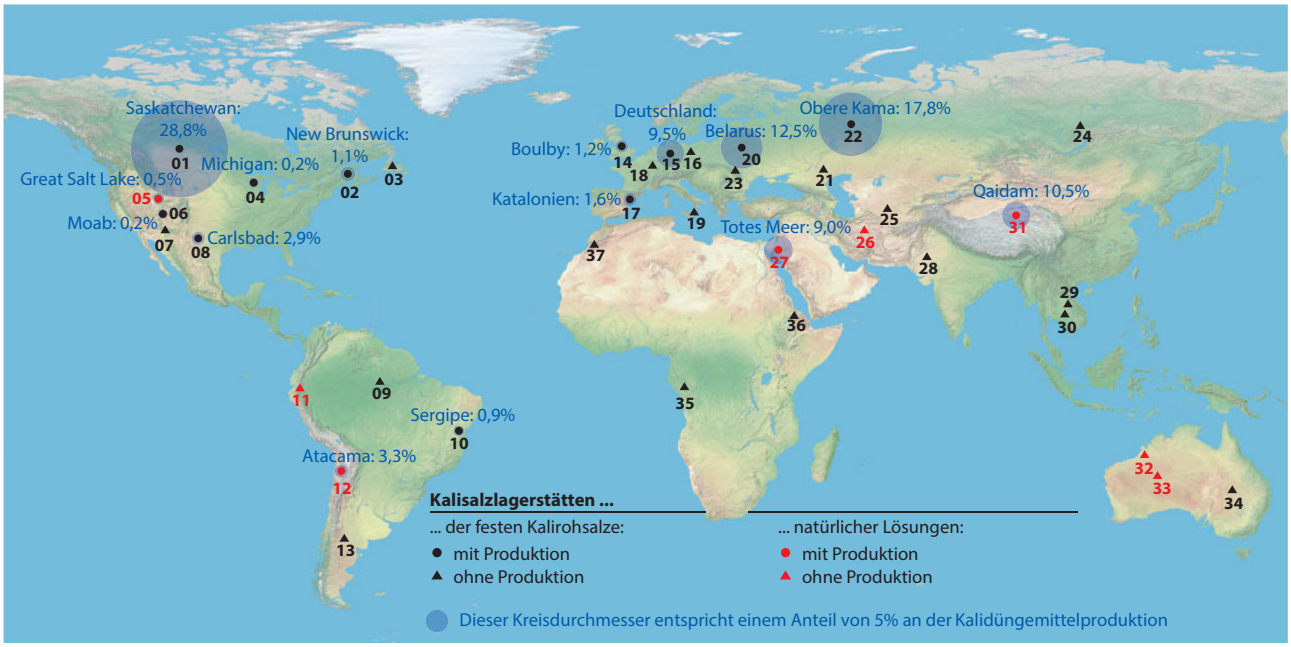
Neben dem strukturellen Bau der Kalisalzlagerstätte selbst, kommt auch der tektonischen Zerteilung der prä- und postsalinaren Gesteinskomplexe insbesondere für hydrogeologische und andere bergbausicherheitlich relevante Fragestellungen große Bedeutung zu (Gendzwill & Martin 1996, /319/; Bankwitz et al. 1995, /61/; Prugger & Prugger 1991, /787/; Spackeler 1957, /966/; Gimm 1968, /331/; Jendersie 1969, /454/; Franzke & Rauche 1988, /283/; Franzke & Rauche 1991, /284/; Prugger et al. 2002, /782/; Krasnostein 1995, /555/; 1999b, /557/; Baryakh 2001a, /68/; 2001c, /70/; Rauche & Franzke 1991, /803/; 1992, /804/; Franzke et al. 1991, /285/, MDPA 2004c, /633/).

Die heute bekannten Kalilagerstätten sind in Abbildung 14 aufgeführt. Darin sind auch die in Verhieb stehenden Lagerstätten mit ihren relativen Anteilen an der Kalidüngemittelproduktion für das Jahr 2014 dargestellt. Die Tabelle 7 stellt die heute in Verhieb befindlichen Lagerstätten ausführlicher vor, gibt deren geologisches Alter sowie die stratigrafische Position der einzelnen kalisalzführenden Schichtenfolgen und wiederum die Anteile an der heutigen Weltkaliproduktion wieder.

Tabelle 7 Zurzeit in Abbau stehende Kalilagerstätten und deren Anteil an der Weltkaliproduktion im Jahr 2013

Lagerstätte	Kalilager	Stratigrafie	Region und deren Anteil an der Weltkaliproduktion [%]	
Lagerstätten fester Kalirohsalze				
Westkanadisches Becken	Esterhazy Member, Belle Plaine Member, Patience Lake Member	Prairie Evaporite Formation, Elk Point Group, Givet, Mittleres Devon	Saskatchewan, Kanada	28,1
Obere Kama	Kalilager Krasnyj II, Kalilager AB, Kalilager W	Irensk-Folge, Kungur, Unteres Perm	Region Perm, Russland	17,4
Pripyat Becken	Kalilager III, II und I	Oresski-Folge, Fammennian, Oberes Devon	Minskaja Woblasz, Belarus	12,2

Lagerstätte	Kalilager	Stratigrafie	Region und deren Anteil an der Weltkaliproduktion [%]	
Zechstein Becken	Kalilager Thüringen und Kalilager Hessen	Werra-Folge, Zechstein, Oberes Perm	Thüringen und Hessen, Deutschland	
	Kalilager Staßfurt	Staßfurt-Folge, Zechstein, Oberes Perm	Thüringen und Niedersachsen, Deutschland	11,5
	Kalilager Ronnenberg	Leine-Folge, Zechstein, Oberes Perm	Niedersachsen und Sachsen-Anhalt, Deutschland	
	Boulby Potash Bed	Teeside Group, Zechstein, Oberes Perm	Borough of Redcar and Cleveland, Großbritannien	
Delaware Becken	McNutt Member	Salado Formation, Ochoan, Oberes Perm	New Mexico, USA	3,0
Navarra-Katalonisches Becken	Capa A und B	Cardona Formation, Mittleres Tertiär	Katalonien, Spanien	1,6
Moncton Sub-Becken des Atlantic Maritime Beckens	Kalilager A, B, C und D	Cassidy Lake Formation, Windsor Group, Unteres Karbon	New Brunswick, Kanada	1,1
Sergipe Becken	Ibura Member	Muribeca Formation, Untere Kreide	Sergipe, Brasilien	0,8
Paradox Becken	Paradox Member	Hermosa Formation, Pennsylvanian, Oberes Karbon	Utah, USA	0,2
Michigan Becken	Evaporite Member	Salina Group, Oberes Silur	Michigan, USA	0,2
Buchara Becken	Unteres Kalilager, Nizhny II	Gaurdak Folge, Oberes Jura	Kashkadarya Region, Usbekistan	0,3
Lagerstätten natürlicher Kalium-haltiger Lösungen				
Qaidam Becken	Oberflächen- und Porenwässer	Quartär	Qinghai Provinz, China	10,9
Totes Meer	Oberflächenwässer	Quartär	Südbezirk, Israel und Gouvernement al-Karak, Jordanien	8,8
Salar de Atacama	Porenwässer	Quartär	Antofagasta, Chile	3,3
Great Salt Lake	Oberflächen- und Porenwässer	Quartär	Utah, USA	0,6



01 Westkanadisches Becken
02 Moncton Sub-Becken
03 Maritime Becken
04 Michigan Becken
05 Great Salt Lake
06 Paradox Becken
07 Hoolbrook Becken
08 Delaware Becken
09 Amazonas Becken
10 Sergipe Becken
11 Sechura Becken
12 Salar de Atacama
13 Nequen Becken
Zechstein Becken:
14 North Yorkshire
15 Deutschland
16 Polen
17 Navarra-Katalonisches Becken
18 Oberrhein Becken
19 Zentralsizilianisches Becken
20 Pripyat Becken
21 Peri-Kaspisches Becken
22 Oberes Kama Becken
23 Becken der Karpaten-Vortiefe
24 Nepsko Gaschensky Becken
25 Buchara Becken
26 Dasht e Khavir
27 Totes Meer
28 Naguar-Ganganagar Becken
29 Sakon Nakhon Becken
30 Khorat Becken
31 Qaidam Becken
32 Canning Becken
33 Lake Disappointment
34 Adavale Becken
35 Kongo-Gabon Becken
36 Danakhil Senke
37 Meseta Becken

Abbildung 14 Globale Verteilung der heute bekannten Kalilagerstätten und prozentuale Anteile der in Gewinnung stehenden an der Weltkaliproduktion 2014

Die nach heutigem Stand der Technik wirtschaftlich mittels Bergmännischer oder Soltechnischer Gewinnungsverfahren Geologischen Vorräte fester Kalirohsalze im geologischen Untergrund dürften einen Wertstoffinhalt zwischen 190 und 230 Milliarden Tonnen K_2O aufweisen. Ihre globale Verteilung ähnelt dem Bild der heute in Verhieb befindlichen Kalilagerstätten sehr (▸ Abbildung 15). Diese an sich schon riesigen Ressourcen an festen Rohsalzen würden sich weiter erhöhen, sobald ein signifikant höheres Preisniveau für die Kalidüngemittelprodukte besteht und somit geringere Grenzgehalte für die Bauwürdigkeit und/oder auch größere Lagerstättenteufen keine ökonomischen Schranken darstellen.

Deutlich geringer sind hingegen die Wertstoffinhalte der heute wirtschaftlich gewinnbaren Vorräte an natürlichen Kalium-haltigen Lösungen in kontinentalen Oberflächengewässern oder Porenwässern oberflächennaher Grundwasserleiter, welche die Größenordnung von 2 Milliarden Tonnen K_2O nicht überschreiten dürften. Bei dieser Bilanz ist jedoch auch zu berücksichtigen, dass ein Teil dieser Vorräte auch eine jährliche Erneuerung erfährt, dieser Teil der Ressourcen also gewissermaßen "nachwächst". Vor allem die festen Kalirohsalze repräsentieren also einen Massenrohstoff, dessen Verfügbarkeit auf lange Sicht gewährleistet ist. Dies ist ein wesentlicher Grund dafür, dass die industrielle Produktion von Kalidüngemitteln auf Grundlage von Mineralsalzen seit mehr als 150 Jahren nicht von ernsthaften Substitutionsbestrebungen betroffen war, obgleich in jüngster Zeit verschiedentlich auch früher bereits diskutierte silikatische Kalium-Rohstoffe, wie zum Beispiel kalifeldspatreiche Granite und Rhyolithe, Alunite oder auch glaukonitreiche Verwitterungsprodukte kristalliner Gesteine in Südamerika und Australien bei den Projektideen eine Renaissance erleben.

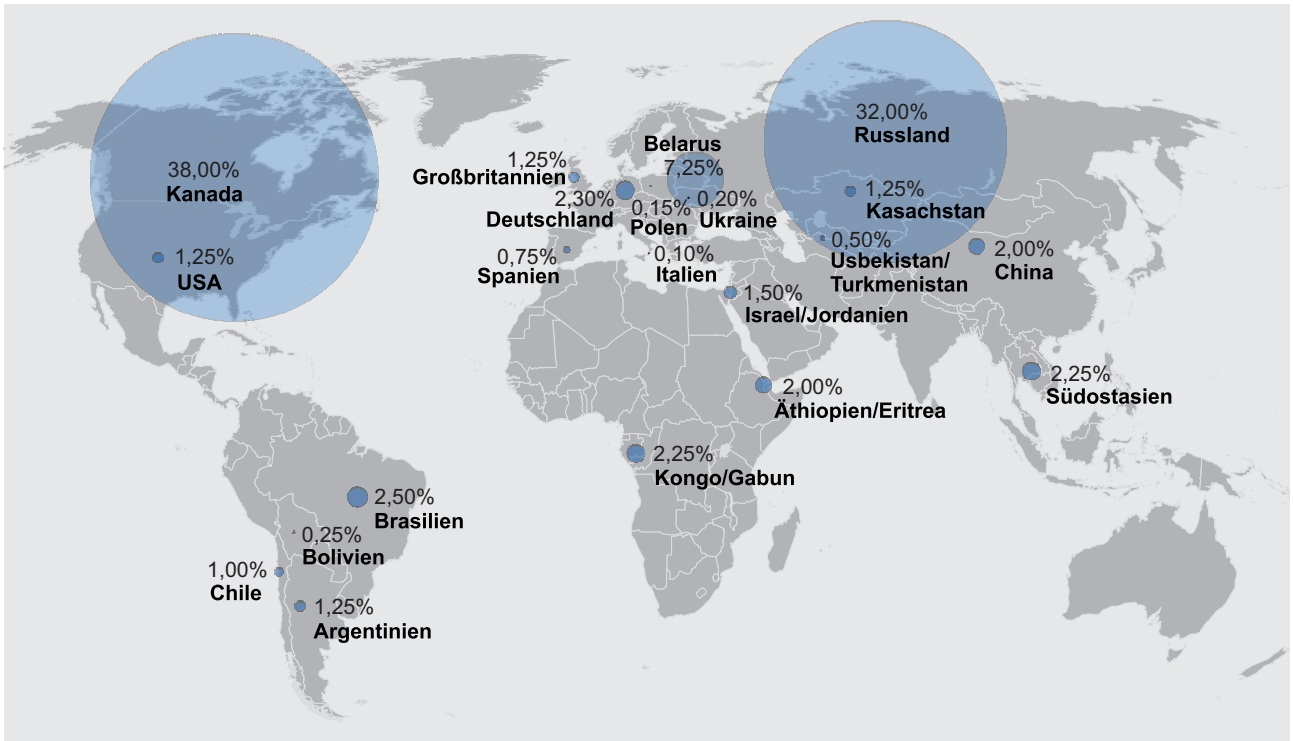


Abbildung 15 Globale Verteilung der heute abschätzbaren Geologischen Vorräte an Rohstoffen für die Kalidüngemittelproduktion

4.2 Hydrogeologische und andere bergbausicherheitliche Randbedingungen

Bei der Bergmännischen und der Soltechnischen Gewinnung fester Kalisalzlagerstätten sind die örtlichen hydrogeologischen Randbedingungen wesentliche Einflussgrößen für die Planung der Erkundungs- oder Förderbohrungen, für das Schachtabteufen bis hin zur Gewinnungsmethode und zur räumlichen Anordnung sowie zur Dimensionierung der zu schaffenden untertägigen Hohlräume (Kühnel 1953, /569/; Spackeler 1957, /966/; Gimm 1968, /331/; Storck 1968, /983/; Jendersie 1969, /454/; Baar 1973, /52/; Kruger 1973, /562/; Cleasby et al. 1975, /160/; LRP 2007, /606/; Duchrow 1990, /212/; Warren 2000, /1094/; Oellers, Moniquet & Koshurnikov 2014, /720/). Aufgrund der Wasserlöslichkeit des Lagerstätteninhaltes und der ihn begleitenden Evaporitgesteine muss während des Betriebes und auch während der Nachbetriebsphase ein wirksamer Schutz dieser Horizonte gegenüber zirkulierenden Grundwässern garantiert werden. Im jungfräulichen Gebirge waren die Evaporite durch impermeable Barrieren aus wasserundurchlässigen Schutzschichten (s. g. Grundwasser-Hemmer oder -Nichtleiter) oft über Hunderte Millionen Jahre vor dem Zutritt nennenswerter Mengen von Grundwasser geschützt. Bereits mit der Lagerstättenerkundung, vor allem aber mit dem für die Bergmännische Gewinnung erforderlichen Schachtabteufen oder auch mit dem Niederbringen von Förderbohrungen bei der Soltechnischen Gewinnung werden diese hydrogeologischen Schutzschichten perforiert. Die grundsätzliche Machbarkeit, vor allem aber die technischen Anforderungen an diese Bohr- und Teufarbeiten und die notwendigen Abdichtungsmaßnahmen werden letztlich von den lokalen hydrogeologischen Randbedingungen kontrolliert.

Hinzu kommt die Tatsache, dass mit dem durch die Gewinnung selbst geschaffenen Hohlraum ein Verformungsprozess im Gewinnungshorizont und dem umlagernden Gebirgsmassiv initiiert wird (Baar 1965, /48/; 1969, /49/; Döring, Heinrich & Pforr 1965, /208/; Menzel & Schreiner 1977, /642/; 1978, /643/; Jones & Prugger 1982, /461/; Mraz & Jones 1986, /689/; Minkley 1997, /660/; 2004, /663/; Menzel, Minkley & Salzer 2000, /645/; Baryakh 2001c, /70/; 2001e, /72/; Günther & Salzer 2007, /357/; Minkley & Mühlbauer 2007, /666/), in dessen Folge es ebenfalls nicht zu hydraulischen Kurzschlüssen mit den grundwasserführenden Schichten kommen darf. Seit der Frühzeit der Kaliindustrie sind jedoch solche dadurch verursachten Ersaufensfälle von Bergwerken und deren Auswirkungen auf die Tagesoberfläche sowie die Grundwasserstockwerke bekannt (Schwandt 1978, /908/; 1993, /909/; Rauche & Schwandt 1988, /808/; Koch & Gaitzsch 1989, /538/; Prugger & Prugger 1991, /787/; Schwandt et al. 1991, /911/; Gendzwill & Martin 1996, /319/; Schwandt & Seifert 1999, /910/; Thoma, Seifert & Kühn 2000, /1006/; Baryakh 2001a, /68/; Feuga, Schlund & Wasmer 2005, /270/; Whyatt & Varley 2008, /1118/). Deren Ursachen sind letztlich stets in einem ungenügendem Kenntnis- und/oder Erkundungsstand bei der Planung beziehungsweise Ausführung

der Aufschluss- oder Abbauarbeiten zu suchen. Als Konsequenz dieser Versagensfälle werden in der Kaliindustrie seit etwa 50 Jahren gebirgsmechanische und hydrogeologische F/E[91]-Arbeiten forciert, die trotz erheblich gestiegener kumulativer Gewinnungsleistungen, weltweit sowie auch in den einzelnen Revieren, zu einem deutlichen Rückgang derartiger Schadensfälle geführt haben (▸ Box 4.2).

Den salinaren Schutzschichten, also den Teilen der Schichtenfolge über und unter dem Gewinnungshorizont, die noch aus Salzgesteinen bestehen, kommen hier als visko-elasto-plastischem Ausgleichshorizont besondere Bedeutung zu. In Abhängigkeit von den lithostratigrafischen Verhältnissen, der Teufe und den gebirgsmechanischen Eigenschaften der Lagerstätteninhalte müssen solche Abbauparameter gewählt werden, die eine dauerhafte Integrität dieser Schutzschichthorizonte während der Betriebs- und der Nachbetriebsphase garantieren. Da der lithostratigrafische Bau der verschiedenen kalisalzführenden Sedimentationsbecken sehr unterschiedlich ist und darüber hinaus auch die Teufe der Lagerstätten erheblich variiert, was unmittelbare Auswirkung auf die gebirgsmechanischen Parameter hat, sind die daraus folgenden Randbedingungen für Gewinnungsarbeiten ebenfalls sehr verschieden. Dies kommt nicht zuletzt in unterschiedlichen Abbauverlusten bei ähnlicher Rohsalzqualität und Teufe zum Ausdruck. Diesen Umständen Rechnung tragend, zielt das verbesserte Methodeninventar einmal auf die detaillierte Erkundung der Deckgebirgsstrukturen und insbesondere der salinaren Schutzschicht(en) sowie des unmittelbaren Vorfeldes der Gewinnungsbereiche. Daneben werden die Gewinnungsarbeiten überall dort, wo hydrogeologische Gefährdungen besorgt werden müssen, faktisch flächendeckend durch zum Beispiel seismologisches Monitoring überwacht (Höing-Schulze 1990, /407/; Gendzwill & Prugger 1991, /320/; Prugger & Gendzwill 1992, /778/; 1993, /779/; Görisch & Yaramanchi 1994, /343/; Prugger 1994, /776/; Gendzwill & Unrau 1996, /321/; Kosteniuk & Prugger 1999, /547/; Baryakh 2001f, /73/; 2001g, /74/; Taylor et al. 2001, /1001/; Deppe & Pippig 2002, /191/; Kovin et al. 2002, /553/; Peshchenko & Mychkko 2008, /749/; Kovalev & Mozer 2012, /548/).

Erwähnt sei hier auch die Besonderheit des deutschen Kalibergbaus, der aufgrund der lagerstättengeologischen Randbedingungen (▸ Abschnitt 4.1) von Anbeginn auch auf die Nutzung von Carnallitit angewiesen war, was nicht nur zu spezifischen Aufbereitungsrückständen, sondern auch zu komplizierten geomechanischen Problemen bei der Bergmännischen wie auch der Soltechnischen Gewinnung führte, bis hin zu dramatischen Schadensereignissen (▸ Box 5.3).

In aller Regel waren die Evaporitbecken bereits im Verlauf ihrer geologischen Entwicklungsgeschichte im Bereich der primären Sedimentationsränder und/oder entlang von regionalen Bruchstörungen von Ablaugung betroffen. Infolge solcher Lösungsvorgänge entstanden zum Beispiel im deutschen Werra-Kalirevier (Haase & Oettel 1963, /360/) oder auch in der *Elk Point Group* im Westkanadischen Becken in Saskatchewan, Kanada (Davies 1983, /183/; Danyluk et al. 1999, /181/; Prugger et al. 2002, /782/; Halabura et al. 2010, /365/), in den Salado-Evaporiten in New Mexico, USA (Kelly 2000, /513/), sowie an der Oberen Kama, Russland (Kuznetsov 1967, /562/; Krasnostein & Novoselitski 1991, /558/; Krasnostein 1995, /555/; 1999b, /557/; Baryakh 2001b, /69/), räumlich begrenzte Subrosionssenken beziehungsweise Einbruchstrukturen. Für die Gewährleistung eines sicheren Bergbaus, der diese Strukturen mit hinreichendem Sicherheitsabstand zu umfahren hat, ist die Kenntnis der räumlichen Lage zwingende Voraussetzung. Der kanadische Produzent PCS betreibt zum Beispiel eigens zu diesem Zweck im Vorfeld seiner Gewinnungsfront ein aufwendiges 3D-seismisches Erkundungsprogramm (Danyluk et al. 1999, /181/; Prugger & Danyluk 1999, /777/; Prugger & Nemeth 2001, /780/; Prugger, Nemeth & Danyluk 2004, /781/). In anderen Kalibergbaurevieren werden ähnlich aufwendige, kombinierte geophysikalische Verfahren zur Vorerkundung eingesetzt (Kovin et al. 2002, /553/; 2010, /552/; Malovichko et al. 2009, /617/).

Eine Gasführung in der Lagerstätte selbst und/oder in den hangenden oder liegenden Nebengesteinen stellt eine weitere bergbausicherheitliche Randbedingung dar, welche wesentlichen Einfluss auf die Wahl und die Effizienz der Gewinnungsmethode ausübt (Hempel & Richter 1972, /385/; Hempel 1974, /384/; Salzer 1991, /872/).

Die hydrogeologischen Randbedingungen einer Region entscheiden nicht zuletzt aber auch darüber, ob die hinsichtlich ihres Wasserverbrauches sehr intensive Soltechnische Gewinnung fester Kalisalzlagerstätten an einem speziellen Standort überhaupt technisch machbar ist. Dies gilt insbesondere dort, wo dieses Verfahren aufgrund günstiger klimatischer Verhältnisse (▸ Abschnitt 4.3) mit einer solaren Evaporation der technischen Lösungen gekoppelt werden kann. Die solare Evaporation in großflächigen Lösungsbecken führt zum Verlust des Gros des Lösungsmittel, so dass nahezu die gesamte für den Solprozess zur Verfügung zu stellende Wassermenge verloren geht. Im Gegensatz dazu werden bei den Prozessen der technischen Eindampfung und Kristallisation ein Großteil der Lösungen beziehungsweise des Wassers zurückgewonnen und sein Wärmeenergieinhalt durch mehrfache Kreislaufführung weitgehend genutzt.

91 F/E-Arbeiten: Planmäßige Programme zur angewandten Forschung und Entwicklung von industrietauglichen Methoden, Verfahren und Anlagen, vielfach in Kooperation zwischen universitären/akademischen und/oder industrienahen Forschungseinrichtungen und Industriebetrieben.

BOX 4.2

Jüngste Ersaufensfälle von Kalibergwerken

Auch in der jüngeren Geschichte des Kalibergbaus kam es noch zu Ersaufensfällen beziehungsweise zu dramatischen Zuflüssen, so dass die Rohsalzgewinnung gänzlich eingestellt oder zumindest längerfristig vermindert werden musste:

1985 in Saskatchewan in Kanada, wo das Kalibergwerk Esterhazy K1/K2 von einem starken Zufluss betroffen wurde, der bis heute nicht vabgedichtet werden konnte (van Sambeck 1993, /1060/; 1995, /1061/; 2000, /1062/)

1986 an der Oberen Kama in Russland, wo das Kalibergwerk Berezniki 3 aufgegeben werden musste (Baryakh 2001a, /68/; Andrejchuck 2002, /22/; ERCOSPLAN 2007i, /250/; 2007j, /251/)

1997 in Sussex, New Brunswick, Kanada, wo das Kalibergwerk Denison-Potacan[92] aufgegeben werden musste (Webb & Smith 2009, /1104/; Webb 2010, /1102/)

2006 an der Oberen Kama in Russland, wo das Kalibergwerk Berezniki 1 aufgegeben werden musste (ERCOSPLAN 2007i, /250/; 2007j, /251/)

2014 an der Oberen Kama in Russland, wo das Kalibergwerk Solikamsk 2 die Produktion einstellen musste (URALKALI 2014, /1051/).

Bei der Wertung all dieser jüngeren Schadensfälle ist jedoch zu bedenken, dass die Abbaufelder, in denen die später nicht mehr oder nur mit erheblichen Kosten zu beherrschenden Zuflüsse auftraten, meist bereits Jahrzehnte vor der Einführung eines neuen und bis heute auch weiter verbesserten Methodeninventars für die Vorerkundung oder auch die Dimensionierung abgebaut wurden, das Schadensereignis also mit zum Teil sehr großem Zeitverzug eingetreten ist. Zum Beispiel sind die Ursachen, die im Jahre 2006 zum Ersaufen des Bergwerkes Berezniki 1 in der Region Perm, Russland, geführt haben, mit einer Abbautätigkeit in den 1960er bis 1970er Jahren verbunden. Zurzeit dieser Gewinnungsaktivitäten waren weit weniger Kenntnisse zur lagerstätten- und hydrogeologischen Situation und zu den gebirgsmechanischen Einwirkungen des Mehrsohlenabbaus auf die hydrogeologische Schutzschicht vorhanden (Domning 1977, /206/; Prugger 1979a, /783/; 1979b, /784/; Molavi 1987, /677/; Prugger 1992, /785/; Roberts & Spencer 1995, /844/; Rauche 2000, /795/; Baryakh 2001b, /69/; 2001d, /71/; Kulyniak 2002, /571/; Rauche 2002a, /796/; Brückner, Popp & Schreiner 2005, /130/; ERCOSPLAN 2007j, /251/).



Tagesbruch über dem Zuflussbereich des Kalibergwerkes Berezniki 1, Obere Kama, Russland. Der Tagesbruch ereignete sich am 28. Juli 2007, etwa 9 Monate nachdem die Zuflüsse im Bergwerk auf über 1.000 Kubikmeter pro Stunde angestiegen waren. [Foto mit freundlicher Genehmigung von PAO Uralkali, Berezniki, Russland]

92 Nach der Aufgabe des Bergwerkes fand ein Eigentümerwechsel statt: Seit 1998 sind das Bergwerk Denison-Potacan und das zugehörige Kaliwerk Clover Hill im Besitz von PCS, die beide Einrichtungen heute als *Cassidy Lake Division* für die Zwischenspeicherung und die Entsorgung von Rückständen aus der Kalidüngemittelproduktion am Standort Penobsquis nutzt.

4.3 Klimatische Randbedingungen

Die klimatischen Verhältnisse eines Produktionsstandortes beeinflussen vor allem die Aufbereitungsprozesse sowie das Rückstandsmanagement auf vielfältige Weise und sind darüber hinaus auch bezüglich Infrastruktur und Logistik von Bedeutung. Sie sind insbesondere die entscheidende Voraussetzung für die Möglichkeit einer Anwendung von Verfahren der solaren Evaporation oder auch der natürlichen Kühlkristallisation und entscheiden damit letztlich über das Ausmaß des erforderlichen Primärenergieeinsatzes (Garrett 1979, /314/; Behrens 1980, /84/; Butts 1985, /141/; PAP 1992, /728/; Rauche 2002b, /797/). Dies gilt es ganz besonders bei Vergleichen zwischen den in ariden Gebieten praktizierten Aufbereitungsverfahren für natürliche wertstoffarme Lösungen mit den mitunter vorgeschlagenen Möglichkeiten für eine Verwertung der in der gemäßigten Klimazone bei der Aufhaldung von festen Aufbereitungsrückständen durch Niederschlagseinwirkung anfallenden Salzlösungen zu berücksichtigen (▸ Box 7.3). Solche an den Haldenstandorten in den humiden Regionen zur Beseitigung anfallenden Salzlösungen enthalten ebenfalls noch geringe Anteile von Wertstoffkomponenten, deren vollständige oder mindestens partielle Konzentration hier aber nicht durch die praktisch kostenlose und ökologisch weitgehend unbedenkliche solare Eindampfung erfolgen kann, sondern den Einsatz thermischer Energie aus Primärenergieträgern erforderlich machen würde, was in den Kapiteln 7 und 8 noch ausführlicher abgehandelt werden soll.

Die größten Kaliproduktionsanlagen der Welt befinden sich in Saskatchewan, Kanada und im Gebiet der Oberen Kama, Russland. In beiden Gebieten herrscht ein kühles Kontinentalklima. Die Temperaturen sind mäßig kühl und durch starke Schwankungen zwischen Sommer und Winter gekennzeichnet: Im Sommer erwärmt sich die Landmasse stark. Die aufsteigende Warmluft führt zur Wolkenbildung und zu konvektiven Niederschlägen. Im Winter kühlt die Landmasse stark aus, was örtlich stabile Kältehochlagen zur Folge hat; Wolken lösen sich auf. Daher sind die Winter deutlich niederschlagsärmer als die restlichen Monate. Die Differenzen zwischen Tages- und Nachttemperaturen können bis zu 60 Kelvin betragen (▸ Abbildung 16). Die Gesamtniederschlagsmenge beträgt in Saskatchewan 350 Millimeter pro Jahr und ist somit im Vergleich zu den europäischen Standorten deutlich geringer. Die regenreichsten Monate sind Juni bis August (▸ Abbildung 17). Zwischen November und März fallen die Niederschläge als Schnee.

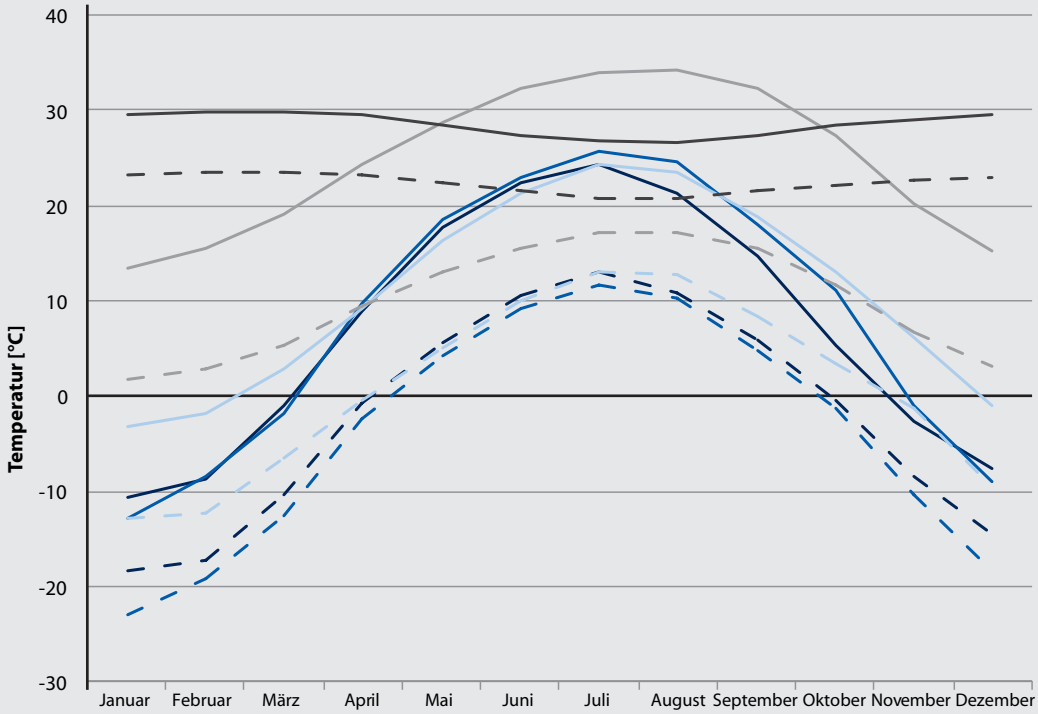
Im Vergleich mit anderen Standorten der Kalidüngemittelproduktion herrschen mit Wintertemperaturen bis -50°C sowohl in Saskatchewan als auch an der Oberen Kama recht extreme klimatische Verhältnisse, die zahlreiche besondere Vorkehrungen erfordern, wie zum Beispiel die vollständige Einhausung der Schachtförderanlagen und der Aufbereitungsanlagen oder auch aufwendige Schachtwetterheizungen. Andererseits bieten diese klimatischen Bedingungen auch die Möglichkeit, die kalten Wintermonate für eine KCl-Herstellung aus technischen Lösungen durch natürliche Tiefkühlkristallisation zu nutzen. Dies ist besonders effizient für die beim sogenannten *secondary mining*[93] bei der Soltechnischen Gewinnung von Sylvinit erzeugten technischen Lösungen mit hohem KCl-Gehalt. Dieses Verfahren wird in der weltgrößten soltechnischen Produktionsanlage Belle Plaine, Saskatchewan, Kanada, seit Jahrzehnten erfolgreich praktiziert.

Gegenüber den Produktionsstandorten in Saskatchewan, wo im langjährigen Mittel um 350 Millimeter pro Jahr Niederschlag fallen, sind die Werke in Mitteleuropa von erheblich mehr Niederschlägen betroffen: Am Standort des Kaliwerkes Neuhof-Ellers über 800 Millimeter pro Jahr, am Standort des Verbundwerkes Werra 625 Millimeter pro Jahr und am Standort des Kaliwerkes Zielitz etwa 550 Millimeter pro Jahr, was zu signifikanten Unterschieden beim Rückstandsmanagement führt. Infolge der auf die Haldenoberfläche und auf die versiegelten Flächen innerhalb der Produktionsanlagen einwirkenden Niederschläge fallen hier weit mehr Salzlösungen an, die mineralisiert sind und entsprechend beseitigt werden müssen, als dies an den Standorten im stärker kontinental geprägten Klima der Fall ist.

Gänzlich verschiedene klimatische Randbedingungen herrschen an den Kaliproduktionsstandorten im brasilianischen Staat Sergipe nahe der Küste des Südatlantiks oder auch am Toten Meer. Hier sind die Aufbereitungsanlagen lediglich überdacht, nicht aber in kompakten Behausungen untergebracht. Während in Saskatchewan und an der Oberen Kama Betriebskosten zur Heizung der Grubenwetter aufgewendet werden, muss die tropisch-feuchte Luft im Bergwerk Taquari-Vassouras vor ihrem Eintritt in das Grubengebäude gekühlt und damit getrocknet werden, was mit erheblichen Betriebskosten verbunden ist.

Am Toten Meer herrschen ganzjährig gute Bedingungen für die solare Evaporation der in flachen Becken aufkonzentrierten natürlichen Lösungen, so dass ein künstlicher Carnallit auskristallisiert. Die niedrigsten Temperaturen im Sommer liegen zwischen 14° C und 17° C, während Höchsttemperaturen bis 50° C und mehr gemessen werden. Die Luftfeuchtigkeit ist mit 27 Prozent im Sommer recht niedrig und beträgt auch im Winter nur 38 Prozent. Die

93 Als *secondary mining* wird hier der zweite Zyklus einer Kavernensolung auf sylvinitischen Lagerstätten bezeichnet, wo mit Hilfe eines NaCl-vorkonzentrierten Lösungsmittels die selektive Auflösung der Wertstoffkomponente KCl angestrebt wird.

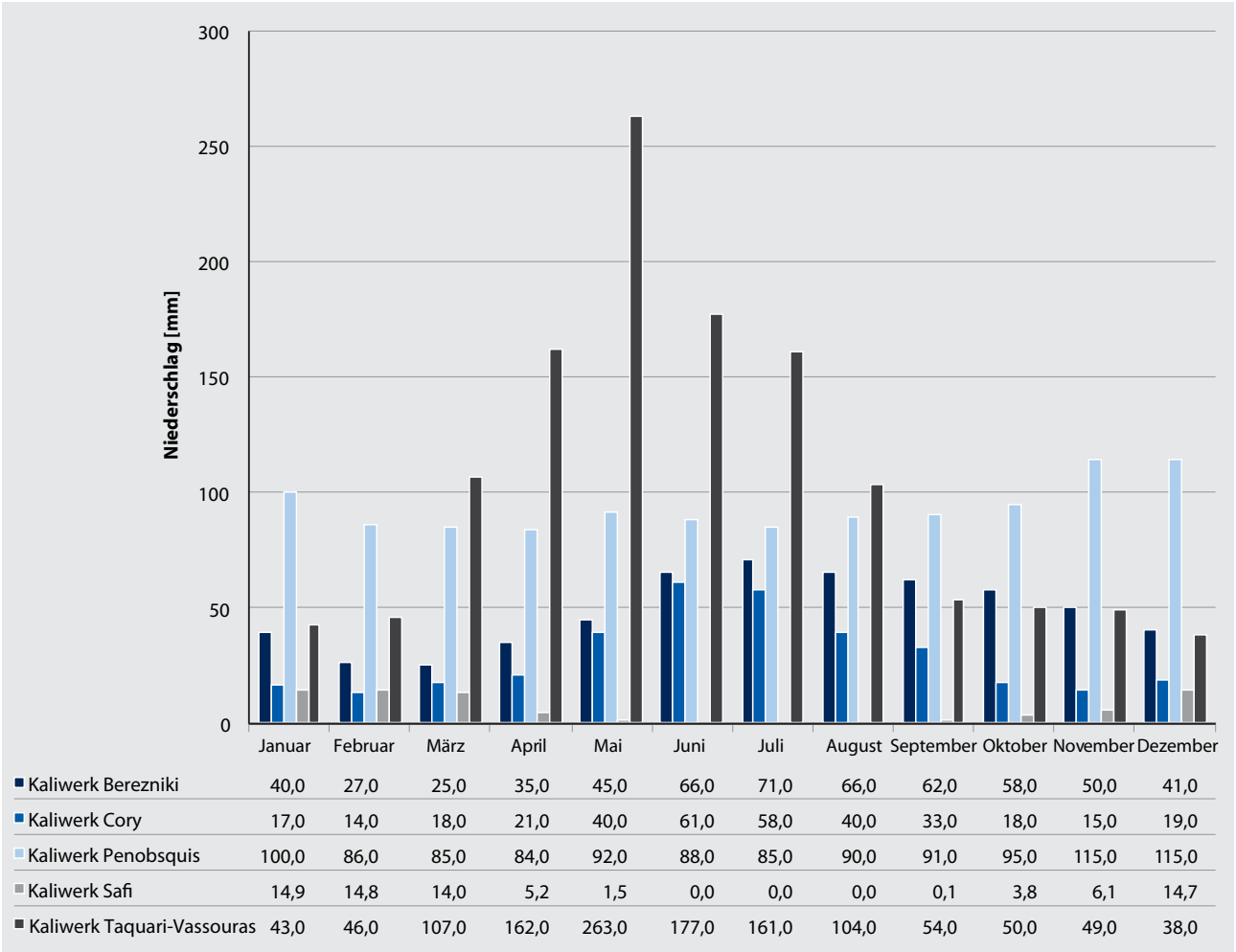


	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
Kaliwerk Berezniki, Obere Kama, Russland												
max. Monatsmitteltemperatur	-10,8	-8,7	-1,0	8,9	17,8	22,4	24,2	21,3	14,7	5,2	-2,6	-7,6
min. Monatsmitteltemperatur	-18,4	-17,4	-10,5	-0,8	5,6	10,6	13,1	10,7	5,9	-0,6	-8,4	-14,6
Kaliwerk Cory, Saskatchewan, Kanada												
max. Monatsmitteltemperatur	-12,9	-8,4	-1,9	9,7	18,4	22,9	25,7	24,6	17,9	11,1	-1,1	-9,0
min. Monatsmitteltemperatur	-23,0	-19,2	-12,6	-2,3	4,3	9,1	11,6	10,2	4,7	-1,3	-10,5	-18,5
Kaliwerk Penobsquis, New Brunswick, Kanada												
max. Monatsmitteltemperatur	-3,3	-1,9	2,7	9,1	16,2	21,3	24,3	23,5	18,9	12,9	6,2	-0,9
min. Monatsmitteltemperatur	-13,0	-12,3	-6,5	-0,5	4,9	9,9	13,1	12,6	8,3	3,4	-1,4	-9,6
Kaliwerk Taquari-Vassouras, Sergipe, Brasilien												
max. Monatsmitteltemperatur	13,4	15,4	19,0	24,2	28,7	32,4	33,9	34,1	32,3	27,2	20,3	15,1
min. Monatsmitteltemperatur	1,6	2,8	5,3	9,5	13,0	15,6	17,2	17,2	15,4	11,7	6,8	3,0
Kaliwerk Safi, Totes Meer, Jordanien												
max. Monatsmitteltemperatur	29,5	29,9	29,9	29,4	28,3	27,4	26,7	26,6	27,4	28,3	28,9	29,4
min. Monatsmitteltemperatur	23,3	23,5	23,6	23,2	22,3	21,5	20,7	20,6	21,5	22,2	22,6	22,9

Abbildung 16 Vergleichende Darstellung der monatlichen minimalen und maximalen Temperaturen im Jahresgang für die Standorte der Kalidüngemittelproduktion Berezniki, Region Perm, Russland; Aracaju, Sergipe State, Brasilien sowie Totes Meer, Jordanien

Niederschlagsmengen liegen am Toten Meer um 75 Millimeter pro Jahr. Noch günstiger sind die Voraussetzungen für die Anwendung solarer Eindampfung in der Atacama-Wüste im Norden Chiles, wo SQM diese Methode auch zur Kalidüngemittelproduktion nutzt. Hier übersteigt die potenzielle Verdunstung die jährliche Niederschlagsmenge um mehr als das 200fache (Weischet 1966, /1106/; Veit 2000, /1066/).

Wie schon die Rohsalze, so sind mehr noch die Fertigprodukte der Kaliindustrie sensibel gegenüber Feuchtigkeit beziehungsweise hygroskopisch. Deshalb sind besonders die Vorrichtungen für die Produktlagerung und -verladung, aber auch bereits die Rohsalzspeicherung von der am Standort herrschenden Luftfeuchtigkeit abhängig. Diese wenigen Beispiele sollen zeigen, wie die klimatischen Randbedingungen die Kalidüngemittelproduktion und das Rückstandsmanagement an den einzelnen Standorten beeinflussen.



	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
Kaliwerk Berezniki	40,0	27,0	25,0	35,0	45,0	66,0	71,0	66,0	62,0	58,0	50,0	41,0
Kaliwerk Cory	17,0	14,0	18,0	21,0	40,0	61,0	58,0	40,0	33,0	18,0	15,0	19,0
Kaliwerk Penobsquis	100,0	86,0	85,0	84,0	92,0	88,0	85,0	90,0	91,0	95,0	115,0	115,0
Kaliwerk Safi	14,9	14,8	14,0	5,2	1,5	0,0	0,0	0,0	0,1	3,8	6,1	14,7
Kaliwerk Taquari-Vassouras	43,0	46,0	107,0	162,0	263,0	177,0	161,0	104,0	54,0	50,0	49,0	38,0

Abbildung 17 Vergleichende Darstellung der Niederschläge, dargestellt als monatliche Mittelwerte für die Standorte der Kalidüngemittelproduktion Berezniki, Region Perm, Russland; Aracaju, Sergipe State, Brasilien sowie Totes Meer, Jordanien

4.4 Infrastrukturelle und logistische Randbedingungen

Die geografische Lage der Lagerstätte und damit auch des stets in räumlicher Nähe angeordneten Produktionsstandortes ist hinsichtlich ihrer Entfernung zu den potentiellen Märkten, aber im kleineren, regionalen Maßstab auch bezüglich der vorhandenen Infrastruktur, wie Wasser-, Gas- und Elektroenergieversorgung, Verkehrsanbindung, insbesondere Eisenbahnlinien, Wasserstraßen und Häfen, von Bedeutung. Die generelle, in der Regel von der Siedlungsdichte bestimmte Verfügbarkeit von Nutzflächen ist ein weiteres wichtiges Kriterium.

Jede Art der Kalidüngemittelproduktion benötigt relativ große Mengen an Prozesswasser, die selbst im Falle intensiver Rückgewinnung von Lösungsströmen in der Jahresbilanz einen erheblichen Verzehr an Brauchwasserressourcen bedingen. Allein die durch ESTA®-Verfahrensschritte dominierten Prozessrouten bilden hier eine gewisse Ausnahme, kommen allerdings auch nicht gänzlich ohne Prozesswasser zur Herstellung von verkaufsfähigen Fertigprodukten aus. Die lokale Verfügbarkeit und/oder die Bereitstellung über regionale Wasserversorgungssysteme ist daher zwingende Voraussetzung für eine stabile Kalidüngemittelproduktion. Die Bereitstellung dieser Prozesswässer erfordert an den verschiedenen Standorten weltweit unterschiedliche Aufwendungen, worin wiederum die standortspezifischen Randbedingungen zum Ausdruck kommen. Besonders im Mittleren Osten und im Westen Chinas, aber auch im mittleren Westen und Westen Nordamerikas kann die Brauchwasserversorgung saisonal zu Engpässen führen, worauf die dort angewendeten technischen Methoden, Verfahren und Anlagen ausgelegt sein müssen.

Darüber hinaus benötigt jede Art der Kalidüngemittelproduktion auch relativ große Mengen an Primärenergie. Dies gilt insbesondere für alle Aufbereitungsverfahren, die über Heißverlösungs- und Kristallisationsprozesse[94] ihre Fertigprodukte erzeugen, wobei hier der weitaus größte Teil in Form von Dampf verbraucht wird. Eine stabile Gasversorgung der Produktionsstandorte gehört daher heute zu den wesentlichen infrastrukturellen Voraussetzungen. Besonders die mit Kristallisationsprozessen produzierenden Kaliwerke wenden zur Energie- und Dampfbereitstellung die hoch effektive Kraft-Wärme-Kopplung an und erzeugen aufgrund des viel höheren Dampfbedarfes in der Regel mehr Elektroenergie als sie zur Herstellung von Kaliprodukten selbst verbrauchen. Um die effektive Einspeisung in regionale Stromnetze zu gewährleisten, ist eine Einbindung in die Netzinfrastruktur ebenfalls ein Erfordernis.

Ein einfacher Vergleich des spezifischen Energiebedarfs einzelner Kaliwerke ist mit Hilfe der öffentlich zugänglichen Informationen kaum möglich. Die für die Energieversorgung an den einzelnen Standorten herrschenden individuellen Randbedingungen aber auch der unter anderem wesentlich von den klimatischen Gegebenheiten diktierte Energiebedarf unterscheiden sich deutlich voneinander, wobei besonders nachfolgende Faktoren einwirken:

- Größenordnung der Produktionsanlage sowie die grundlegende Konzeption für die Rohstoffgewinnung und -aufbereitung und der Zeitraum der Auslegungsplanung für die technischen Methoden, Verfahren und Anlagen; kurzum: die historische Entwicklung des individuellen Produktionsstandortes;
- Verfügbarkeit sowie Kosten von Brennstoffen und/oder anderen Energiequellen zur autarken Wärme- und Energiebereitstellung am Standort kurzum: der standortnahe oder -ferne Zugang zu Energieressourcen;
- Vorgaben zum Schutz der Ressource Wasser, der Umwelt und gegen Immissionen; kurzum: die Gesetzes- und Verordnungslage des individuellen Produktionsstandortes.

Allgemein ist festzustellen, dass im mittel-/westeuropäischen Industrieraum zwar eine gute bis ausgezeichnete Infrastruktur zur Energieversorgung gegeben ist, aber hohe Energiekosten und darüber hinaus auch sehr hohe Immissions-/Umweltstandards vorzufinden sind, so dass die hier produzierenden Standorte der Kaliindustrie im globalen Wettbewerb den stärksten Anforderungen ausgesetzt sind, ihren Gesamtenergieverbrauch fortlaufend zu optimieren. Daneben bestehen an allen Produktionsstandorten unikale Besonderheiten, die aus den historischen Entwicklungen eines Standortes, seiner Einbindung in ein Ensemble anderer Kaliwerke und/oder Produktionsanlagen fremder Industriezweige resultieren. Diese nehmen mehr oder minder auf die Produktionskapazität, auf die Energieversorgung und die Entsorgungspfade, vor allem aber auf die Art der Prozessführung bei der Aufbereitung der Rohsalze über Tage und die dafür betriebenen Anlagen Einfluss:

Das Verbundwerk Werra von K+S stellt das weltweit reichhaltigste Warensortiment von Kaliprodukten an 3 einzelnen Aufbereitungsstandorten her. Die Rohsalzströme der zugehörigen 3 Kalibergwerke werden in einem zwischen den Ländern Hessen und Thüringen übergreifenden Förderverbund derart optimiert, dass eine optimale Wertstoffausnutzung in den 3 Kaliaufbereitungsanlagen möglich wird.

Die Kalidüngemittelproduktion von DSW in Israel ist mit dem Magnesium-Produzenten DEAD SEA MAGNESIUM LTD. (DSM) derart verbunden, dass flüssige Rückstandsströme aus der Kaliproduktion zu Ausgangsstoffen für die Mg-Metallproduktion werden.

Das Kaliwerk Solikamsk 1 bezieht Rückstände aus der Titanium-Magnesium-Fabrikation des OAO SOLIKAMSKIJ MAGNIEWJI SAVOD (SMS)[95] in die Kalidüngemittelproduktion ein, die zwar relativ geringe Mengen darstellen, jedoch mit einem K_2O-Gehalt von 43 Prozent ausgesprochen wertstoffreich sind.

In jedem Falle sind aufgrund solcher Verflechtungen eine Reihe zusätzlicher Anlagen in Betrieb, wodurch ein simpler Vergleich verschiedener Standorte nicht beziehungsweise kaum möglich wird. An dem einfachen Beispiel des Kaliwerkes Berezniki 4 von URALKALI soll dies kurz erläutert werden (▸ Box 4.3).

94 Das Heißlöseverfahren basiert auf einer nahezu vollständigen Auflösung der Kalirohsalze und der anschließenden mehrstufigen Kristallisation der Nutzkomponenten. Dabei sorgen unter anderem mehrere Waschvorgänge, die sogenannten Deckstufen, für die erforderliche Reinheit der Kristallisate.

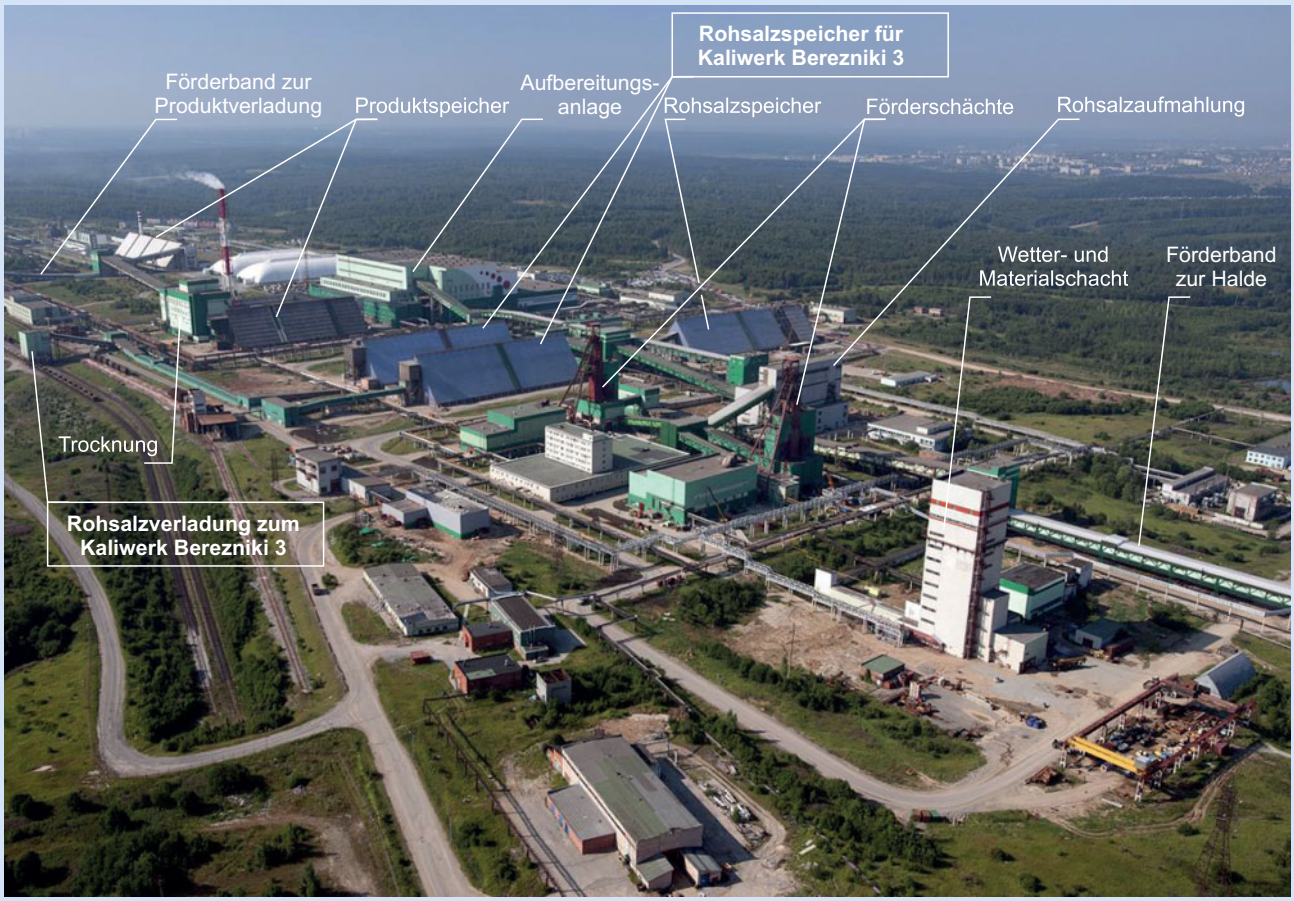
95 ОАО Соликамский магнезиевый завод (СМЗ)

BOX 4.3

Verflechtung einzelner Produktionsstandorte – Beispiel URALKALI in Berezniki, Region Perm, Russland

Aufgrund des Ersaufens des Kalibergwerkes Berezniki 3 im Jahre 1986 war die zu diesem Werk gehörende Aufbereitungsanlage ohne Rohsalzversorgung. Seinerzeit war dies die modernste Aufbereitungsanlage von URALKALI, weshalb ihre Rohsalzversorgung durch Zulieferung aus den Kalibergwerken Berezniki 1 und Berezniki 4 gewährleistet werden musste. Dies erforderte spezifische Infrastruktur- und Transporteinrichtungen am Standort all dieser Werke.

Nach dem Ersaufen des Kalibergwerkes Berezniki 1 im Jahre 2006 musste das Kalibergwerk Berezniki 4 neben der Versorgung der eigenen Aufbereitungsanlage auch die Rohsalzbelieferung für die Aufbereitungsanlage des Kaliwerkes Berezniki 3 übernehmen, was wiederum den Bau weiterer Anlagen am Standort des Kaliwerkes Berezniki 4, insbesondere reichlich dimensionierter Rohsalzspeicher und einer neuen beziehungsweise erweiterten Bahnverladung für die Rohsalze, notwendig machte.



Kaliwerk Berezniki 4 von URALKALI, Region Perm, Russland: Luftbildansicht mit Bezeichnung aller typischen Einheiten eines Kaliwerkes mit Bergmännischer Gewinnung fester Kalirohsalze, wie sie auch an jedem vergleichbaren anderen Standort ebenso erforderlich sind, eingerahmt dagegen sind die in den Verbund integrierten Anlagen, die aufgrund der Rohsalzbelieferung der Aufbereitungsanlage des Kaliwerkes Berezniki 3 zusätzlich erforderlich sind (Hinweis: Das für Kaliwerke in der Regel übliche Kraftwerk mit Kraft-Wärme-Kopplung befindet sich außerhalb des Luftbildausschnittes). [Foto mit freundlicher Genehmigung von PAO Uralkali, Berezniki, Russland]

Solche und ähnliche Abhängigkeiten führen an nahezu jedem Kalistandort weltweit zu sehr individuellen *upstream*- und *downstream*-Verflechtungen, die entsprechend besondere Adaptionen und Modifikationen klassischer Aufbereitungsprozesse der Kaliindustrie erforderlich gemacht haben. Diese über die Produktionsgeschichte verschiedenen Änderungen unterworfenen Abhängigkeiten waren mehrheitlich wirtschaftlich motiviert und stets der nachhaltigen Nutzung von Rohstoff-, Energie- oder anderen natürlichen Ressourcen gewidmet.

Das zurzeit und offensichtlich auch noch für die nähere Zukunft bestehende regionale Missverhältnis zwischen Kalidüngemittelproduktion und -verbrauch macht die Belieferung der südlich gelegeneren Exportmärkten in Übersee aus den Produktionszentren auf der Nordhalbkugel der Erde erforderlich (▸ Abbildung 18), was eine entsprechende Logistik bedingt. Kalidüngemittel werden vorwiegend als Massenschüttgüter gehandelt. Ihr Transport ist daher logistisch nicht ohne Herausforderungen.

Dies gilt um so mehr, da über 50 Prozent der weltweiten Kalidüngemittelproduktion in einer *mid-continent* Position der nördlichen Hemisphäre erzeugt und der größte Teil davon über Seehäfen zu den Exportmärkten transportiert werden. Sowohl aus der Region Perm, wo das Zentrum der russischen Kaliindustrie liegt, als auch aus Saskatchewan, wo die Masse der kanadischen Kalidüngemittelprodukte erzeugt wird, sind erhebliche Distanzen auf dem Schienenweg zurückzulegen, bevor die Produkte den Exporthafen in St. Petersburg beziehungsweise in Vancouver, British Columbia, erreichen. Wesentliche logistische Voraussetzungen für die Kaliproduktionsstandorte sind daher die Einbindung in das nationale Schienennetz und/oder an ganzjährig schiffbare Wasserstraßen sowie die Verfügbarkeit von Transportkapazitäten entlang dieser Routen. Naturgemäß liegen auch bezüglich dieser logistischen Randbedingungen große Unterschiede zwischen einzelnen Standorten vor.

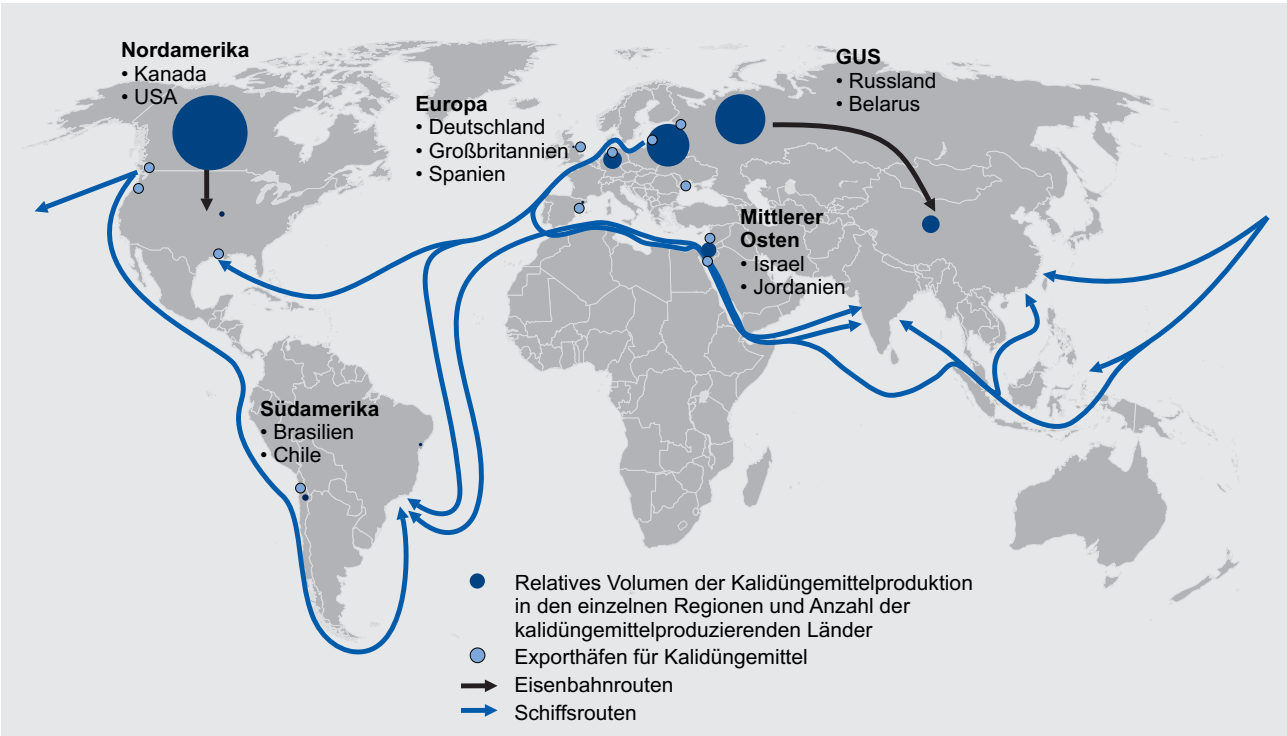


Abbildung 18 Zentren der Kalidüngemittelproduktion und globale Transportrouten für Kalidüngemittelexporte

5 METHODEN, VERFAHREN UND ANLAGEN ZUR GEWINNUNG VON KALIROHSTOFFEN

Die zur Kalidüngemittelproduktion erforderlichen Wertstoffkomponenten kommen einerseits in natürlichen Gewässern als Lösungen vor, andererseits wurden sie durch Evaporation von wässrigen Lösungen, vor allem von Meerwasser, in früheren Zeiten der Erdgeschichte als Feststoff abgelagert. Diese bilden so in Verbindung mit anderen Salzen Kalilagerstätten, welche über geologische Zeiträume durch weitere Gesteinsschichten, meist durch Sedimente, überdeckt wurden und damit in tiefere Positionen des geologischen Untergrundes gelangten. Diese beiden grundsätzlich verschiedenen Rohstoffarten, die natürlichen wertstoffarmen Lösungen an oder nahe der Erdoberfläche, wie auch die deutlich wertstoffreicheren festen Kalirohsalze im geologischen Untergrund werdenfür die Kalidüngemittelproduktion genutzt (Gimm 1968, /331/; Achorn & Balay 1985, /10/; Garrett 1996, /315/; Stahl et al. 2005, /973/).

Die meist an oder nahe der Erdoberfläche anstehenden natürlichen Lösungen werden über Grabensysteme aus ihrer natürlichen Umgebung extrahiert und in weiträumigen Becken zunächst mittels solarer Evaporation vorkonzentriert. Durch weitere Aufbereitungsschritte werden die dabei gewonnenen festen und/oder flüssigen Zwischenprodukte zu verkaufsfähigen Kalidüngemitteln gemäß handelsüblicher Spezifikationen verarbeitet (▸Abschnitt 6.3).

Die festen Kalirohsalze im geologischen Untergrund werden entweder durch Bergmännische Gewinnung in Bergwerken unter Tage abgebaut und als Feststoff nach über Tage gefördert oder durch soltechnische Verfahren über Bohrlochsonden aus dem Lagerstättenhorizont herausgelöst und in flüssiger Form nach über Tage gepumpt. Während das erstgenannte Abbauverfahren klassische Bergbaumethoden anwendet, also eine mechanische Herauslösung der Mineralsalze aus dem Gesteinsverband vornimmt (▸Abschnitt 5.1.1), nutzt die Soltechnische Gewinnung die gute Löslichkeit der meisten Mineralsalze in wässrigen Lösungen als Gewinnungsprinzip (▸Abschnitt 5.1.2).

Welche Anteile die grundsätzlichen Gewinnungsmethoden an der gesamten Kaliproduktion einnehmen, ist in Tabelle 8 exemplarisch für das Produktionsjahr 2013 dargestellt (▸Abbildung 8b). Da insbesondere die solare Evaporation, aber auch die natürliche Kühlkristallisation, bei der Soltechnischen Gewinnung (▸Abschnitt 5.1.2) deutliche Abhängigkeiten von den klimatischen Bedingungen eines konkreten Produktionsjahres zeigen, unterliegen die prozentualen Anteile der einzelnen Gewinnungsmethoden auch jährlichen Schwankungen. Nichtsdestotrotz wird ersichtlich, dass mit etwa 70 Prozent der weitaus größte Teil der weltweiten Kaliproduktion aus der Bergmännischen Gewinnung unter Tage stammt, wobei wiederum hiervon der bei weitem größere Teil durch schneidende Verfahren und lediglich 11 Prozent durch Bohr- und Sprengarbeiten gewonnen wird. Immerhin werden mehr als 25 Prozent der weltweiten Kalidüngemittelproduktion aus gering

H. Rauche, *Die Kaliindustrie im 21. Jahrhundert,*
DOI 10.1007/978-3-662-46834-0_5, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

wertstoffhaltigen natürlichen Lösungen produziert, nahezu ausschließlich mit Hilfe einer Vorkonzentration durch solare Evaporation der Primärlösungen.

Tabelle 8 Prozentualer Anteil der unterschiedlichen Gewinnungsmethoden an der Weltkalidüngemittelproduktion, dargestellt für das Jahr 2013

Gewinnungsmethode	Prozentualer Anteil [%]
Bergmännische Gewinnung ...	70
... Schneidende Gewinnung	59
... Bohren und Sprengen	11
Soltechnische Gewinnung	4
Gewinnung aus natürlichen Lösungen	26

Der Anteil der insgesamt 5 soltechnischen Gewinnungsanlagen an der Weltkaliproduktion lag dagegen im Jahr 2013 lediglich bei etwa 4 Prozent, wobei fast 80 Prozent davon aus dem von MOSAIC betriebenen Kaliwerk Belle Plaine, Saskatchewan, Kanada, entstammen (▸Abbildung 19). Dieser ausgesprochen geringe Anteil der Soltechnischen Gewinnung an der gesamten Kalidüngemittelproduktion hat sich auch bis zum Jahr 2015 nicht verändert, obgleich in den vergangenen Jahren vielfach neue und hinsichtlich der Produktionskapazität große Solprojekte in Nord- und Südamerika und in Südostasien angekündigt wurden. Ein signifikanter, aber in Summe dennoch geringer Zuwachs des Anteiles der soltechnischen Verfahren an der Weltkalidüngemittelproduktion wird sich erst mit der für das Jahr 2016 beabsichtigten Inbetriebnahme beziehungsweise mit dem für 2017 geplanten Erreichen einer Produktionskapazität von 2 Millionen Tonnen KCl des Legacy-Projektes von K+S POTASH CANADA vollziehen.

Über die an den einzelnen Standorten der Kaliindustrie angewendeten Gewinnungsmethoden geben die STANDORT-STECKBRIEFE in Kapitel 10 einen synoptischen Überblick.

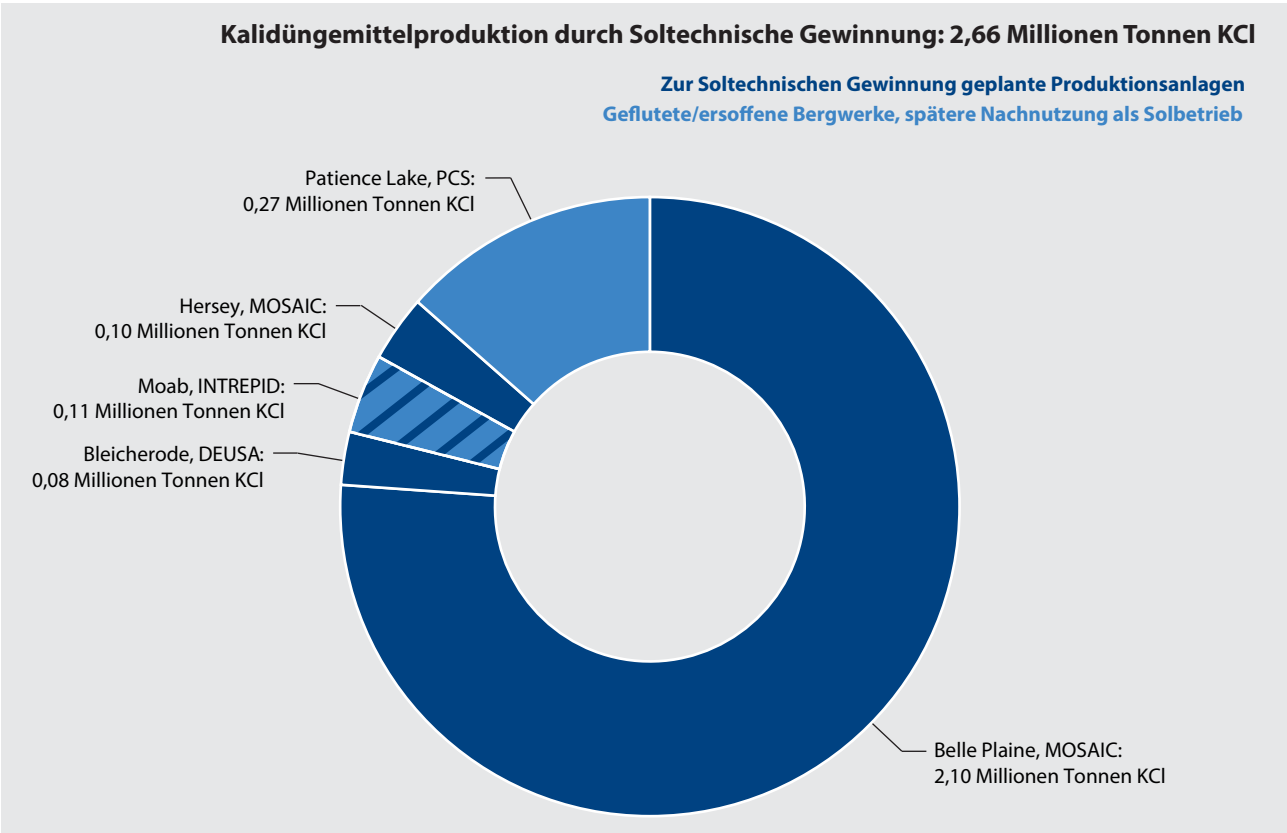


Abbildung 19 Standorte der Soltechnischen Gewinnung von festen Kalisalzen aus dem geologischen Untergrund mit ihren Anteilen an der Gesamtproduktion der durch Soltechnische Gewinnung erzeugten Kalidüngemittelproduktion im Jahr 2013

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Methoden der Rohstoffgewinnung für die Kalidüngemittelproduktion erläutert, wobei auch exemplarisch Zustandsbeschreibungen zu den an einzelnen konkreten Standorten praktizierten Gewinnungsmethoden vermittelt werden. Im Abschnitt 5.1 wird die Gewinnung fester Kalirohsalze aus dem geologischen Untergrund behandelt, in dem zunächst die Methoden der Bergmännischen Gewinnung (▸Abschnitt 5.1.1) und im Anschluss die der Soltechnischen Gewinnung (▸Abschnitt 5.1.2) eine beschreibende Erläuterung erfahren. Die Methoden, Verfahren und Anlagen zur Gewinnung der an oder nahe der Erdoberfläche anstehenden natürlichen Lösungen werden im Abschnitt 5.2 behandelt.

5.1 Gewinnung fester Kalirohsalze aus dem geologischen Untergrund

In fester Form vorliegende Kalisalzvorkommen können entweder durch Bergmännische oder durch Soltechnische Gewinnungsmethoden abgebaut werden. Welche der beiden grundsätzlichen Methoden angewandt wird, ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig, welche im Folgenden kurz dargestellt und erläutert werden sollen. Es trifft jedenfalls nicht zu, dass die Soltechnische gegenüber der Bergmännischen Gewinnung von Kalisalzen einen fortschrittlicheren Stand der Technik repräsentiert[96]. Vielmehr entscheiden lagerstättengeologische, hydrogeologische, klimatische und andere standortspezifische Randbedingungen darüber, welche der beiden grundsätzlichen Methoden mit höherer Effizienz angewendet werden kann (Meyer 1970, /646/; Fulda & Heinrich 1986, /300/; Duchrow et al. 1991, /215/; Rauche & Grüschow 2000, /805/; Middleton 2011, /652/; Leland & Pekeski 2012, /588/; Rauche et al. 2012, /815/).

Einen wesentlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit einer Gewinnungsmethode üben die Teufe und die davon bestimmte Gebirgstemperatur der Lagerstätte aus (Gimm 1961, /330/; 1968, /331/; Höfer, Fulda & Seidl 1967, /403/; Jeremic 1994, /455/; Livingstone et al. 2001, /600/; Roberts 2001, /843/). Mit zunehmender Teufe erhöhen sich naturgemäß aufgrund der steigenden Überlagerung und der daraus notwendigen Vergrößerung der Pfeilerabmessungen die Abbauverluste. Weiterhin erhöht sich mit zunehmender Teufe auch die Gebirgstemperatur, welche somit eine Steigerung der Wärmebelastung für die untertägige Belegschaft nach sich zieht. Mit zunehmender Teufe erhöhen sich daher die Betriebskosten eines Gewinnungsbergwerkes und seine Wirtschaftlichkeit verringert sich. Dagegen können sich die höheren Gebirgstemperaturen bei der Soltechnischen Gewinnung als Vorteil erweisen, da sich mit steigender Temperatur auch die Löslichkeit der Wertstoffkomponente KCl erhöht (Husband & Ozsahin 1967, /425/; Nigbor 1982, /710/; Heinz & von der Osten 1982, /381/; Duchrow et al. 1991, /215/; Garrett 1996, /315/; Freeman 2007, /289/; Grüschow & Rembe 2012, /355/; FI 2015, /271/).

Grundsätzlich wachsen die Abbauverluste mit zunehmender Teufe auch bei der Soltechnischen Gewinnung, allerdings nicht in dem Maße wie bei der Bergmännischen Gewinnung (Duchrow et al. 1991, /215/; Rauche & Grüschow 2000, /805/). Bergmännische Gewinnungsmethoden in Teufen größer 1.400 Meter sind heute allerdings nur in Ausnahmefällen wirtschaftlich. Für eine der wichtigsten Lagerstättenprovinzen der Kaliindustrie, für Saskatchewan im Westen Kanadas, sind die Teufenverteilung der Kalisalze und die daraus resultierenden Gewinnungsmethoden in einer Kartenskizze (▸Abbildung 20) verdeutlicht (DEM 1983, /190/; Pepper & Strathdee 1986, /746/; SMA 2015, /953/; Yang, Jensen, & Berenyi 2009, /1146/; MOE 2014, /676/): Während im nördlichen Teil die Kalisalzlager in einem für die Bergmännische Gewinnung wirtschaftlichen Teufenintervall liegen, gerät diese Gewinnungsmethode in dem tieferliegenden südlichen Lagerstättenteil vor allem durch höhere Kosten für den Bau und den Betrieb der Schächte und der Schachtförderanlagen sowie insbesondere durch höhere Abbauverluste und dem damit verbundenen

96 Mitunter wird in der Öffentlichen Diskussion, oft auch genährt durch die sehr zahlreichen Publikationen des SOLUTION MINING RESEARCH INSTITUTE (SMRI), Clarks Summit, Pennsylvania, USA, suggeriert, dass die Soltechnik einen gegenüber der Bergmännischen Gewinnung fortschrittlicheren Stand der Technik darstellen würde. Auch die Soltechnische Gewinnung von Mineralsalzen ist eine uralte Gewinnungsmethode und als solche nicht etwa ein Produkt zielgerichteter, angewandter F/E-Arbeit der Neuzeit. Bereits Kǒng Fūzǐ (aus dem Lateinischen: Konfuzius, vermutlich von 551 bis 479 vor der Zeitenwende) berichtete über die alte Tradition der Salzgewinnung mittels Lösungsverfahren über Tiefbohrungen. Möglicherweise reichen diese technischen Methoden demnach bis in die Östliche Zhou (Chou) Dynastie (etwa 771 bis 256 vor der Zeitenwende) zurück (Arnold 1975, /27/; Bergier 1989, /93/). Als gesichert gilt jedoch, dass Li Ping um 250 vor der Zeitenwende in Sìchuān, im Südwesten Chinas, Tiefbohrungen durchführen und diese zur Soltechnischen Gewinnung von festem Steinsalz im Untergrund mit Frischwasser beaufschlagen ließ (Zhong & Huang 1997a, /1156/; Zhong 1998, /1155/).

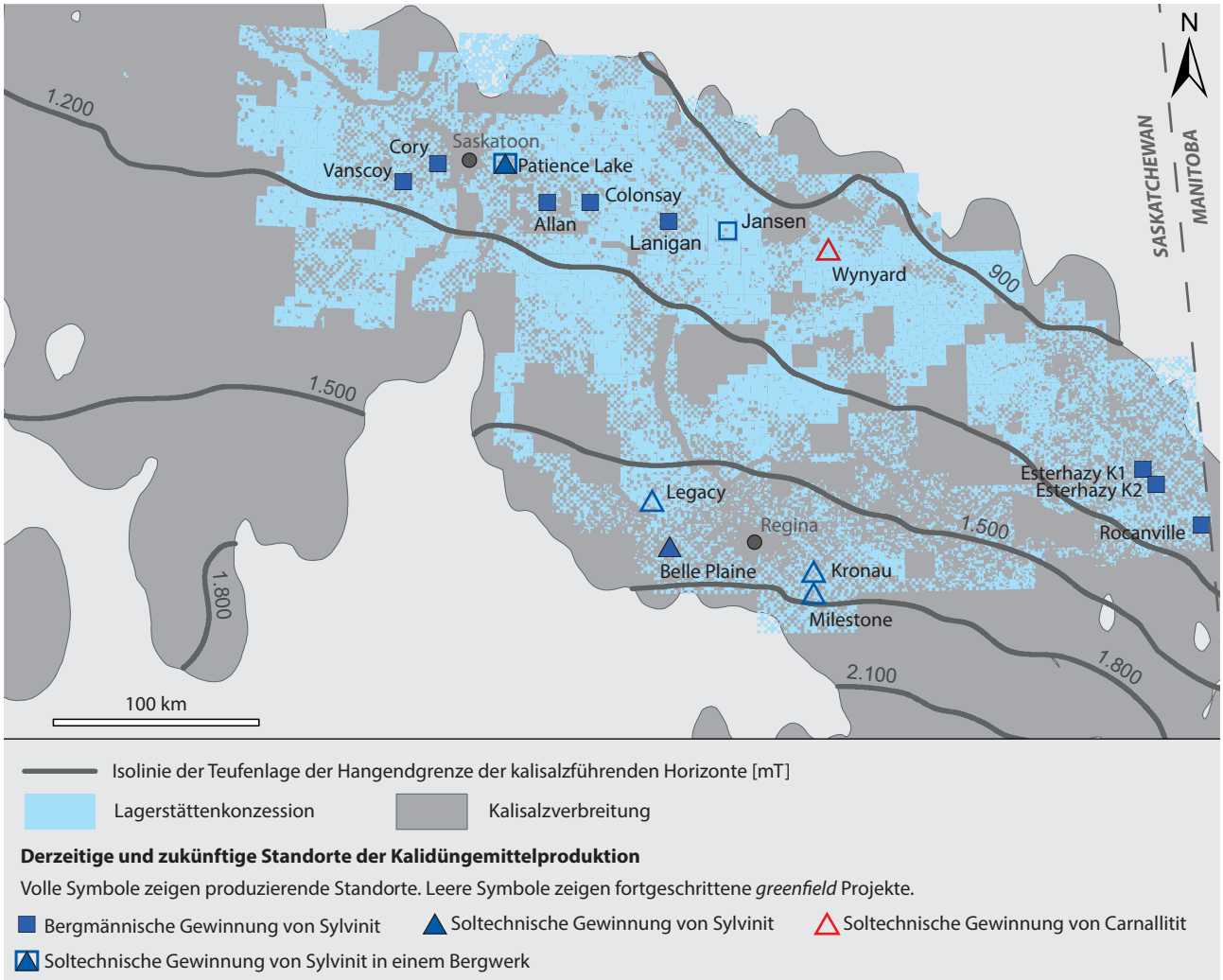


Abbildung 20 Verteilung der Lagerstättenkonzessionen und zurzeit produzierende bzw. in Bau befindliche Kaliwerke im Kalirevier Saskatchewan, Kanada, sowie deren von der Teufe abhängige Gewinnungsmethoden

schnelleren Verbrauch an Lagerstättenfläche an seine Wirtschaftlichkeitsgrenzen. In diesem südlichen Teil des Lagerstättenrevieres Saskatchewan hat sich demzufolge bereits mit dem Bau des Produktionsstandortes Belle Plaine in den 1960er Jahren die Anwendung der Soltechnischen Gewinnung etabliert. Durch das *greenfield* Projekt Legacy der K+S entsteht hier zurzeit die weltweit zweite soltechnische Produktionseinheit, die eine vergleichbare Dimension der Produktionskapazität wie die modernen leistungsstarken Betriebe der Bergmännischen Gewinnung aufweist.

Neben der mineralogischen Zusammensetzung der Rohsalze ist es vor allem die Mächtigkeit der Kalisalzlager, die die grundsätzliche Anwendbarkeit der Soltechnischen Gewinnung bestimmt (Grüschow 1994, /352/; Rauche & Grüschow 2000, /805/; Middleton 2011, /652/; Rauche et al. 2012, /815/). In der Regel lassen zu geringe Mächtigkeiten keine effektive Gewinnung durch soltechnische Verfahren zu.

Eine weitere wesentliche Randbedingung, die über die Anwendbarkeit und die Effizienz einer Gewinnungsmethode entscheidet, ist die Homogenität, respektive die Inhomogenität der Kalilagerstätte. Inhomogene Kalilagerstätten mit großen Schwankungen in der Mächtigkeit sind für die Soltechnische Gewinnung ungeeignet beziehungsweise erfordern sehr hohe bohrtechnische Aufwendungen. Die inhomogenen Mächtigkeitsverteilungen – oder aber auch die inhomogene Verteilung der Wertstoffinhalte – beeinflussen darüber hinaus auch bei der Bergmännischen Gewinnung die Auswahl der Abbauverfahren und ihre Effektivität. Allerdings ist insbesondere die Bohr- und Sprengmethode in der Lage, auf Ausdünnungen beziehungsweise Vertaubungen der Abbauhorizonte in der Lagerstätte zu reagieren, soweit diese bei der Erkundung rechtzeitig erkannt wurden. Grundsätzlich gilt, dass Schneidende Gewinnungsmethoden mit Vollschnittmaschinen nur wenig Flexibilität bezüglich inhomogener Ausbildung der Kalilager und insbesondere der Mächtigkeiten aufweisen.

Zusätzliche Lagerstättenverluste oder wachsende Verdünnung durch das Beischneiden wertstofffreier oder -armer Gesteinsvolumina sind dann stets die Folgen. Dies führt in jedem Falle zu einer geringeren Nachhaltigkeit der Lagerstättennutzung, im Falle der höheren Verdünnung des in die Aufbereitungsanlage geförderten Rohsalzstromes auch zwangsläufig zu höheren Anteilen von Aufbereitungsrückständen. Beides sind tatsächliche Auswirkungen der heute in Saskatchewan, Kanada und an der Oberen Kama, Russland im großen Stil praktizierten Schneidenden Gewinnungsmethode. Sie sind hier aber nur von marginaler Bedeutung: Eine hohe Flexibilität der Gewinnungsmethode ist nicht erforderlich. Die dort in Abbau stehenden Lagerstätten liegen nahezu ausschließlich horizontal, sind relativ homogen aufgebaut und weisen daher über große Flächen gleichbleibende Mächtigkeiten ohne Neigungswechsel und ausgesprochen homogene Verteilungen der KCl-Inhalte auf (▸Abschnitt 4.1). Vor allem aber haben diese Lagerstätten ausgesprochen hohe Wertstoffgehalte, so dass die mitunter beibrechende Verdünnung keine ernsthaften Beeinträchtigungen der Aufbereitungsprozesse bewirken kann.

In den heute in Deutschland in Verhieb befindlichen Kalilagerstätten stellt sich dies gänzlich anders dar. Neben bergbausicherheitlichen Überlegungen, zum Beispiel hinsichtlich des Auftretens von natürlichen Gasen im Lagerstättenhorizont und damit verbundenen Gefahren durch das explosionsartige Austreten von natürlichen Gasen und/oder Gas-Salzgemischen, sind die oben erwähnten Aspekte der nachhaltigen Lagerstättennutzung die wesentlichen Gründe dafür, warum im deutschen Kalibergbau unter den hier von der Natur vorgegebenen lagerstättengeologischen Randbedingungen mehrheitlich das weitaus flexiblere Bohren und Sprengen als Gewinnungsmethode eingesetzt wird (Duchrow & Schilder 1985, /213/; Duchrow 1990, /212/; Spachtholz 2011, /963/).

Um den heutigen Stand der Technik mit seinem berechtigten Nebeneinander von verschiedenen, auf die jeweils am Standort vorherrschenden lagerstättengeologischen, geomechanischen und montanhydrogeologischen sowie weiteren bergbausicherheitlichen Randbedingungen optimierten Gewinnungsmethoden und -verfahren zu erfassen, empfiehlt es sich, zunächst die historische Entwicklung zu beleuchten. Dabei muss vor allem auch dem der gezielten Entwicklung und Optimierung von Gewinnungsmethoden und Abbauverfahren stets zugrundeliegenden und über die Zeit verbesserten Wissen zur Gebirgsmechanik in den Abbauhorizonten und des Deckgebirgsverbandes sowie der vielfältigen geomechanischen und geohydraulischen Wechselwirkungen beider Beachtung geschenkt werden.

Wie bereits erwähnt, nahm der Abbau von Kalisalzen in den 1860er Jahren im Raum Staßfurt in Mitteldeutschland seinen Anfang und hatte – aufgrund der gänzlich neuartigen Wirtsgesteine, für die zum damaligen Zeitpunkt keinerlei praktische Erfahrungen vorlagen – bereits in den frühen Jahren mit teils dramatischen gebirgsmechanischen und hydrogeologischen Gefährdungen bis hin zum Verlust von kaum erst in Betrieb genommenen Bergwerken zu kämpfen. Diese in wirtschaftlicher Hinsicht für Betreiber und Investoren, aber auch für die gesamte betroffene Region ausgesprochen negativen Erfahrungen sorgten aber letztlich dafür, dass der Kalibergbau bereits frühzeitig von wissenschaftlichen Forschungsarbeiten begleitet wurde. Die Verbesserung der Gewinnungsmethoden, insbesondere die Optimierung der Abbauverfahren hinsichtlich der standortspezifischen lagerstättengeologischen Verhältnisse spiegelt letztlich diesen Kenntniszuwachs – nicht ausschließlich, aber vor allem auch – in der planmäßigen Reduzierung der Abbauverluste wieder. Im Hinblick auf die Ableitung des Standes der Technik zur Gewinnung fester Kalirohsalze ist es daher angebracht, in den folgenden Abschnitten diesen Fortschritt im Verständnis der gebirgsmechanischen und hydrogeologischen Randbedingungen, aber auch der Wechselwirkung von bergbaulich induzierten Verformungsprozessen und den hydraulischen Reaktionen im Deckgebirge und ihren Einflüssen auf die Entwicklung der Abbauverfahren in der Kaliindustrie in Deutschland, Nordamerika und Osteuropa – also den wesentlichen Kalibergbauregionen – zu beleuchten. Ohne dabei eine klare Abgrenzung von einzelnen Etappen nach Jahreszahlen vornehmen zu wollen, lassen sich doch 4 Zeiträume des wissenschaftlich-technischen Kenntniszuwachses und der darauf basierenden Entwicklung von Abbauverfahren für die Bergmännische und auch die Soltechnische Gewinnung von festen Kalirohsalzen aus dem geologischen Untergrund unterscheiden[97]:

Zeitraum von 1860 bis etwa 1940

Der Kalibergbau ist im Vergleich zur Gewinnung anderer Rohstoffe ein recht junger Industriezweig. Viele Jahrhunderte an Erfahrungen beim Abbau anderer mineralischer Rohstoffe kamen der Kaliindustrie in vielerlei Hinsicht zugute, nicht jedoch bezüglich der Gesteins- und Gebirgsmechanik sowie der spezifischen Montanhydrogeologie der Salzlagerstätten. Das Kriechverhalten sowie die hohe Löslichkeit von Mineralsalzen im Allgemeinen und Kalisalzen im Besonderen bedingen, dass die Dimensionierung der Sicherheitspfeiler sowie der hydrogeologischen Schutzschichten, welche die Abbaue von den wasserführenden Schichten trennen, bei der Bergbauplanung in erhöhtem Maße berücksichtigt werden müssen.

97 Es gibt keine exakte Abgrenzung zwischen den hier gewählten Zeiträumen, da die technischen Entwicklungen in der Kaliindustrie – wie auch in anderen Bergbauzweigen – eher in fließenden Übergängen und international gesehen, auch nicht genau zeitgleich stattfanden.

Diese Erkenntnisse entwickelten sich über Jahrzehnte durch anfangs wenig, später systematisches Ausprobieren. Dies hatte besonders in der Frühphase der Kaliindustrie bis etwa 1900 in Form von Gebirgsschlägen und dem Ersaufen von Bergwerken teilweise katastrophale Folgen verursacht. Wissenschaftler begannen deshalb bereits in den 1920er und 1930er Jahren, gebirgsmechanische Theorien und Gesetzmäßigkeiten auch für Evaporitgesteinsabfolgen aufzustellen (Kegel 1942a, /510/; 1942b, /511/; Stöcke 1943, /980/). Zahlreiche Veröffentlichungen während dieser Zeit behandelten die gebirgsmechanischen Eigenschaften von Mineralsalzen, die Besonderheiten von Kali- und Steinsalzbergwerken und den dort oft katastrophalen Wasser- beziehungsweise Salzlösungseinbrüchen. Sie wurden zur Grundlage für eine systematische und wissenschaftlich begründete Dimensionierung von Tragelementen. Spätestens in den 1940er Jahren hatte sich ein tragfähiges Verständnis der allgemeinen Ursachen für Gebirgsschläge auch im Kalibergbau entwickelt (Pawlik 1943a, /732/ bis 1943d, /735/; Averschin 1947, /40/; 1955, /41/).

Zumindest im Staate Preußen reagierte die Bergverwaltung unverzüglich auf die durch anfangs ungenügende Dimensionierung der Tragelemente verursachten Schadensfälle in der Frühzeit des Kalibergbaues und ordnete in ihren Verantwortungsbereichen, das heißt zunächst noch vor der vorletzten Jahrhundertwende in den preußischen Bergwerken im Nordharz-Revier, später auch für die preußischen Werke im Südharz, eine allgemeine Versatzpflicht für Kalisalzabbaue an (▸Box 5.1). Letztlich war dies die bergrechtliche Grundlage dafür, dass überall dort, wo es die lagerstättengeologischen und die bergtechnischen sowie auch die betriebswirtschaftlichen Randbedingungen zuließen, über lange Zeit bergbaueigene Rückstände und in geringeren Anteilen auch bergbaufremde Abfälle in die Abbauhohlräume versetzt wurden. Mit der in den Jahren 1908 bis 1915 erfolgreich durchgeführten Adaption des bereits im oberschlesischen Steinkohlebergbau entwickelten Spülversatzverfahrens auf den Kalibergbau im damals preußischen Bergwerk Bleicherode, im Südharz-Revier gelegen, setzte sich dieses Versatzverfahren schrittweise auch auf anderen Bergwerken durch. In den Bergwerken des Südharz-Kalireviers wurde der größte Teil der festen Aufbereitungsrückstände der Kalidüngemittelproduktion zum Teil mit Aschen aus den werkseigenen Kraftwerken gemischt und fast ohne Unterbrechung bis in die 1960er Jahre als Spülversatz nach unter Tage entsorgt (Schmidt 1944, /890/; Ruhmannseder 1955, /865/; Fulda, Gruchot & Michalzik 1966, /301/; Sivokon 1966, /946/; Sivokon & Garkushin 1970, /947/; Bodenstein & Schreiner 1999, /110/; Bodenstein & Rauche 2001, /109/; Hofmann 2001, /406/; Michalzik 2001, /649/). Der gesamte räumliche Grubenzuschnitt war während dieser Periode auf das Nebeneinander von Kali-, teilweise auch noch Steinsalzgewinnung und parallel verlaufendem Spülversatzbetrieb ausgelegt. Dies änderte sich erst mit der Einführung der Großgerätetechnik ab dem Ende der 1960er Jahre, was für den Erhalt der internationalen Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Kaliindustrie in Ost und West erforderlich wurde, aber einen gänzlich anderen Grubenzuschnitt erforderte.

Zeitraum von 1940 bis etwa 1970

Besonders während dieses Zeitraumes wurden die im Grundsatz auch heute gebräuchlichen Dimensionierungs- und Abbauverfahren speziell für die Kali- und Steinsalzindustrie entwickelt. Dabei galt es, stets die beiden Forderungen, die nach der Erhöhung der Bergbausicherheit[98] und die nach mehr Effizienz bei der Gewinnung, angemessen auszubalancieren. Der bergmännische Abbau von Kalisalzen erfordert in den Abbaufeldern immer eine Kammerpfeilerstruktur, welche entweder durch das in Deutschland praktizierte Bohren und Sprengen oder durch die unter anderem in Kanada und an der Oberen Kama in der ehemaligen Sowjetunion praktizierte Schneidende Gewinnung erreicht wird. Während dieser Zeit stellten die sowjetischen Kalibergwerke zur Produktivitätserhöhung den Abbau ihrer sylvinitischen Kaliflöze von Bohren und Sprengen auf Schneidende Gewinnung um. Für die carnallitischen Kaliflöze war und ist Bohren und Sprengen aufgrund der komplexen geologischen Strukturen und der mineralogischen Zusammensetzung des Rohsalzes die bevorzugte Variante.

Die Dimensionierung der Kammerpfeilersysteme basierte damals zwar größtenteils auf in situ gewonnenen Erfahrungen, jedoch begann die Kaliindustrie auch die Ergebnisse von Modellversuchen im Labor zu nutzen (Junghans 1953, /462/; Neuwirth 1959, /706/; 1960, /707/; Averschin 1961, /42/; Serata 1965, /916/; Uhlenbecker 1968, /1033/; Baar 1972a, /50/; 1972b,

98 Der Begriff Bergbausicherheit bezeichnet den anzustrebenden Zustand der Sicherheit eines Bergwerkes und der darin befindlichen Personen und Anlagen sowie der oberirdischen Bevölkerung in den vom Bergbau betroffenen Gebieten, der dort vorhandenen baulichen und Infrastruktureinrichtungen, Naturressourcen sowie des Landschaftsbildes. Er beinhaltet explizit ebenfalls die von den langfristigen Folgen eines aktiven oder inaktiven Bergbaus möglicherweise ausgehenden Gefahren und Schäden an baulichen und Infrastruktureinrichtungen, Naturressourcen sowie des Landschaftsbildes und die zu einer gegebenenfalls notwendigen Schadensregulierung erforderlichen Ewigkeitslasten. Mit seinen Geltungsbereichen in den vom Bergbau betroffenen Gebieten und auf die Nachbetriebsphase besitzt dieser Begriff eine große Schnittmenge zum abstrakteren Begriff der Öffentlichen Sicherheit.

/51/; Menzel et al. 1972, /644/). Zudem wurden die Ergebnisse aus der Überwachung der Senkungen über den Abbaufeldern zur Validierung der Modelle herangezogen (Höfer 1958, /401/). Die wissenschaftliche Disziplin der Gebirgsmechanik, welche den lagerstättenspezifischen gebirgsmechanischen Parametern und Eigenschaften erstmals erhöhte Aufmerksamkeit schenkte (Dreyer 1963, /209/; Höfer, Berthold & Menzel 1964, /402/; Potts & Hedley 1964, /772/; Kuznetsov 1967, /562/; Coolbaugh 1968, /169/), etablierte sich selbst bald als unabdingbar für die Abbauplanung. Ihr Fokus lag dabei zunächst auf der Bestimmung gesteinsmechanischer Parameter zur Charakterisierung des unterschiedlichen Verhaltens verschiedener Salzgesteine. Erste Untersuchungen der Zeitabhängigkeit dieser speziellen Eigenschaften der Salzgesteine[99] begannen ebenfalls in dieser Zeit (King & Acar 1969, /520/).

Später wurde die Beschreibung und Vorausberechnung des visko-elasto-plastischen Verhaltens der Salzgesteine mit Hilfe mathematisch-analytischer Verfahren versucht (Serata 1967, /917/; 1971, /919/; Menzel 1970, /639/). Die Nutzung computerbasierter Analysen bei der Anwendung der "Finite-Elemente-Methode" (FEM) zur Modellierung des Schichtenverhaltens wurde in den späten 1960er Jahren begonnen (John & Malina 1967, /460/) und auch rasch in der Salzmechanik etabliert. In der Folgezeit wurde die Wichtigkeit eines ganzheitlichen gebirgsmechanischen Ansatzes einschließlich theoretischer Analysen und physikalischer Tests unter Nutzung aller vorhandenen geologischen Daten sowie der Informationen aus der messtechnischen Überwachung der Abbauarbeiten erkannt (Abel 1969, /6/).

Ein Großteil der Ergebnisse aus diesen Arbeiten und Analysen wurde in der Bergbau- und Kaliindustrie weltweit ausgetauscht und angewendet. Bereits in den 1950er Jahren fanden regelmäßig nationale und internationale Symposien und Konferenzen statt, welche zu allgemeinen Entwicklungen in der Gebirgsmechanik aber auch zu salzspezifischen Themen informierten[100].

Hauptanliegen der wissenschaftlichen Untersuchungen und ihrer praktischen Erprobung war es nun, kurzfristig Verbesserungen des Arbeits- und Gesundheitsschutzes der Beschäftigten durch höhere First- und Stoßsicherheiten zu erreichen. Langfristig zielten die dabei entwickelten neuen Gewinnungsmethoden und Abbauverfahren aber auch auf eine verbesserte Bergbausicherheit (Spackeler 1950, /965/; 1957, /966/). Die ausschließliche Nutzung von Laborergebnissen oder Modellversuchen wurde dabei als unzureichend eingeschätzt, um eine fundierte Bewertung der Bergsicherheit ganzer Abbaublöcke, -felder oder gar Bergwerke abzugeben. Bereits 1965 kamen Peyfuss & Jacoby (1965, /755/) zu der Erkenntnis, dass eine sicherheitlich unbedenkliche Gesamtausbeute nicht aufgrund von Untersuchungen verschiedener Zahlenverhältnisse in einem begrenzten Modell ermittelt werden kann, da sich mit fortschreitender Gewinnung auch die Spannungsverhältnisse in einem Bergwerk ändern. Aufgrund der zum damaligen Zeitpunkt in Laborversuchen nur unzulänglich möglichen Simulation von in situ Bedingungen betonte Baar (1969, /49/) zudem, dass ein aufwendiges Programm von in situ Messungen unabdingbar für die Vorbereitung und Einführung einer sicheren Abbauplanung ist.

Netzwerke von Überwachungsstationen, zunächst zur Deformationsmessung (Konvergenz, Pfeilerquerdehnung), später auch zur Detektierung von Bruchprozessen mittels seismologischer Verfahren, wurden in diesem Zeitraum in Kalibergwerken weltweit installiert (Uhlenbecker 1968, /1033/; Coates & Muir 1969, /166/), um plötzliche sowie auch systematische Verformungen aufzeichnen zu können und somit eine Datenbasis für die sichere Abbaudimensionierung zu erhalten.

All diese geomechanischen und später auch geohydraulischen Untersuchungsarbeiten waren nicht einseitig auf das Gebirgsverhalten um Hohlraumsysteme aus bergmännischen Auffahrungen orientiert. Sie wurden ebenso für die Dimensionierung von Speicherkavernen für Kohlenwasserstoffe in salinaren Wirtsgesteinen angewendet. Die Soltechnische Gewinnung von Steinsalz war ein seit Jahrhunderten bekanntes und nach dem zweiten Weltkrieg im industriellen Stil vermehrt praktiziertes Verfahren. Folgerichtig nahmen mindestens ab den 1950er Jahren auch zunehmend Fragestellungen aus dem Kavernenbau für die Speicherung von Kohlenwasserstoffen, später auch für die Soltechnische

99 Zeitabhängigkeit der Entfestigung der Salzgesteine: Das charakteristische visko-elasto-plastische Kriechen von Salzgesteinen verursacht eine Umstrukturierung des Gesteins und seiner mineralischen Komponenten unter verschiedenen Drücken und Temperaturen. Diese Strukturänderungen bedingen eine schrittweise Veränderung der Gesteinseigenschaften im Laufe der Zeit.

100 Einige Beispiele hierfür sind: *US Rock Mechanics Symposium* seit 1956; *Conference of the International Rock Mechanics Bureau* von 1959 bis 1969; *Canadian Rock Mechanics Symposium* seit 1962; *International Symposium on Salt* seit 1962, sowie später auch *Conference on the Mechanical Behavior of Salt* seit 1981 und *International Conference on Ground Control in Mining* seit 1981.

BOX 5.1

Die Einführung des Spülversatzverfahrens im Kalibergbau – ein historischer Exkurs

Schadensfälle als Triebkräfte für die technische Entwicklung

Erstmals wurde der hydraulische Transport von Versatzmaterial wohl im Anthrazitbergbau in Pennsylvania, USA, im Zeitraum von 1880 bis 1883 erprobt (Pfütz 1912, /758/; Michalzik 1966, /648/; 2001, /649/; Zwartendyk 1971, /1159/; Gray 1990, /348/). Nachdem preußische Bergingenieure dieses Versatzverfahren vor Ort in Augenschein nehmen konnten, kam dieses seinerzeit neue und gegenüber dem arbeitsaufwendigen mechanischen Versatzeinbringen innovative Verfahren ab 1884 bis 1886 auch im Braunkohletiefbau Mitteldeutschlands zur Anwendung (Sternberg 1904, /979/). Im Jahre 1895 wurde ein vergleichbares Verfahren zur Bekämpfung von Grubenbränden im sächsischen Steinkohlebergbau eingesetzt und dort als Schlammverfahren bezeichnet. Auf dem unter preußischer Bergverwaltung stehendem oberschlesischen Steinkohlebergwerk Myslowitz (heute: Mysłowice, östlich Katowice) wurde bereits 1901 eine leistungsfähige Spülversatzanlage betrieben, deren Feststoffanteil hauptsächlich aus Sand bestand, der eigens zu diesem Zweck in Tagebauen gewonnen wurde (Rodatz 1913, /845/; Budryk 1929, /131/; Michalzik 2001, /649/).

Diese Anlage in Myslowitz war es auch, die für die Adaption des Spülversatzverfahrens auf die Kalibergwerke Pate stand. Zunächst wurde das Verfahren auf Initiative der zuständigen preußischen Bergaufsicht 1907 in Staßfurt erprobt, wo nach Gebirgsschlägen und Ersaufensfällen der größte Bedarf an Versatz in der noch jungen Kaliindustrie bestand. Die seit 1878, also 17 Jahre nach dem Beginn der planmäßigen Kalisalzförderung in Staßfurt, eingetretenen großflächigen Pfeilerbrüche, die beiden Gebirgsschläge am 17. August 1879 und 23. Dezember 1880 im anhaltinischen Bergwerk Leopoldshall, wie auch ähnliche Ereignisse auf den preußischen Schachtanlagen von der Heydt und von Manteuffel, veranlassten die preußische Bergverwaltung zur Polizeiverordnung des Königlichen Oberbergamtes Halle vom 01. September 1884, nach der das Versetzen der Kaliabbaue spätestens 18 Monate nach ihrer Leerförderung abgeschlossen sein musste.

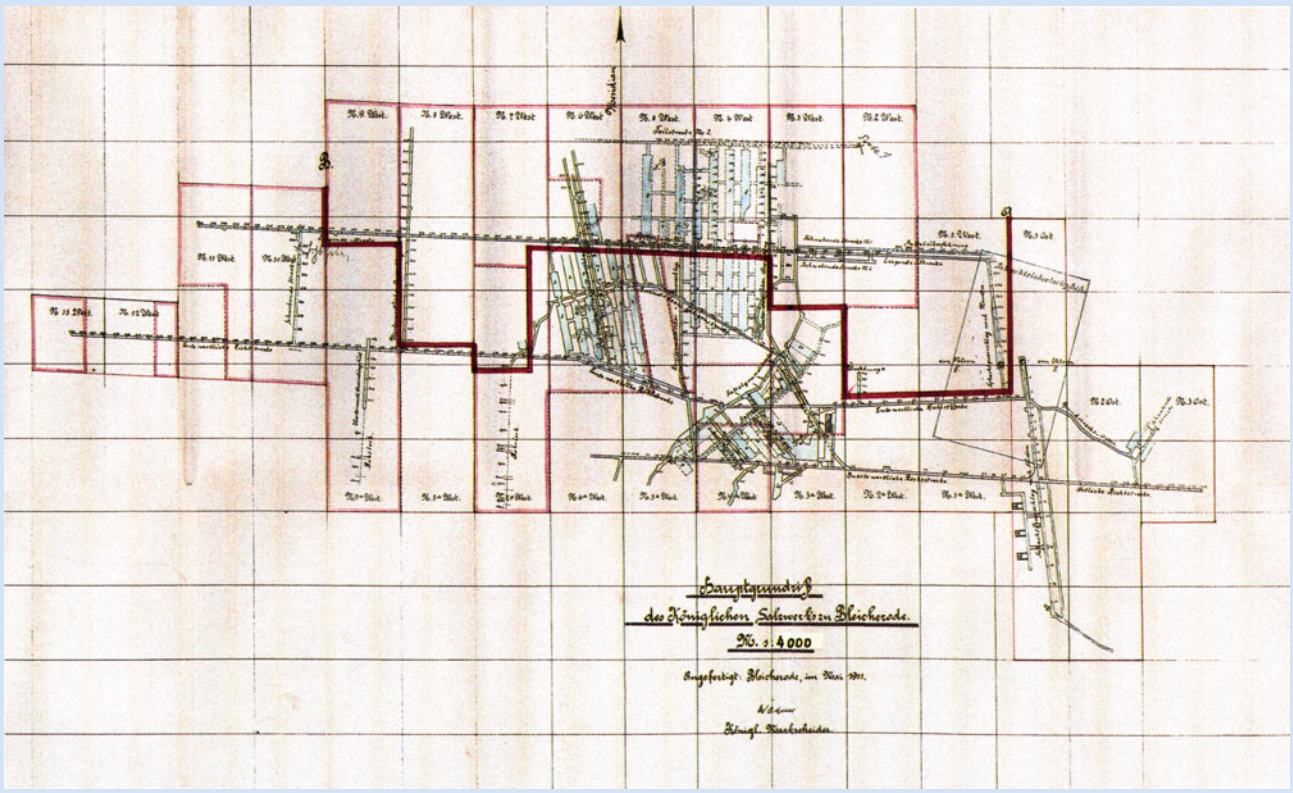
In Ermangelung fester Rückstände wurde in Staßfurt als Feststoffanteil im Spülversatzgemisch Kies verwendet (Michalzik 2001, /649/). Die schlechten hydraulischen Transporteigenschaften der Kiese vereitelten diesen Versuch, so dass er nach nur wenigen Monaten wieder aufgegeben wurde.

Adaption aus dem Kohlebergbau auf andere Bergbauzweige durch proaktive Bergverwaltung im Staate Preußen

Aber bereits im Jahre 1904, also gut ein Jahr nach Inbetriebnahme des ebenfalls vom preußischen Fiskus betriebenen Kaliwerkes Bleicherode, hatte man die Absicht formuliert, das aus Oberschlesien bekannte Spülversatzverfahren anzuwenden, worüber ein Brief des preußischen Ministers für Handel und Gewerbe, Oberbergrat Otto von Velsen, vom 14. Februar 1904 an das Königliche Oberbergamt Halle Auskunft gibt. Der praktische Versuchsbetrieb begann im Jahre 1908, der Antrag auf Zulassung des entsprechenden Betriebsplanes für den Routinebetrieb erfolgte bereits ein Jahr danach. Mit diesem Antrag war auch, erstmals für das noch junge Spülversatzverfahren im Bergbau überhaupt, der Gedanke der Beseitigung der bei der Kalidüngemittelproduktion unvermeidlich anfallenden festen Aufbereitungsrückstände formuliert, wenngleich auch die gebirgsmechanische Aufgabenstellung im Vordergrund stand.

In der Folge wurde im Kalibergwerk Bleicherode bis zu dessen Einstellung der Förderung im Jahre 1990 fast ohne Unterbrechung Spülversatz, mehrheitlich in Hartsalzabbaue eingebracht. Seit der Einführung der Großgerätetechnik gegen Ende der 1960er Jahre ist der Anteil der als Spülversatz nach unter Tage zurückgeführten Menge der insgesamt im Kaliwerk Bleicherode angefallenenen festen Aufbereitungsrückstände jedoch sukzessive geringer geworden und lag am Ende nur noch bei wenigen Prozent (Fulda, Jäger & Kutscha 1988; /303/; ERCOSPLAN 2015, /255/).

Dem Beispiel von Bleicherode folgten in kurzen Abständen auch die anderen Südharz- und Unstrut-Kaliwerke, das Bergwerk Sondershausen, wo von 1910 bis 1968, das Bergwerk Roßleben, wo von 1916 bis 1985, das Bergwerk Bischofferode, wo von 1920 bis 1971, das Bergwerk Sollstedt, wo von 1928 bis 1975 und das Bergwerk Volkenroda, wo von 1933 bis 1972 Spülversatz eingebracht wurde. Später kam auch das Kaliwerk Vienenburg im Nordharz-Kalirevier hinzu. Heute findet das Spülversatzverfahren im Bergwerk Unterbreizbach von K+S, Deutschland, und in mehreren von URALKALI betriebenen Bergwerken an der Oberen Kama in Russland Anwendung.



Historischer Grubenriss des Königlichen Salzwerkes Bleicherode aus dem Jahre 1911, also dem Zeitraum vor Einführung des Spülversatzverfahrens

Gewinnung von Kalisalzen breiten Raum in der geomechanischen Forschung ein.

In diesen Zeitraum fällt auch der Höhepunkt der Anwendung des Spülversatzverfahrens im deutschen Kalibergbau. Im Südharz-Kalirevier wurde nach 2 Schlagwetterexplosionen in den Bergwerken Pöthen und Sondershausen das Versatzeinbringen nach 1951 zunächst derart forciert, dass neue Versatzanlagen in Sondershausen, Pöthen, Sollstedt und auch an der Unstrut in Wangen errichtet wurden. Im Zeitraum von 1955 bis 1964 wurden im Südharz-Kalirevier mit insgesamt 10 Spülversatzanlagen 38 Millionen Tonnen fester Aufbereitungsrückstand in die seinerzeit aufgefahrenen Langkammerabbaue verspült, was etwa 60 Prozent des insgesamt angefallenen festen Rückstandes entsprach. Ein Rekord im Versatzeinbringen wurde im Jahre 1962 mit 5,3 Millionen Tonnen verspülte feste Rückstände erreicht, was 81 Prozent des bei der Rohsalzaufbereitung anfallenden Rückstandes entsprach (Michalzik 2001, /649/).

Zeitraum von 1970 bis etwa 1980

Die nunmehr fortschrittlicheren Abbauverfahren resultierten in einer höheren Produktivität, ganz besonders in Kanada und in der damaligen Sowjetunion, wo die lagerstättengeologischen Randbedingungen, insbesondere die Wertstoffgehalte der Rohsalze, ohnehin schon besser waren als im Mutterland der Kaliindustrie, Deutschland.

An der Oberen Kama in der damaligen Sowjetunion wurde beispielsweise eine neue Generation von Vollschnittmaschinen mit erhöhter Schneidkapazität eingeführt, was in wenigen Jahren zu einem enormen Anstieg der Gewinnungsleistung auf allen 3 damals in Betrieb befindlichen Werken führte. Für den Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Kaliproduzenten war es zwingend erforderlich, gleichfalls effizientere Abbaumethoden zu entwickeln. In beiden deutschen Staaten wurde deshalb etwa ab Mitte der 1960er Jahre mit der Einführung der Großgerätetechnik begonnen. Damit wurde auch das System der Zwischenförderung umgestellt, so dass in den späten 1960er Jahren erstmals leistungsfähige Bandförderer zum Einsatz kamen. Diese neue Abbautechnik erforderte aber auch den Wechsel vom Langkammerbau zum Kammerpfeilerbau mit quadratischen Pfeilern, wodurch letztlich eine deutlich verbesserte Lagerstättennutzung erreicht werden konnte (Sievers 1972, /932/; Autorenkollektiv 1978, /39/). Dabei war jedoch ein gänzlich anderer räumlicher Grubenzuschnitt für die neuen Gewinnungsfelder erforderlich, was unmittelbare Auswirkungen auf die Wetterführung, aber auch auf das in einzelnen Bergwerken aufgrund der dort günstigen geologischen und bergtechnischen Randbedingungen betriebene Spülversatzeinbringen hatte. In der Folge wurden im Zeitraum von 1968 bis 1985 in den Gewinnungsbergwerken der Flachen Lagerung im Südharz-Revier bis auf eine Ausnahme alle Spülversatzanlagen eingestellt, da der zeitlich parallele Betrieb von Gewinnung und Spülversatz in den durch quadratischen Kammerpfeilerbau erschlossenen Grubenfeldern zu erheblichen arbeitsorganisatorischen und vor allem auch Problemen des Arbeitsschutzes führte. Einer der profundesten Kenner und Fürsprecher des im deutschen Kalibergbau entwickelten und eingesetzten Spülversatzverfahrens, Arno Michalzik, resümiert 2001 zu den Gründen der recht abrupten Einstellung des Spülversatzbetriebes wie folgt: *"Ab 1963 trat ein deutlicher Rückgang des Versatzeinbringens ein, obwohl sich Fördermenge und anfallender Rückstand erhöhten. Die Einführung der Bergbaugroßgeräte mit dem room and pillar Abbauverfahren und ökonomische Gesichtspunkte führten dazu, dass mit der Fassung der ABAO 120/1 vom 14. Juli 1967*[101] *der versatzlose Abbau in den Südharzkaligruben sanktioniert wurde. In der Folge wurde bis 1970 die Mehrzahl der Spülversatzanlagen stillgelegt"* (Michalzik 2001, /649/; S. 21/22).

Allein im Kaliwerk Bleicherode war die Spülversatzanlage bis in das Jahr 1990 in Betrieb, obgleich bereits seit den 1970er Jahren nur noch geringe Teile der festen Aufbereitungsrückstände der Kalidüngemittelproduktion nach unter Tage verbracht und versetzt wurden. Das Bergwerk Bleicherode vor allem, aber in deutlich geringerem Umfang auch das Bergwerk Sollstedt, nehmen hierbei Sonderstellungen ein, da seit der Frühzeit ihrer Produktionsgeschichte nahezu ohne Unterbrechung bis in die 1980er Jahre auch ein regelmäßiger Versatzbetrieb mit der Zielstellung eines zumindest versuchsweise durchgeführten Pfeilerrückbaus vor allem in ausgewählten Hartsalzfeldesteilen betrieben wurde. Die wesentliche und einzig wirtschaftliche Motivation für diesen stets durch Sonderbetriebspläne zugelassenen Versuchsbetrieb bestand für die Bergwerke Bleicherode und Sollstedt in allererster Linie in einer Schonung der noch vorhandenen Hartsalzvorräte und damit in einer mittel- bis langfristigen Stabilisierung des K_2O-Gehaltes im Förderrohsalz, wie es für die

101 Anmerkung des Autors: ABAO 120/1 bezeichnet die Arbeitsschutz- und Brandschutzanordnung 120/1 – Technische Sicherheit im Bergbau (ABAO 1967, /3/), jene gesetzlich bindende Richtlinie, mit der die Versatzpflicht für die Südharz-Kalibergwerke aufgehoben wurde.

Mischsalzaufbereitung in den angeschlossenen Kaliwerken erforderlich war, und resultierte letztlich aus der begrenzten Vorratsmenge an Hartsalz gegenüber den Carnallititvorräten (▸Box 5.2).

Aus dem Nebeneinander des Einsatzes der seinerzeit fortschrittlichsten Großgerätetechnik – mit all ihren Vorteilen für die Leistungssteigerung, die Arbeitssicherheit[102] und insbesondere die Reduzierung des körperlichen Anteils der individuellen Arbeitsleistung der Beschäftigten unter Tage – und dem für den vormaligen Langkammerbau konzipierten Spülversatzverfahren resultierten gravierende Probleme für die Arbeitsabfolge sowie für die Arbeits- beziehungsweise Bergbausicherheit (Fulda 1964, /297/; 1986, /299/; Fulda, Gruchot & Michalzik 1966, /301/; Duchrow & Schilder 1985, /213/; Duchrow 1990, /212/; Michalzik 2001, /649/). Dementsprechend niedrig waren in diesen Bergwerken bis zur Einstellung der Kalisalzförderung auch die Gewinnungsleistungen: Im Durchschnitt wurden in den 1980er Jahren in Bleicherode 1,39 Tonnen und in Sollstedt 1,87 Tonnen Rohsalz pro verfahrener Arbeitsstunde gewonnen, im unmittelbar benachbarten, analoge lagerstättengeologische Bedingungen aufweisenden Bergwerk Bischofferode, wo kein Spülversatzeinbringen mehr und kein Pfeilerrückbau erfolgte, lag diese Kennziffer dagegen bei 2,71 Tonnen (KK 1985, /529/).

Ab den 1970er Jahren wurden vor allem in Deutschland aber auch andere Methoden – die teils seit der Frühzeit des Kalibergbaus sporadisch und räumlich begrenzt angewendet wurden – systematisch zur Reduzierung der Abbauverluste auch in größeren Feldesteilen von Bergwerken erprobt. Diese Methoden lassen sich weitgehend unter dem Begriff des Sekundärabbaues zusammenfassen: Einer auf standfeste Dimensionierung mit teils erheblichen Tragfähigkeitsreserven der Pfeiler ausgelegten Primärphase, folgte ein planmäßig in Teilbereichen des Abbaufeldes entwickelter Sekundärabbau, der durch das Strossen der Sohlen oder das Drücken der Firsten und/oder das Abklappen der Stöße eine Verminderung der Pfeilervolumina bewirkte.

Beispielhaft soll dies kurz für die beiden Bergwerke Merkers und Unterbreizbach, im thüringischen Teil des Werra-Kalireviers gelegen, erläutert werden, wo seit 1970 im Rahmen eines F/E-Vorhabens zur Dynamischen Gebirgsbeherrschung derartige Abbauversuche vor allem auf der 2. Sohle im Kaliflöz Thüringen durchgeführt und zumindest teilweise auch in die Praxis überführt wurden: Im Bergwerk Merkers erfolgte während der Primärphase eine Auffahrung am Hangenden, das heißt an der Basis des Mittleren Werra-Steinsalzes, mit 10 bis 14 Meter Kammerbreite und etwa 5 Meter Abbauhöhe. Die Auffahrungsbreite wurde auf die gebirgsmechanischen Randbedingungen (Teufe, Carnallit-Gehalt im Rohsalz und andere) variiert, welche durch eine vorausgehende geologische Bemusterung der Stöße und der Sohle ermittelt wurden. Während der Primärphase und nach Abschluss dieser erfolgte eine detaillierte Überprüfung der Pfeilertragfähigkeit, teilweise verbunden mit in situ Spannungssondierungen zur Bestimmung der Pfeilerbelastung. Anhand dieser Ergebnisse wurden die endgültigen und individuell auf den Gewinnungsbereich maßgeschneiderten Abbauparameter für die Sekundärphase festgelegt. In der Sekundärphase wurde eine Erweiterung der Kammerbreite auf 14 bis 18 Meter und ein Hereingewinnen der Firste bis maximal 12 Meter Abbauhöhe vorgenommen.

Im Bergwerk Unterbreizbach wurde neben dem oben bereits erwähnten Abklappen der Pfeiler und dem anschließenden Strossen auch ein Firstenstoßbau in 2 Gewinnungsphasen praktiziert. Dabei erfolgte in der Primärphase eine Auffahrung am Liegenden, das heißt an der Oberkante des Unteren Werra-Steinsalzes, mit 10 bis 14 Meter Kammerbreite und mit etwa 5 Meter Abbauhöhe. Auch hier wurde die endgültige Dimensionierung der Kammerpfeilersysteme nach eingehender Bemusterung und im Ergebnis gebirgsmechanischer Untersuchungen festgelegt. Auch hier wurden in der Sekundärphase die Kammern auf 14 bis 18 Meter erweitert und die Firste bis auf eine Abbauhöhe von maximal 12 Meter hereingewonnen.

Mit diesen Methoden konnten die Abbauverluste erheblich vermindert werden. Die Auswirkungen auf die Arbeits- und Bergbausicherheit sowie großen Senkungen an der Tagesoberfläche waren aber letztlich Gründe dafür, diese Abbaumethoden nicht weiträumig anzuwenden. Nichtsdestotrotz erforderten aber alle – nicht nur die zuletzt beschriebenen Versuche zur weiteren Abbauverlustsenkung – mit dem durch die Einführung der effektiven Großgerätetechnik erforderlichen Dimensionierungen beim Abbau mit quadratischen Pfeilern intensive gebirgsmechanische Untersuchungen sowie im Besonderen eine Langzeitüberwachung der Verformungen in den Abbaubereichen und dem darüber lagernden Deckgebirge (Uhlenbecker 1969, /1034/; Menzel 1972, /640/).

102 Der Begriff Arbeitssicherheit bezeichnet den anzustrebenden Zustand der Sicherheit der Beschäftigten bei der Arbeit, also die Beherrschung und Minimierung von Gefahren für ihre Sicherheit und Gesundheit.

BOX 5.2

Rückbau von Pfeilertragelementen zur Verminderung der Abbauverluste – Stand der Technik?

Verminderung der Abbauverluste im Hartsalz als grundlegende Motivation

Der partielle oder totale Pfeilerrückbau stellt eine in der Theorie vielfach diskutierte, verlustarme Variante des Kammerpfeilerbaus mit Versatz dar und wurde weltweit einmalig im Südharz-Kalirevier, insbesondere auf den Bergwerken Bleicherode, Neubleicherode, Sondershausen und Sollstedt seit 1917 (Schrader 1919, /892/) und in der Folgezeit zyklisch wiederkehrend in mehreren Etappen ausgiebig erprobt.

Die Fehler, die in den frühen Jahren bei der Abbaudimensionierung im Kalibergbau, insbesondere in Staßfurt, in Ermangelung an Erfahrungen mit den seinerzeit neuen Wirtsgesteinen gemacht wurden und zum Verlust ganzer Bergwerke führten, waren für die staatliche Bergaufsicht bereits in den 1880er Jahren Anlass, höhere Tragfähigkeitsreserven der Pfeiler und das nachträgliche Versetzen der Abbaue zur Stabilisierung der Grubenhohlräume zu fordern. Ersteres führte zwangsläufig zu höheren Abbauverlusten und beides gemeinsam zum Anstieg der Betriebskosten. Es ist daher nicht verwunderlich, dass unmittelbar nach der erfolgreichen Erprobung des Spülversatzverfahrens bereits seit etwa 1912 auch Bestrebungen formuliert wurden, den betriebswirtschaftlichen Aufwand für das Versatzeinbringen zumindest teilweise durch Verringerung der Pfeilerbreiten und/oder den Rückbau von Tragelementen, also letztlich durch die Verminderung der Abbauverluste, zu kompensieren. Diese also bereits in der Frühzeit der Kaliindustrie formulierte Motivation kehrte in der weiteren Entwicklungsgeschichte zyklisch wieder (Gimm 1961, /330/; Höfer, Fulda & Seidl 1967, /403/; Miller 1983, /656/; Fulda, Jäger & Kutscha 1988, /303/) und nährt sich bis in unsere Tage, nicht zuletzt auch aus dem Streben nach einer nachhaltigen Ressourcennutzung (Roulston 1995, /852/; Rauche & Mierdel 2000, /806/; Michalzik 2001, /649/; Rauche, Fulda & Schwalm 2001, /813/; Rauche 2002b, /797/; Schilder 2003, /880/). Mit welchen großen Hoffnungen solche Bestrebungen theoretisch vorbereitet und in der bergmännischen Praxis dann auch erprobt wurden, kommt in einem Definitionsversuch der Begriffe Pfeilerrückbau beziehungsweise totaler Pfeilerrückbau aus den 1980er Jahren zum Ausdruck:

> "*Der totale Pfeilerrückbau ist die höchste Form einer verlustsenkenden Maßnahme im Kalibergbau bei hohen Mächtigkeiten, da die Vorräte bis auf den Streckenpfeiler restlos abgebaut werden können. Die Anwendung des Pfeilerrückbaus setzt ein vollständig verspültes Abbaufeld voraus, in welchem, bedingt durch geneigte Lagerung, der Versatz 100prozentig eingebracht werden konnte. Unter dieser Voraussetzung ist die Rückgewinnung eines jeden Abbaupfeilers, der aus mindestens fünf Jahre zurückliegenden Abbauperioden stammen muss, möglich.*" (Heinz & von der Osten 1982, /381/: S. 322).

Einschränkungen der Anwendbarkeit selbst im optimalen Grubenzuschnitt des Langkammerabbaus

Schon diese Definition schränkt die Anwendbarkeit des Pfeilerrückbaus auf solche Fälle ein, in denen spezielle Voraussetzungen erfüllt sind: Pfeilerrückbau ist nur dort möglich, wo ein vollständig verspültes Abbaufeld zur Verfügung steht, woraus entsprechende Anforderungen an das Abbau- und Versatzverfahren beziehungsweise deren zeitlicher Aufeinanderfolge im gesamten Grubenfeld resultieren. Pfeilerrückbau ist nur dort möglich, wo die geneigte

Lagerung eine 100prozentige Verfüllung der Abbaukammern ermöglicht hat, so dass Form- und Kraftschluss zwischen Versatzmaterial und Gebirge auch an den Firsten gewährleistet ist. Pfeilerrückbau ist nur dann möglich, wenn die Zeitspanne von mindestens 5 Jahren zwischen Abschluss des Versatzeinbringens und Beginn des Pfeilerrückbaus zur Entwicklung einer hinreichenden Festigkeit des Versatzmaterials gegeben ist. Letztlich bringen diese Einschränkungen zum Ausdruck, dass ein Pfeilerrückbau nur unter sehr spezifischen lagerstättengeologischen und bergtechnischen Randbedingungen denkbar ist, weil das Versatzmassiv nur dann tatsächlich in der Lage ist, die geomechanische Funktion der Abbaupfeiler als Tragelement zu übernehmen und die Lasten der überlagernden Gesteinsschichten tragen kann.

Selbst für die Südharz-Kalibergwerke sind solche Voraussetzungen nur selten erfüllt gewesen. Dies hatte seine Ursache nicht zuletzt auch darin, dass die aus den Staßfurter Bergwerken entlehnte Versatzforderung für die Kalibergwerke im Südharz-Kalirevier frühzeitig gelockert und den hier tatsächlichen Erfordernissen angepasst wurde. In dessen Folge wurde anstatt des im Nordharz-Kalirevier aus der Erfahrung mit dem dort abgebauten Carnallitit ursprünglich verordneten vollständigen Versetzens der Abbauhohlräume auch ein nur teilweises Verfüllen, der sogenannte Teilversatz, zugelassen. Abbaue im Hartsalz waren von der Versatzforderung später generell ausgenommen, stellten aber zu dieser Zeit die hauptsächlich betriebenen Gewinnungsorte dar (Schilder 2003, /880/). Die Verfügbarkeit vollständig verspülter Abbaufelder schränkte sich daher stark ein.

In den frühen Versuchen auf dem Bergwerk Bleicherode wurde nach Abschluss der ersten Abbauphase der gesamte Baublock verspült und nachfolgend jeder (totaler Pfeilerrückbau) beziehungsweise jeder zweite (partieller Pfeilerrückbau) Pfeiler abgebaut. Später wurden Pfeiler mit größerer Breite planmäßig stehen gelassen, um die Pfeilergewinnung produktiver gestalten zu können, als dies bei den üblichen 5 oder 6 Meter breiten Pfeilern möglich war (Schilder 2003, /880/). Einer der profundesten Kenner des deutschen Kalibergbaus, Georg Spackeler, urteilte mit dem Abstand von 2 Jahrzehnten über diesen Versuchsbetrieb wie folgt:

> *"Immerhin waren, das muß anerkannt werden, die Verhältnisse denkbar günstig für den Versuch. Daß er trotzdem scheiterte, zeigt wenigstens für das Hauptkalilager die Unmöglichkeit des Totalabbaues, oder überhaupt eines Abbausystems, das auf die jetzt üblichen Salzfesten verzichtet, trotzdem aber eine bruchfreie Erhaltung des Hangenden in seiner ursprünglichen Lage erstrebt."* (Spackeler 1950, /965/: S. 122).

Wiederholter Versuchsbetrieb aber keine erfolgreiche Übertragung in die industrielle Praxis

Nach dem Ersten Weltkrieg gewann der Pfeilerrückbau in mehreren Südharz-Bergwerken wieder an Bedeutung, weil durch den kriegsbedingten Arbeitskräftemangel der Vorlauf an aus- und vorgerichteten Feldesteilen weitgehend aufgebraucht war und die Nutzung der eigentlich den Abbauverlusten zuzuordnenden Lagerstättensubstanz in den Pfeilern die Produktion kurzfristig zu sichern half. Die im Bergwerk Sondershausen zeitweise durchgeführten Großversuche zum Pfeilerrückbau wurden bereits im Zeitraum 1924/1925 aufgrund erheblicher Probleme mit der Arbeitssicherheit und auch aus wirtschaftlichen Gründen wieder eingestellt (Gimm 1961, /330/).

▶

Rückbau von Pfeilertragelementen zur Verminderung der Abbauverluste – Stand der Technik?

In der Zeit während des Zweiten Weltkrieges erfolgte, wiederum bedingt durch den Arbeitskräftemangel, die Einstellung des Spülversatzes und der Übergang zum offenen Kammerbau ohne Versatz. Auch durch diese Entwicklung ging der Vorrat an verspülten Abbaublöcken für die Fortsetzung der Pfeilerrückbauversuche bis in die 1950er Jahre weiter zurück.

Nichtsdestotrotz konnten ganz besonders durch die unermüdlichen Erprobungsversuche auf dem Kalibergwerk Bleicherode wichtige Erfahrungstatsachen geschaffen werden. Im Grubenfeld Bleicherode entwickelte sich der Abbau ab 1901 von den Schachtanlagen Bleicherode (Revier I und II) und ab 1912 auch von Kleinbodungen (Revier III und IV) aus. Im Bereich der Schächte Bleicherode erfolgte vorzugsweise flächenhafter Hartsalzabbau in Langkammern mit Schrappertechnik mit 12 Meter Kammerbreite und bis 8,5 Meter Kammerhöhe bei Pfeilerbreiten von 8 Meter. Die Kammern wurden in einem Zeitraum von 1 bis 3 Jahren nach dem Abbau vollständig verspült. Der gesamte räumliche Grubenzuschnitt dieser Gewinnungsetappe und auch die Größe der in sich geschlossenen Baufelder bot ideale Voraussetzungen für einen Pfeilerrückbau. Ab 1920 wurde dies auch – für damalige Verhältnisse – recht umfangreich betrieben, versprachen doch sowohl die hier sehr wertstoffhaltigen Hartsalzvorräte wie auch die Nähe zu den Schächten einen profitablen Sekundärabbau durch Pfeilerrückbau mit nachfolgendem Spülversatz. Beispielsweise wurde im Zeitraum von 1920 bis 1930 unweit der Bleicheröder Schächte in 2 kleinen Abbaurevieren totaler Pfeilerrückbau und im Zeitraum von 1950 bis 1960 partieller Pfeilerrückbau, das heißt der Rückbau jedes zweiten Pfeilers, in einem etwas größeren westlich beziehungsweise nordwestlich der Bleicheröder Schächte gelegenen Feldesteil erprobt (Gimm 1961, /330/). Die Größe der im Zeitraum von 1920 bis 1930 total abgebauten Fläche betrug etwa 45.000 Quadratmeter (Ruhmannseder 1955, /865/). Besonders die jüngere der beiden Erprobungsetappen wurde durch ein gezieltes markscheiderisches und gebirgsmechanisches Monitoringprogramm begleitet, so dass die Einflüsse und Auswirkungen des Pfeilerrückbaus auf benachbarte Grubenbaue und auch auf die Absenkung der Hangendschichten und das Senkungsgeschehen an der Tagesoberfläche untersucht werden konnten. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass benachbarte Grubenbaue deutlich stärker gebirgsmechanisch beansprucht wurden, so dass Schadensbilder wie Stoßabschalungen, Rissbildungen in der Firste, Sohlenrisse und Schichtgleiten häufig auftraten und nicht selten Unfälle verursachten. Zudem wurden an der Tagesoberfläche über einem der Abbaureviere, in welchem im Zeitraum von 1920 bis 1930 der totale Pfeilerrückbau stattgefunden hatte, Senkungen von mehr als 1 Meter beobachtet (Ruhmannseder 1955, /865/; Gimm 1961, /330/).

Eine letzte Erprobungsphase des Pfeilerrückbaus im Bergwerk Bleicherode erfolgte in den 1970er und 1980er Jahren. Sie wurde notwendig, da nur noch sehr begrenzt Hartsalzvorräte zur Verfügung standen, die jedoch zur Stabilisierung des K_2O-Gehaltes für die mittlerweile

auf Mischsalzverarbeitung umgestellte Aufbereitungsanlage dringend erforderlich waren. Während dieser Zeit wurde in kleineren Baufeldern entsprechend der dort anstehenden Wertstoffgehalte selektiv ein totaler Pfeilerrückbau praktiziert. Bis 1995 traten über den Baufeldern mit Pfeilerrückbau lokal Gesamtsenkungen von über 2 Meter auf.

Auch durch den Pfeilerrückbau in verspülten Feldesteilen, vor allem aber durch den Abbau größerer Hartsalzmächtigkeiten in der Sekundärphase und dem Rückbau überdimensionierter, gedrungener U-Pfeiler im Hartsalz konnten zwischen 1970 und den 1980er Jahren die Abbauverluste bei der Hartsalzgewinnung im Bergwerk Bleicherode von ehemals 45 Prozent auf etwa 35 Prozent reduziert werden.

Ähnliche Versuche wurden auch im benachbarten Kalibergwerk Sollstedt im Zeitraum von etwa 1980 bis 1988 durchgeführt. Hier konzentrierte sich der Pfeilerrückbau in der sekundären Abbauphase ebenfalls auf schachtnahe Feldesteile, welche im Zeitraum der 1950er bis 1960er Jahre aufgefahren und versetzt worden waren. Auch hier zielte der Sekundärabbau auf die kurzfristige Stabilisierung des immer weiter sinkenden K_2O-Gehaltes im Förderrohsalz.

In den 1980er Jahren wurden darüber hinaus auch theoretische Untersuchungen zur Möglichkeit eines Pfeilerrückbaus im Carnallitit angestellt und auch in situ Versuche in einem isolierten Carnallititabbaublock wiederum im Bergwerk Bleicherode durchgeführt (KK 1984, /528/).

Erfahrungstatsachen in anderen Ländern bestätigen die eingeschränkte Anwendbarkeit

Von den Forschungseinrichtungen der Kaliindustrie in der früheren Sowjetunion wurden ebenfalls Betrachtungen/Untersuchungen zu den Möglichkeiten der Anwendung/Einführung des Pfeilerrückbaus in den russischen Kaliwerken in der Flachen Lagerung angestellt (Borsakovskij & Papulov 1994, /120/). Die Grundlagen dieser Betrachtungen/Untersuchungen basieren unter anderem auch auf den Ergebnissen von gesteinsmechanischen Untersuchungen, welche an Versatzmaterial aus den Südharz-Bergwerken durchgeführt wurden und von Michalzik (1966, /648/) vorbildlich dokumentiert worden sind. Letztendlich sehen auch die russischen Fachleute aufgrund der nicht kalkulier- beziehungsweise nicht beherrschbaren arbeits- und bergbausicherheitlichen Probleme und der damit verbundenen Risiken bis heute keine Möglichkeiten zur Einführung eines Pfeilerrückbaus auf einem russischen Kaliwerk in der Flachen Lagerung.

Großflächiger Pfeilerrückbau ist nicht Stand der Technik

Trotz der Anerkennung der in Teilen auch erfolgreichen Versuche im Südharz-Kalirevier zeigen die Erfahrungstatsachen jedoch, dass die partielle oder vollständige Pfeilerrückgewinnung nach dem Einbringen von festen Aufbereitungsrückständen in Abbauhohlräume der Flachen Lagerung mit Hilfe des Spülversatzverfahrens sich selbst in der Praxis des früher mit Schrapperförderung betriebenen Langkammerabbaus nicht bewähren konnte. Dieses Verfahren kann damit auch nicht dem Stand der Technik zugesprochen werden, ganz ungeachtet dessen, dass es im Kammerpfeilerbau mit quadratischen Pfeilern, wie er heute in der Flachen Lagerung mit Bergbaugroßgeräten betrieben wird, niemals in situ erprobt wurde.

Die mit solchen Monitoringprogrammen gewonnenen Messergebnisse und Erfahrungstatsachen führten zu einem erheblich verbesserten wissenschaftlichen Verständnis des Spannungsverformungsverhaltens der Tragelemente im Gewinnungshorizont sowie der Auswirkungen auf das Liegende und das Hangende, einschließlich der darin befindlichen Schutzschichthorizonte. Wesentlich waren hier auch die Erkenntnisse über diverse Maßstabseffekte und die Entwicklung von geeigneten Strategien, mit solchen bei der Übertragung der Ergebnisse aus dem gesteinsmechanischen Experiment in die gebirgsmechanische Wirklichkeit des Bergwerkes umzugehen.

Die Entwicklung dieses Kenntnisstandes ist zum Beispiel für die russische Kaliindustrie in den einschlägigen, turnusmäßig fortgeschriebenen bergbehördlichen Normativen von damals verankert. Allein ihre Titel wie "Instruktionen zum Schutz von Übertageeinrichtungen und Umwelt gegen Schäden aus dem untertägigen Abbau und zum Schutz von Bergwerken gegen das Ersaufen unter Berücksichtigung der Eigenschaften der Oberen-Kama-Kalilagerstätte" (MINING INSTITUTE 2014, /657/) reflektieren den Hauptzweck der angewendeten Richtlinien hinsichtlich der Bergbau- und öffentlichen Sicherheit[103] sowie der Umwelt. Die ursprünglichen Instruktionen (VNIIG 1960, /1070/) aus den 1960er Jahren, welche noch auf den Dimensionierungsvorgaben aus anderen Bergbauzweigen basierten, wurden auf die besonderen Bedingungen dieser Kalilagerstätte angepasst, repräsentierten in ihrer heutigen Fassung den verbesserten Kenntnisstand. Innerhalb dieser Instruktionen kommt der Integrität der hydrogeologischen Schutzschicht in zunehmendem Maße eine herausragende Bedeutung zu.

In den Zeitraum der späten 1970er Jahre fielen im Kalibergbaurevier an der Oberen Kama und auch in den damals noch in Verhieb stehenden ukrainischen Lagerstätten umfangreiche F/E-Arbeiten zur weiteren Abbauverlustsenkung mit Hilfe von Versatzverfahren (Sivokon 1966, /946/; Sivokon & Garkushin 1970, /947/; Garkushin 1972, /311/; 1984, /308/; 1990, /309/), die sich in dieser Form jedoch aus ähnlichen Gründen wie in Deutschland im praktischen Betrieb niemals bewährt haben. Ähnliche planerische Konzepte für das Einbringen von Versatz, die letztlich ebenfalls nicht in der industriellen Praxis etabliert werden konnten, wurden etwa anderthalb Jahrzehnte später auch in Saskatchewan (Coode 1998, /167/) und in New Brunswick (Young 1990, /1149/), beides Kanada, entwickelt.

Dieser Zeitabschnitt war außerdem durch die Diversifizierung der Forschung auf verschiedene Aspekte der Gebirgsmechanik geprägt. Laborversuche und Analysen von Überwachungsdaten bezogen nun auch spezifische mineralogische Rohsalzzusammensetzungen (Manker 1969, /618/; Menzel et al. 1972, /644/; Mraz 1972, /685/; 1973, /686/; 1978, /687/; Menzel 1975, /641/; Georgi, Menzel & Schreiner 1975, /322/; Menzel & Schreiner 1977, /642/; Mróz & Zadroga 1980, /690/; Munson & Dawson 1980, /695/; Böhnel, Menzel & Schreiner 1981, /113/) und das zeitabhängige Verhalten im Nachbruchbereich (*post-failure behaviour*) sowie die entsprechenden Reaktionen des Deckgebirges und der postsalinaren Schutzschicht auf die Verformungsprozesse im Gewinnungshorizont ein (Chang & Nair 1973, /150/; Nair et al. 1973, /699/). Erkundungsmethoden wurden durch die Verbesserung der vorhandenen Vermessungsmethoden und die Einführung neuer Verfahren, wie zum Beispiel Radar und sonarbasierter Methoden (Cook 1973, /168/), verbessert, so dass Störungen nicht nur in den Kalilagern und den anliegenden Schutzschichten, sondern auch im weiteren Vorfeld und im Deckgebirge erkannt werden konnten. Bereits in den 1960er Jahren verbreitete sich die Reflexionsseismik als Verfahren für die Erkundung der hydrogeologischen Schutzschichten. Um das Deckgebirgsverhalten detailliert zu beobachten, wurden zudem Senkungsüberwachungen verwendet. Die Ergebnisse von weitläufigen Senkungsüberwachungen wurden außerdem für die Erweiterung der vorhandenen Datenbasis zur Modellierung der Deckgebirgsreaktionen auf bergbauinduzierte Verformungen genutzt (Serata & Schultz 1972, /921/; Chang & Nair 1973, /150/; Averschin 1976, /43/; Wassmann 1978, /1097/; Davies 1983, /183/; Mraz & Jones 1986, /689/; Peng, Mraz & Gendzwill 1986, /745/).

Zeitraum von 1980 – Gegenwart

Diese Jahrzehnte sind hauptsächlich durch die Weiterentwicklung der vorhandenen, etablierten Abbauverfahren geprägt. Verbesserte Vollschnittmaschinen mit erhöhten Schneidleistungen wurden sowohl in Saskatchewan, Kanada, als auch an der Oberen Kama, Russland, eingeführt. Die Ladekapazität der in Deutschland verwendeten Ladetransportfahrzeuge (LTF) wurde

[103] Der hier verwendete abstrakte Rechtsbegriff "Öffentliche Sicherheit" umfasst den Schutz vor Schäden, die entweder Gemeinschafts- oder Individualgütern drohen. In dem hier zur Rede stehenden Kontext zählen die verfassungsmäßige Ordnung, besonders der Bestand des Staates und seiner Einrichtungen und dessen rechtmäßiges Funktionieren, sowie die Rechtsordnung in ihrer Gesamtheit zu den gemeinschaftlichen, sowie insbesondere das Leben, die Gesundheit, die Freiheit und das allgemeine Persönlichkeitsrecht des Einzelnen zu den individuellen Schutzgütern. Er entspricht also weitgehend dem gleichlautenden Grundbegriff im Polizei- und Ordnungsrecht der Bundesrepublik Deutschland.

drastisch erhöht und das Zusammenspiel der unterschiedlichen Bergbaumaschinen und -anlagen entlang der Förderkette insgesamt erheblich verbessert. Höhere Gewinnungsraten in allen Revieren waren die Folge und auch der Grund für eine weitere Intensivierung der geomechanischen Forschungen aber auch für neuartige Erkundungs- und Monitoringverfahren, wie die modernen Radar- und Sonarmethoden für die 3D-Seismik und seismische Tomografie (Görisch & Yaramanci 1994, /343/; Prugger 1994, /776/; Manthei 1997, /619/; Eisenburger & Gundelach 2000, /233/; Prugger & Nemeth 2001, /780/; Taylor et al. 2001, /1001/; Kovin et al. 2002, /553/; Prugger, Nemeth & Danyluk 2004, /781/; Kovin 2010, /552/). In situ Spannungssondierungen wurden nunmehr routinemäßig angewendet und wurden zu einem die klassischen markscheiderischen Deformationsmessungen ergänzendem Werkzeug für die Beurteilung der Standsicherheit von Tragelementen im Kalibergbau (Anders 1988, /21/; Mocka 1994, /675/; Stäubert 1990, /974/; 1997, /975/)

Gebirgsmechanische Studien dieser Zeit konzentrierten sich auf die Überwachung und Beschreibung des Verhaltens von Salzgesteinen, um die vorhandenen beschreibenden Stoffgesetze zu verbessern (Hüls, Menzel & Schreiner 1980, /423/; Lux & Heusermann 1983, /610/; Mellegard, Pfeife & Senseny 1983, /637/; Rokahr & Staudtmeister 1983, /850/). Diese Stoffgesetze werden für die Entwicklung und Verfeinerung von Vorhersagemethoden für mögliche Gebirgsdeformationen genutzt (Lindert & Schreiner 1988, /595/). Die Überwachung von seismischen Ereignissen und die Analyse ihrer Zusammenhänge mit der Abbautätigkeit gewannen an Bedeutung (Ahorner 1989, /14/; Gendzwill & Prugger 1991, /320/; Prugger & Gendzwill 1992, /778/; 1993, /779/; Gendzwill & Unrau 1996, /321/; Kosteniuk & Prugger 1999, /547/; Baryakh 2001f, /73/; 2001g, /74/; Malovichko et al. 2009, /617/). Untersuchungen von Gebirgsschlägen (Gendzwill 1984, /318/; Mraz & Jones 1986, /689/; Gendzwill & Prugger 1990, /317/; Malovichko et al. 2001, /615/, Berest et al. 2008, /92/; Minkley et al. 2012, /670/), wie demjenigen 1989 in Völkershausen (Ahorner 1989, /14/; 1991, /15/; Minkley 1997, /660/; 2004b, /664/; Minkley & Mühlbauer 2007, /666/), halfen, die Mechanismen der durch Bergbau induzierten seismischen Ereignisse besser zu verstehen.

Verbesserte Prüfapparate- und Steuerungstechnik ermöglichten weitere Fortschritte in der Gesteinsmechanik, wodurch letztlich die Entwicklung realistischerer Stoffgesetze möglich wurde. Gleichzeitig wurde durch die Weiterentwicklung der Computertechnik die Implementierung solcher Stoffgesetze in numerisch anspruchsvolle 2D- und 3D-Modelle möglich (Cundall & Board 1988, /175/; De Souza 1993, /188/; Salzer, Konietzky & Günther 1999, /873/; Van Sambeek 2000, /1062/; Minkley et al. 2001, /672/; Günther & Salzer 2007, /357/; ITASCA 2007, /443/; Minkley & Mühlbauer 2007, /666/; Minkley, Mühlbauer & Storch 2007, /673/; Minkley, Knauth & Wüste 2012, /671/;). Mit der Vielzahl der Modellierungsmöglichkeiten erwuchs auch das Bewusstsein, die Resultate der Modellrechnungen durch reale Messreihen zu verifizieren und die Modelle selbst durch Rückrechnungen von Schadensfällen zu validieren. So wurde letztlich das Sprödbruchverhalten von Carnallitit einschließlich der Entfestigungsprozesse für die bergmännische Praxis im deutschen Kalibergbau hinreichend prognostizierbar (Minkley 1997, /660/; 2004a, /663/; Menzel, Minkley & Salzer 2000, /645/), was später auch in anderen Kalibergbaurevieren Nachahmung fand (Stead, Eberhardt & Szczepanik 2000, /976/; Hustoft, Arnold & Roberts 2012, /426/). Gleichfalls wurden die vom Gewinnungshorizont auf das umlagernde Gebirgsmassiv einschließlich der Schutzschicht(en), wirkenden Verformungsprozesse und deren Auswirkungen auf die Integrität letzterer durch Kopplung gebirgsmechanischer und hydraulischer Modelle (Baryakh 2001c, /70/; 2001e, /72/; Günther & Salzer 2007, /357/; Minkley, Mühlbauer & Storch 2007, /673/; Minkley, Knauth & Wüste 2012, /671/) und auch der Einfluss von Materialgrenzen, wie Schichtflächen (Minkley & Mühlbauer 2007, /666/), berechenbar (▸Box 5.3).

Diese Fortschritte in der Geomechanik und Geohydraulik, vor allem aber im Verständnis der Interaktion beider, machten es möglich, klassische Abbauverfahren fester Kalirohsalze weiter zu optimieren (Sievers 1972, /932/; Duchrow 1978, /211/; Müller & Fruth 1978, /693/; Duchrow, Fulda & Schwandt 1980, /216/; Prugger & Jones 1980, /786/; Thoma & Knoll 1980, /1007/; Serata 1982, /920/; Miller 1983, /656/; Molavi 1987, /677/; Anders 1988, /21/; Duchrow et al. 1990, /214/; Bieniawski & Bieniawski 1994, /102/; Mocka 1994, /675/; Menzel, Minkley & Salzer 2000, /645/; Andrejchuk 2002, /22/; Bey, Marakov & Salnikov 2014, /95/). Die Senkung der Abbauverluste bis auf ein wirtschaftlich und sicherheitlich ausgewogenes Optimum war zweifellos eine ständige und letztlich ökonomische Motivation für diese Entwicklung. Vielfach – und ganz besonders auf den deutschen Lagerstätten – spielten für den Gewinnungsbergbau die Aspekte des Arbeitsschutzes eine entscheidende Rolle.

BOX 5.3

Sprödbruch und Entfestigung im Carnallitit – Ursache großer Schadensereignisse

Gebirgsschläge und bergbauinduzierte Seismizität im Carnallititbergbau

Gebirgsschläge, also das spontane Versagen von Pfeilerensembles und/oder von Gebirgsfesten und das damit verursachte Zubruchgehen einzelner Grubenbaue bis hin zu ganzen Feldesteilen haben den Carnallititbergbau seit den frühen Jahren der Kaliindustrie begleitet (Gimm & Pforr 1961, /332/; Ahorner 1991, /15/; Minkley 1998, /661/; Malovichko et al. 1999, /616/; Minkley & Menzel 1999, /665/; Malovichko et al. 2001, /615/; Minkley 2004a, /663/). Diese spezifischen, bergmännisch induzierten Bruchprozesse haben ihre Ursachen in dem gegenüber Steinsalz und Sylvinit andersartigen Spannungs-Verformungsverhalten des Carnallitits und seiner Neigung zum Sprödbruch, wobei der Mineralgehalt an Carnallit eine entscheidende Rolle spielt. Diese physikalischen Zusammenhänge sind erst in den letzten Jahrzehnten vollständig geklärt worden, waren mindestens bis in die 1970er Jahre allenfalls aus empirischen Überlegungen in Ansätzen bekannt und dementsprechend früher vielfach auch nicht in hinreichendem Maße bei der Dimensionierung der Carnallititabbaue und der Planung der Zeitabfolge des Gewinnungsregimes berücksichtigt worden.

Gebirgsschläge im Carnallititbergbau

Datum	Kalibergwerk Revier	Kalilager	Teufe [m]	Bruchfeldgröße [m²]	Spontanabsenkung [m]	Magnitude [M_L]
11. November 1901	Ludwig II Nordharz-Revier	Staßfurt (Zechstein 2)	693 m-Sohle	60.000	unbekannt	
22. Januar 1916	Angersdorf Saale-Revier	Staßfurt (Zechstein 2)	740	36.000	3,50	3
24. Mai 1940	Krügershall Saale-Revier	Staßfurt (Zechstein 2)	660	600.000	0,10 – 0,20	4,3
22. Februar 1953	Wintershall Werra-Revier	Begleitflöz des Kalilagers Hessen (Zechstein 1)	500	700.000	2,20	5
08. Juli 1958	Merkers Werra-Revier	Hessen und Thüringen (Zechstein 1)	630 – 700	3.000.000 (1. Sohle) 2.000.000 (2. Sohle)	0,45	4,8
23. Juni 1961	Merkers Werra-Revier	Thüringen (Zechstein 1)	710	200.000	2,20	3,7
04. April 1973	Aschersleben V Nordharz-Revier	Staßfurt (Zechstein 2)	400	325.000	0,75	4,6
02. Juli 1983	Bleicherode Südharz-Revier	Staßfurt (Zechstein 2)	600	120.000	0,07	3,3
23. Juni 1975	Unterbreizbach Werra-Revier	Hessen und Thüringen, sowie Begleitflöz (Zechstein 1)	800 – 900	3.350.000	0,70	5,2

Datum	Kalibergwerk Revier	Kalilager	Teufe [m]	Bruchfeldgröße [m²]	Spontanabsenkung [m]	Magnitude [M_L]
13. März 1989	Unterbreizbach Werra-Revier	Hessen und Thüringen, sowie Begleitflöz (Zechstein 1)	750 – 900	6.500.000	0,90	5,6
5. Januar 1995	Solikamsk Obere Kama (Russland)	Kalilager AB und W (Kungur)	350	360.000	4,50	4,8
11. September 1996	Teutschenthal Saale-Revier	Staßfurt (Zechstein 2)	620 – 770	2.500.000	0,50	4,9



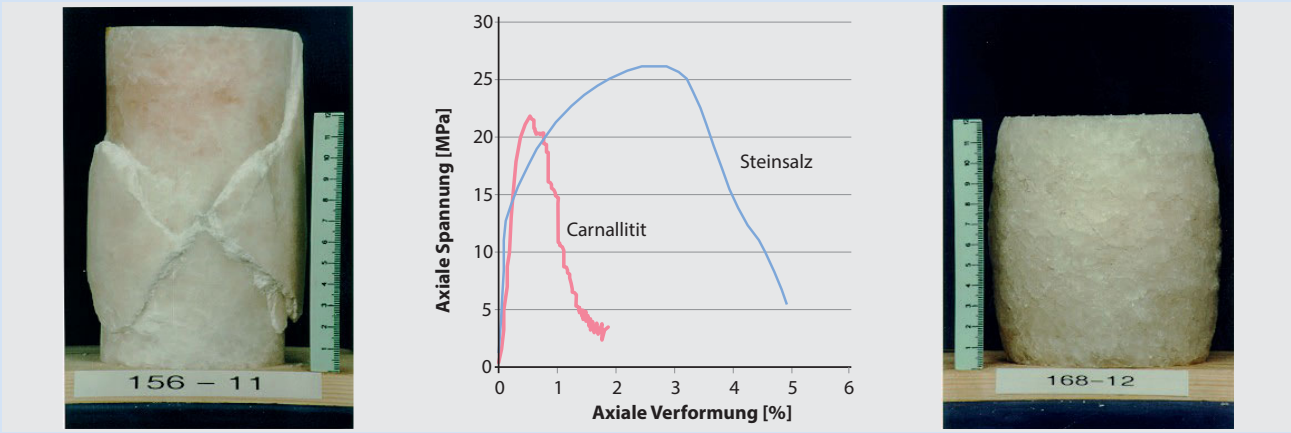
Streckenverbruch in der 7. nördlichen Abteilung des Kalibergwerkes Wintershall , Werra-Kalirevier, Deutschland, als Folge des Gebirgsschlages vom 22. Februar 1953: Die Strecke mit einer Höhe von 5 Meter ist durch Hereinbrechen von etwa 7 bis 8 Meter Steinsalz aus dem Hangenden verfüllt.

Fortschritte der Gebirgsmechanik erlauben heute eine sichere Dimensionierung im Carnallititbergbau

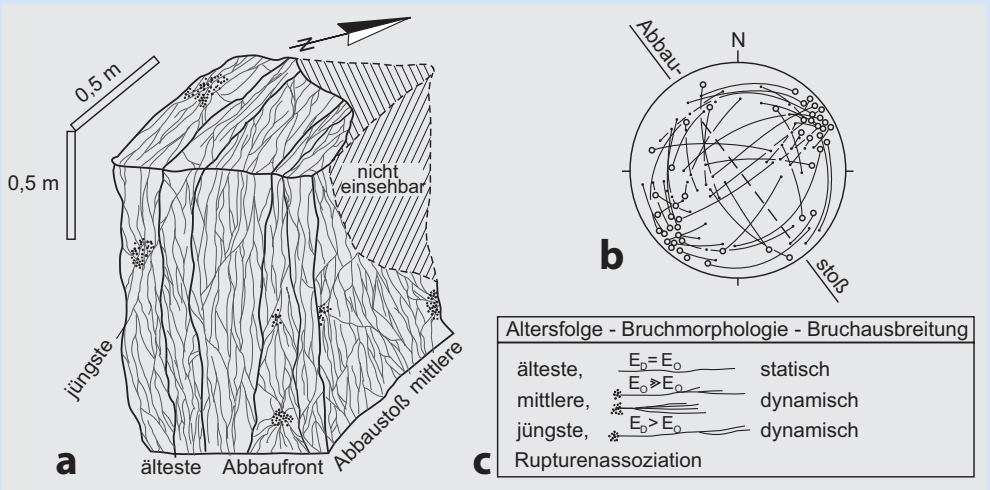
Im modernen Kalibergbau erfolgt die Dimensionierung der Tragfähigkeit von Carnallititpfeilern in geschichten Salzabfolgen unter Berücksichtigung dieses speziellen Sprödbruchverhaltens wie auch des Einflusses von Scherspannungen entlang der Materialgrenzen anhand numerischer Modelle (Minkley 1997, /660/; 2004a, /663/; ITASCA 2007, /443/; Minkley & Mühlbauer 2007, /666/; Alkan 2009, /19/; Minkley & Rauche 2013, /667/). Dabei kommt dem Prozess der Entfestigung der Pfeilerkonturen grundlegende Bedeutung zu. Ein anlaufender makroskopischer Bruchprozess entwickelt sich mit der Zeit und beginnt an der Kontur, weil sich in Abhängigkeit von der mit der Teufe anwachsenden Vertikalspannung entlang der Pfeilerkonturen quasi-einaxiale Spannungszustände herausbilden und hier die relativ niedrige Zugfestigkeit des Carnallitit zuerst überschritten wird. In Richtung Pfeilerkern folgt auf diese Konturzone eine durch Mikrorisswachstum geschädigte Gesteinsschicht. Diese Gefügeschädigung läuft abhängig von den Belastungsbedingungen entweder mehr oder weniger kontinuierlich ab oder kann in Zusammenhang mit dynamischen Anregungen auch spontan zum Konturbruch und zum Abstoßen ganzer Konturbereiche führen. Dieser Einfluss der Entfestigung konnte in früheren analytisch-mathematischen Dimensionierungsmethoden, zum Beispiel bei der Methode der Grenzgleichgewichte (Menzel 1970, /639/; 1975, /641/; Menzel & Schreiner 1977, /642/), nicht abgebildet werden, was zu einer systematischen Überschätzung der Tragfähigkeit von Carnallititpfeilern führte. Physikalisch setzt diese Methode voraus, dass zum Zeitpunkt der maximalen Pfeilerbelastung auch das gesamte Pfeilervolumen in der Lage ist, sich plastisch zu verformen. Diese Annahme ist für die Salzgesteine Steinsalz, Sylvinit und Hartsalz durchaus weitgehend erfüllt (Menzel 1972, /640/; Menzel et al. 1972, /644/; Georgi, Menzel & Schreiner 1975, /322/; Menzel & Schreiner 1977, /642/; Böhnel, Menzel & Schreiner 1981, /113/), trifft jedoch für den Carnallitit wegen seiner ausgeprägten Sprödigkeit nur sehr begrenzt zu, da es die oben erläuterten Entfestigungsprozesse verhindern, dass der gesamte Pfeilerquerschnitt ▶

Sprödbruch und Entfestigung im Carnallitit – Ursache großer Schadensereignisse

gleichzeitig einen plastischen Endzustand erreichen kann. Im Gegenteil hat ein gewisses Gesteinsvolumen entlang der Kontur eines kompakten Carnallititpfeilers bereits vor dem Erreichen der Plastifizierung des Pfeilerkerns durch Sprödbruch versagt und verhält sich fortan im Nachbruchbereich. In Carnallititabbauen, die nach der Methode der Grenzgleichgewichte dimensioniert worden sind, waren plötzliche Konturbrüche als Folge hoher Pfeilerbelastung und dynamischer Anregung, zum Beispieldurch das Sprengen, folglich häufig zu beobachten (Uhlenbecker 1980, /1037/; Minkley & Rose 1989, /668/).



Im Triaxialversuch ermitteltes Spannungs-Verformungsverhalten von Prüfkörpern aus Steinsalz (rechts) und aus Carnallitit (links): In diesem Triaxialtest versagt der vormals monolithische Carnallititprüfkörper bereits nach etwa 0,5 Prozent axialer Verformung durch Sprödruch und verformt sich dann im post-failure-Bereich durch Reibungsgleiten bis auf fast 2 Prozent Axialverformung weiter (Minkley & Rauche 2013, /667/).



Die fraktografische Analyse von Carnallititpfeilern, die beim Gebirgsschlag vom 02. Juli 1983 im Kaliberg-werk Bleicherode versagt haben, lässt unterschiedliche Bruchausbreitungsmodi für verschieden alte Rupturenassoziationen in Carnallititpfeilern erkennen (Rauche 1988, /793/; Rauche & Ullrich 1988, /810/; Ullrich, Rauche & Strausz 1988, /1038/). Die ältesten Rupturen, die offenbar der Konturentfestigung vor dem Gebirgsschlag zuzuordnen sind, tragen Anzeichen einer statischen Bruchfortpflanzung. Die jüngeren Bruchassoziationen dagegen, die offensichtlich für das Versagen der Pfeiler und die damit verbundene seismische Energiefreisetzung verantwortlich sind, zeigen mit ihrer Oberflächenmorphologie und der Flächenvervielfachung Charakteristika einer dynamischen Bruchausbreitung: a – Raumbild der Bruchensemble; gepunktete Bereiche zeigen einzelne Initialzonen der Bruchausbreitung; b –relative Altersverhältnisse von Trennbruchpaaren in der stereographischen Projektion, Kreis = ältere, Punkt = jüngere Fläche; dargestellt als stereografische Projektion der Flächenpole im Schmidt'schen Netz, untere Halbkugel; 50 Trennbruchpaare); c – Übersicht der Bruchmorphologie bildungszeitlich unterschiedlicher Rupturenassoziationen und ihrer daraus abgeleiteten Bruchausbreitungsmodi (E_D = Deformationsenergie, E_O = Oberflächenenergie)

Neben dem Gewinnungsbergbau lieferten in den vergangenen 3 Jahrzehnten auch F/E-Programme zur Langzeitsicherheit von Untertagedeponien für toxische und von Endlagern für radioaktive Abfälle im salinaren Wirtsgestein wesentliche neue Kenntnisse, insbesondere solche im Hinblick auf die Stilllegung von Kalisalzbergwerken und die Gewährleistung der öffentlichen Sicherheit in ihrem Umfeld während der Nachbetriebsphase (Hempel & Richter 1972, /385/; Djahanguiri, Gould & Mahtab 1983, /201/; Herbert, Sander & Panzer 1986, /387/; Herbert 1990, /386/; Schwandt et al. 1991, /911/; Herrmann & Röthemeyer 1998, /392/; Burrhee & Rauche 1999, /138/; Schwandt & Seifert 1999, /910/; Bauer, Ehgartner & Neal 2000, /77/; Rauche, Bodenstein & Rauche 2001, /812/; Rauche, Thoma & Hartmann 2001, /814/; Rauche 2002a, /796/; Bartl 2003c, /65/; Hoppert et al. 2003, /413/; Sitz & Rauche 2003, /945/; Bodenstein et al. 2005, /111/, Kamlot et al. 2006, /499/).

Im Zuge dieser im Telegrammstil skizzierten historischen Entwicklung hat sich das Methodeninventar zur Gewinnung fester Kalirohsalze aus dem geologischen Untergrund über annähernd 150 Jahre letztlich zu solchen fortschrittlichen Methoden und Verfahren weiterentwickelt, die den heutigen Stand der Technik definieren. Diese sollen in den folgenden Abschnitten näher beleuchtet werden.

5.1.1 Bergmännische Gewinnung von festen Kalirohsalzen

Von den weltweit insgesamt 69 Standorten, an denen im Jahr 2014 im planmäßigen industriellen Betrieb Rohstoffe für die Kalidüngemittelproduktion gewonnen wurden, nutzen 35 Standorte die Bergmännische Gewinnung von festen Kalirohsalzen unter Tage (▸Tabelle 9).

Tabelle 9 Standorte der Kalidüngemittelproduktion weltweit, an denen Bergmännische Gewinnung fester Kalirohsalze betrieben wird (▸Tabelle 1)

Produzent/Standort[5]	Rohsalz	Lagerung	Gewinnungsmethode
URALKALI			
Solikamsk 3	Sylvinit	flach	Schneidend
Berezniki 4	Sylvinit	flach	Schneidend
Solikamsk 2	Sylvinit	flach	Schneidend
Berezniki 2	Sylvinit	flach	Schneidend
Solikamsk 1	Sylvinit, Carnallitit	flach	Schneidend im Sylvinit, Bohren und Sprengen im Carnallitit
PCS			
Lanigan	Sylvinit	flach	Schneidend
Rocanville	Sylvinit	flach	Schneidend
Allan	Sylvinit	flach	Schneidend
Cory	Sylvinit	flach	Schneidend
New Brunswick[7, 104]	Sylvinit	steil	Schneidend

104 Für das neue Bergwerk Picadilly sind weitgehend identische Methoden und Verfahren vorgesehen, wie sie bislang in Penobsquis praktiziert wurden. Bei der zur Ableitung des Standes der Technik erforderlichen Beschreibung der dort praktizierten technischen Methoden, Verfahren und Anlagen wird daher maßgeblich auf das Bergwerk Penobsquis Bezug genommen.

Produzent/Standort[5]	Rohsalz	Lagerung	Gewinnungsmethode
MOSAIC			
Esterhazy K1	Sylvinit	flach	Schneidend
Esterhazy K2	Sylvinit	flach	Schneidend
Colonsay	Sylvinit	flach	Schneidend
Carlsbad	Sylvinit, Langbeinitit	flach	Schneidend
BELARUSKALI			
Soligorsk 4	Sylvinit	flach	Schneidend
Soligorsk 3	Sylvinit	flach	Schneidend
Soligorsk 2	Sylvinit	flach	Schneidend
Soligorsk 1	Sylvinit	flach	Schneidend
Soligorsk 5 (Krasnoslobodsky)	Sylvinit	flach	Schneidend
Soligorsk 6 (Berezowsky)	Sylvinit	flach	Schneidend
K+S			
Verbundwerk Werra, bestehend aus den Standorten:			
Wintershall	Hartsalz, Sylvinit, Carnallitit	flach	Bohren und Sprengen
Hattorf	Hartsalz, Sylvinit, Carnallitit	flach	Bohren und Sprengen
Unterbreizbach	Carnallitit, Hartsalz, Sylvinit	flach	Bohren und Sprengen
Zielitz	Sylvinit	flach	Bohren und Sprengen
Neuhof-Ellers	Hartsalz, Carnallitit	flach	Bohren und Sprengen
Sigmundshall	Sylvinit, Hartsalz	steil	Bohren und Sprengen
ICL IBERIA S & S			
Súria	Sylvinit	flach	Schneidend
Cabanasas	Sylvinit	flach	Schneidend
Villafruns	Sylvinit	flach	Schneidend
CPL			
Boulby	Sylvinit	flach	Schneidend

Produzent/Standort[5]	Rohsalz	Lagerung	Gewinnungsmethode
AGRIUM			
Vanscoy	Sylvinit	flach	Schneidend
INTREPID			
Carlsbad East	Sylvinit, Langbeinitit	flach	Schneidend
Carlsbad West	Sylvinit	flach	Schneidend
VALE			
Taquari Vassouras	Sylvinit	flach	Schneidend
UZKIMYOSANAT			
Dechkanabad	Sylvinit	flach	Schneidend

Für die Bergmännische Gewinnung von Kalirohsalzen unter Tage sind verschiedene Gewinnungsmethoden und Abbauverfahren entwickelt und langjährig erfolgreich eingesetzt worden (Pearson 1962, /739/; Gimm 1968, /331/; Jendersie 1969, /454/; Hebblewhite 1977, /379/; Heinz & von der Osten 1982, /381/; Kurtanjek 1983, /573/; Breniaux & Marx 1991, /126/; Fortney & Lewis 1991, /281/; Hustrulid & Bullock 2001, /427/; PCS 2012, /738/). Alle diese Verfahren erfuhren stets eine Adaption auf die am konkreten Standort von der Natur vorgegebenen lagerstätten- und/oder hydrogeologischen Verhältnisse und die davon diktierten spezifischen geomechanischen und anderen bergbausicherheitlichen Anforderungen (Spackeler 1957, /966/; Dreyer 1963, /209/; Gimm 1968, /331/; Jendersie 1969, /454/; Baar 1977, /53/; Duchrow & Schilder 1985, /213/; Duchrow 1990, /212/; Spachtholz 2011, /963/). Eine Diskussion der betriebsorganisatorischen Abläufe, der zum Einsatz kommenden maschinentechnischen Ausrüstungen und anderer technischer Details soll hier nur soweit erfolgen, wie dies mit Blick auf die Ableitung eines Standes der Technik bei der Kalidüngemittelproduktion, besonders bezüglich der hier zur Rede stehenden Schwerpunkte der Reduzierung von Gewinnungs- und Aufbereitungsrückständen sowie der Pfade für deren Entsorgung sinnvoll und notwendig ist.

Es liegt auf der Hand, dass – weit stärker als bei den Methoden, Verfahren und Anlagen zur Aufbereitung der Kalirohstoffe – die bergmännischen Gewinnungsmethoden unmittelbar durch die an nahezu jedem Standort der Kalidüngemittelproduktion andersartigen geologischen Rahmenbedingungen gesteuert werden. Die Anwendbarkeit der Methoden, Verfahren und Anlagen in verschiedenen Lagerstätten hängt daher viel weniger vom allgemeinen technischen Entwicklungsstand, als vielmehr von diesen durch die Natur vorgegebenen Randbedingungen ab. Diese Tatsache muss selbstverständlich bei der Ableitung eines Standes der Technik Würdigung erfahren. Solche Randbedingungen, die den Einsatz anderenorts erfolgreich angewendeter Methoden und Verfahren an einem konkreten Standort nicht erlauben, wurden in dem sie verursachenden geowissenschaftlichen Kontext bereits in den Abschnitten 4.1 und 4.2 behandelt und werden in den hier folgenden Abschnitten im Hinblick auf die betriebsorganisatorischen und technischen Aspekte diskutiert.

Um die heute an den verschiedenen Standorten erfolgreich praktizierten Gewinnungsmethoden und Abbauverfahren im Kontext dieser standortspezifischen Randbedingungen und damit auch hinsichtlich der bei ihrer Anwendung zu gewährleistenden Bergbau- und öffentlichen Sicherheit zu verstehen, ist es zweckmäßig, ihre geschichtliche Entwicklung – zumindest in den 3 wesentlichen Kalibergbauregionen der Welt, in Saskatchewan in Kanada, an der Oberen Kama in Russland und im Werra-Kalirevier in Deutschland – wenigstens kurz synoptisch abzuhandeln, bevor in den Abschnitten 5.1.1.1 die Gewinnungsmethoden und 5.1.1.2 die Abbauverfahren und die dabei erforderlichen maschinentechnischen Ausrüstungen beschrieben werden. Die Beschränkung auf diese heute wesentlichen Kalibergbaureviere scheint der hier zur Rede stehenden Aufgabe angemessen zu sein. Nichtsdestotrotz sei darauf verwiesen, dass besonders im Mutterland der Kaliindustrie, in Deutschland, bereits über ein halbes Jahrhundert lang Gewinnungsmethoden und Abbauverfahren versuchsweise entwickelt, im praktischen Betrieb eingeführt und erprobt und dann auch stetig optimiert worden sind, bevor in Nordamerika und der früheren Sowjetunion eine Adaption

dieser Methoden und Verfahren auf die dort herrschenden Lagerstättenbedingungen stattgefunden hat. Diese Erfahrungen aus dem ersten Drittel der Kaliindustriegeschichte und die in der Folgezeit bei der Adaption auf die lagerstätten- und hydrogeogeologischen sowie die davon bestimmten bergbausicherheitlichen und auch bergtechnischen Randbedingungen erkannten Probleme sind freilich ebenso in den heute bestehenden Stand der Technik eingeflossen. Besonders letztere dürfen auch heute bei den Debatten um eine Übertragung anderenorts erfolgreich praktizierter Methoden und Verfahren nicht ohne gebührende Berücksichtigung bleiben. Obgleich heute in der Minderzahl, muss auch auf die frühere Bedeutung der Gewinnung von Kalirohsalzen in der Steilen Lagerung verwiesen werden. Was diesen Erfahrungsschatz angeht, gründet er sich maßgeblich auf die vielfältig optimierten Abbauverfahren in den Kalirevieren im nördlichen Harzvorland und im Raum Hannover bis hin zur Unteren Aller. In diesem Kontext, hier aber für die Flache Lagerung zutreffend, müsste auch der Strebbruchbau der elsässischen Kalibergwerke besondere Erwähnung finden. Dennoch sollen sich die folgenden Abschnitte auf die Entwicklung der Abbauverfahren in Saskatchewan und an der Oberen Kama sowie im Werra-Revier beschränken, da heute die mengenmäßig größten Anteile der mit Bergmännischen Methoden gewonnenen festen Rohsalze dem dort praktiziertem Methodeninventar entstammen:

Im kanadischen Kalibergbau in Saskatchewan werden seit den 1960er Jahren Kalisalze mittels Schneidender Gewinnung entweder im *Esterhazy Member* oder im *Patience Lake Member* der *Prairie-Evaporite-Folge* in Teufen zwischen 800 und 1.100 Meter abgebaut, wobei grundsätzlich nur sylvinitisches Rohsalz mit sehr geringen Anteilen von Carnallitit gewonnen wird (Fuzesy 1982, /304/). Die anfangs ungenügenden geomechanischen Kenntnisse einerseits, aber die Kenntnis der leidvollen Geschichte des frühen Kalibergbaus in Deutschland andererseits, führten zu sehr vorsichtiger Abbaudimensionierung, so dass Abbauverluste von bis zu 74 Prozent in Kauf genommen wurden. Umfangreiche F/E-Arbeiten brachten bis in die 1980er Jahre zwar einen erheblichen theoretischen Kenntniszuwachs, führten aber nicht zu gravierenden Verminderungen der Abbauverluste (King & Acar 1969, /520/; Jones & Prugger 1982, /461/; Mraz & Jones 1986, /689/). Dabei wurden bei der Dimensionierung von Abbaukammern und Pfeilern 2 unterschiedliche Wege, einmal in der Region Esterhazy im Süden Saskatchewans und einmal in der nördlicheren Region Saskatoon begangen. In den Kalibergwerken in der Region Esterhazy wurden und werden parallele Langkammern als

- *Single-Room* zwischen dauerstandsicheren Pfeilern

oder

- *Two-Room-* bis *Five-Room-Grouping* mit nachgiebigen Zwischenpfeilern, begrenzt durch dauerstandsichere Barrierepfeiler (*yield mining*[105])

aufgefahren.

Die Abbauverluste im Panel[106] beim Abbau mit dauerstandsicheren Pfeilern wurden seit der Dimensionierung in den 1970er Jahren quasi unverändert mit 58 Prozent beibehalten (IMC 1977, /434/; Zahary & Hedley 1981, /1150/; Jeremic 1994, /455/). Bei diesem Abbau werden beispielsweise im Kalibergwerk Rocanville von PCS etwa 20 Meter breite Kammern zwischen etwa 27 Meter breiten Pfeilern aufgefahren. Aus der Erfordernis von breiten Barrierepfeilern um Infrastrukturstrecken sowie für die Abgrenzung zwischen den Panels resultiert ein entsprechend höherer Gesamtabbauverlust von knapp 70 Prozent. Beim sogenannten *yield mining* wurden durch planmäßige F/E-Arbeiten dagegen große Erfolge erzielt: eine Reduzierung der Abbauverluste von 70 Prozent im Panel in den 1960er Jahren auf etwa 45 Prozent seit Ende der 1970er Jahre (Molavi 1987, /677/; Gendzwill & Unrau 1996, /321/). Weitere Abbauversuche in den 1980er Jahren mit einer Reduzierung der Abbauverluste im Panel auf 35 Prozent fanden aufgrund der auftretenden Standsicherheitsprobleme keinen Eingang in den planmäßigen Gewinnungsbergbau.

In den Kalibergwerken der Region Saskatoon wurden und werden Kammern mit nachgiebigen Pfeilern aufgefahren, wobei das Panel im Chevron-Muster, also fischgrätenartig, angelegt wird. Für die Anlage von Infrastrukturstrecken wird das sogenannte *stress relief mining*[107] angewendet (Serata 1969, /918/; Serata & Schulz 1972, /921/; Molavi 1987, /677/; Jeremic 1994, /455/). Die Abbauverluste im Panel wurden für diese Art der Kammerauffahrung fortlaufend optimiert und liegen für das Beispiel des Kalibergwerkes Cory von PCS bei 37 Prozent mit etwa 14 Meter breiten Kammern und etwa 8 Meter breiten nachgiebigen Pfeilern. Eine solche Dimensionierung erfordert allerdings entsprechend breite Barrierepfeiler von 110 Meter zwischen den 140 Meter breiten Panels, woraus wiederum ein

105 *Yield mining* bezeichnet ein Abbauverfahren mit nicht dauerstandsicher dimensionierten Zwischenpfeilern in Kammergruppen innerhalb eines Panels mit dem Ziel der Verringerung der Abbauverluste im Panel. Die Auflast des Deckgebirges wird von dauerstandsicher dimensionierten Barrierepfeilern zwischen den Kammergruppen bzw. am Rand des Panels aufgenommen.

106 Unter Panel wird eine räumlich abgegrenzte Gewinnungseinheit im Bergwerk, oftmals im Sinne einer von Infrastrukturstrecken umfahrenen Abbauflächen verstanden, in der die Rohstoffgewinnung durch das Auffahren einer Vielzahl von Abbaukammern erfolgt.

107 Verfahren zur Auffahrung von dauerstandsicheren Infrastrukturstrecken unter gebirgsmechanisch anspruchsvollen Bedingungen. Dabei werden vor Auffahrung der Infrastrukturstrecke zu beiden Seiten vorab Begleitstrecken aufgefahren. Zwischen den Strecken bleiben nachgiebige Pfeiler stehen, so dass die Auflast des Deckgebirges nur auf die Begleitstrecken und -pfeiler übertragen wird.

entsprechend höherer Gesamtabbauverlust von etwa 65 Prozent resultiert.

Im russischen Kalibergbau an der Oberen Kama werden seit den 1940er Jahren sylvinitische Rohsalze in den Flözen Krasnyj II (Rot II) und AB sowie carnallitische Rohsalze im Flöz W gewonnen. In diesen Kalibergwerken wurde und wird im Langkammerbau gearbeitet, wobei früher grundsätzlich das Bohren und Sprengen als Gewinnungsmethode zum Einsatz kam. In den 1960er Jahren wurde dann in den sylvinitischen Flözen zur Schneidenden Gewinnung im Vollschnitt übergegangen. Dabei werden im Ein- und im Mehrflözabbau Langkammern mit 200 bis 300 Meter Länge und 5 bis 10 Meter Breite zwischen dauerstandsicheren Pfeilern aufgefahren. In den Vorschriften aus dem Jahr 1960 waren die Dimensionierungsregeln entsprechend des damaligen Kenntnisstandes noch empirisch nach Erfahrungen aus anderen Bergbauzweigen hergeleitet (VNIIG 1960, /1070/) und – wie sich später herausstellte – wenig zutreffend. Die in späteren Vorschriften verbindlich geregelte Abbaudimensionierung zielte dann explizit auf die Wahrung der Integrität der Hangendschutzschicht (VNIIG 1972, /1071/; VNIIG, MINISTRY OF MINERAL FERTILIZER PRODUCTION & SOJUSKALI 1984, /1076/). Besonders mit den Vorschriften aus dem Jahr 1990 wurden Erfahrungen aus dem Ersaufen des Kalibergwerkes Berezniki 3, speziell zur Bemessung der Hangendschutzschicht, berücksichtigt (VNIIG & AGROCHIM 1990, /1072/). Weitere Revisionen der Vorschriften aus den Jahren 1994, 2004 und 2008 reflektieren jeweils den aktuellen Kenntnisstand zum geologischen Aufbau der Lagerstätte und der Hangendschutzschichten (VNIIG et al. 1994, /1073/; VNIIG et al. 2004, /1074/; MINING INSTITUTE et al. 2008, /658/).

Die Gesamtabbauverluste in den Kalibergwerken an der Oberen Kama lagen seit den 1940er bis in die 1980er Jahre nahezu konstant zwischen 45 und 55 Prozent. Mit den Erkenntnissen aus dem Ersaufen des Kalibergwerkes Berezniki 3 im Jahre 1986 wurde die Dimensionierung jedoch derart angepasst, dass seitdem die Gesamtabbauverluste bei 55 bis 65 Prozent liegen (ERCOSPLAN 2007i, /250/; 2007j, /251/).

Im deutschen Kalibergbau im Werra-Kalirevier wird seit über 100 Jahren versatzloser Kammerbau mit dauerstandfesten Pfeilern betrieben. Die Gewinnung der Kalisalze erfolgt in Bohr- und Sprengarbeit und bis gegen Ende der 1960er Jahre ausschließlich im Langkammerbau. Mit der Einführung der gleislosen Förderung Mitte bis Ende der 1960er Jahre kam der Kurzpfeilerörterbau mit vorwiegend quadratischen Pfeilern zum Einsatz. Ausgelöst durch den Gebirgsschlag im Bergwerk Heringen 1953 wurde in den hessischen Kalibergwerken des Werra-Kalireviers versucht, der Gefahr plötzlicher Feldeszusammenbrüche durch Reduzierung der Abbauhöhen sowie durch Belassen breiter, gedrungener Pfeiler zu begegnen (Uhlenbecker 1978, /1036/). Zwangsläufig waren damit zwar hohe Flächenabbauverluste verbunden, aber eine dauerhafte Standsicherheit der Kammerpfeilersysteme gewährleistet. Für die Dimensionierung der Kammerpfeilersysteme wurden in der Folgezeit physikalisch begründete Rechenmodelle angewendet. In den thüringischen Kalibergwerken wurde in der Folgezeit nach der Methode der Grenzgleichgewichte[108] mit verschiedenen Sicherheitskoeffizienten dimensioniert (Menzel 1970, /639/), in den hessischen Kalibergwerken hingegen weitgehend nach der Methode dauerhaft standfester Pfeiler abgebaut.

In den thüringischen Kalibergwerken folgte man zunehmend dem wirtschaftlichen Drang zur Reduzierung der Abbauverluste: Die als Pfeiler verbleibenden Tragelemente wurden in einer Sekundärphase durch das sogenannte Pfeilersplitting, vorwiegend im Hartsalz beziehungsweise im Sylvinit, teilweise bis auf 5 Meter reduziert. Ab der ersten Hälfte der 1970er Jahre wurde eine Sekundärabbauphase in der Regel durch Strossen beziehungsweise Firstedrücken eingeführt, die der Ausschöpfung verbliebener Standsicherheitsreserven gewidmet war (Sievers 1972, /932/). Auch die Dimensionierung dieser Abbausysteme folgte dem Prinzip nach der zutreffenden Methode der Grenzgleichgewichte, hier – wie auch in anderen Bereichen der thüringischen Bergwerke Merkers, Unterbreizbach und Springen – jedoch unter Ansatz reduzierter Sicherheitskoeffizienten[109]. In der Folge war die Standsicherheit der nach dieser Dimensionierung aufgefahrenen Abbaufelder nicht dauerhaft gewährleistet. Nach dem Gebirgsschlag 1989 im Bergwerk Merkers wurde wieder zum Einphasenabbau zurückgekehrt und somit zugunsten der Sicherheit auf die Reduzierung der Pfeilerbreiten durch partiellen Pfeilerrückbau beziehungsweise auf das Strossen oder Firstedrücken während einer sekundären Abbauphase verzichtet. Die Bemessung der Salzfesten erfolgt seit dieser Zeit auch hier nach dem bewährten Dimensionierungsverfahren dauerstandfester Tragelemente (Uhlenbecker 1978, /1036/).

108 Die Dimensionierung nach der Methode der Grenzgleichgewichte führt nicht a priori zur Unterdimensionierung der Tragelemente, da in der ursprünglichen Anwendungsempfehlung Sicherheitskoeffizienten von 3,5 vorgesehen waren.

109 Zur Verminderung der Abbauverluste kam eine Dimensionierung der Tragelemente nach der Methode der Grenzgleichgewichte mit reduzierten Sicherheitskoeffizienten zwischen 3,5 und 2,5 zur Anwendung.

Die historische Herausbildung der heute praktizierten Gewinnungsmethoden und Abbauverfahren – einschließlich der darin eingeschlossenen Irrwege –, wie vorab exemplarisch für die 3 bedeutendsten Kalibergbauregionen erläutert wurde, zeigt einmal mehr, wie der allgemeine technische Fortschritt auf die konkreten Standortverhältnisse angepasst werden musste, um letztlich eine angesichts der bestehenden individuellen lagerstätten- und hydrogeologischen sowie geomechanischen und/oder anderen bergbausicherheitlichen Einflussfaktoren taugliche Verfahrensweise zu etablieren. Die Auswirkungen dieser verschiedenartigen Randbedingungen auf die Effizienz und die Nachhaltigkeit einer spezifischen Gewinnungsmethode oder eines Abbauverfahrens zeigen sich in der Gegenüberstellung der von Teufe und Mächtigkeit aber auch – wie oben gezeigt werden konnte – von anderen geomechanischen, montanhydrogeologischen sowie weiteren bergbausicherheitlichen Faktoren bestimmten Abbauverluste, die in Tabelle 10 für die 3 ausführlich besprochenen Reviere dargestellt sind.

Ausgehend von diesem historischen Abriss werden im Folgenden die heute praktizierten technischen Methoden, Verfahren und Anlagen bei der Bergmännischen Gewinnung fester Kalirohsalze beschrieben, wobei auch noch einmal auf die dabei heute typischen Abbauverluste eingegangen werden soll.

Die Wetter- und Fördertechnik, die elektrotechnischen Anlagen und die vielfältigen Methoden, Verfahren und Anlagen zur automatisierten Prozessmess- und -steuertechnik weisen im Kalibergbau ebenfalls gewisse Spezifika auf, sind jedoch in groben Zügen mit den heute in anderen Bergbauzweigen erreichten Entwicklungsständen vergleichbar.

Für die hier zur Rede stehende Ableitung des heutigen Standes der Technik bei der Gewinnung von festen Kalirohsalzen mit Hilfe bergmännischer Verfahren aus dem geologischen Untergrund werden diese Aspekte im Folgenden daher nicht eingehender diskutiert. Allein die in allen heute in Produktion stehenden Kalibergwerken online, also in Echtzeit, betriebene Überwachung der Wertstoffgehalte bildet hierbei eine Ausnahme und wird hinsichtlich ihrer heute existierenden Grenzen und Möglichkeiten zur K_2O-Kontrolle und -steuerung der Teil- und Gesamtförderströme bei den Gewinnungsmethoden noch einmal näher betont (Adams 1969, /13/; Mackintosh 1977, /612/; Weps 1981, /1111/; Kokorsch & Psotta 1984, /545/; KK 1989, /530/). Neben der Wertstoffkontrolle der verschiedenen Teilförderströme ist für die effektive Versorgung der Aufbereitungsanlage mit einer vergleichmäßigten Rohsalzzufuhr auch die Zwischenspeicherung in Teilfeldern und eine zentrale Speicherung im Umfeld des Förderschachtes notwendig, wozu entsprechende Rohsalzbunker aufgefahren werden (Jacob 1997, /447/).

Wegen der damit auch vorausgegangenen großen Anstrengungen in der Entwicklungsarbeit sollen daneben auch die erheblichen Fortschritte durch Einführung ferngesteuerter Fördermittel (Sönksen 1990, /958/; Fortney & Lewis 1991, /281/; Jacob & Triebel 2002, /448/; Ganzer 2005, /307/; K+S 2012b, /478/; Jeschke & Sönksen 2014, /456/), in der Sprengtechnik (Ganzer 2001, /305/; Langefeld 2005, /584/; Zapp, Wittenberg & Wüllenweber 2005, /1153/), bei der Bewetterung (Michl & Spachtholz 2005, /651/) und nicht zuletzt bei der Nachwuchsausbildung im Simulationsbetrieb (Ganzer 2002, /306/; Thiele 2014, /1005/) nicht unerwähnt bleiben.

Tabelle 10 Gegenüberstellung der Abbauverluste im Panel/in der Abteilung sowie Gesamtabbauverluste in den Kalibergwerken der Kalireviere Saskatchewan, Kanada; Obere Kama, Russland und Werra, Deutschland

Kalirevier	Rohsalz	Teufe [m]	Mächtigkeit Kalilager [m]	Abbauverluste	
				Panel/Abteilung [%]	Kalibergwerk gesamt [%]
Saskatchewan	Sylvinit	960 – 1.080	2,4 – 3,3	45 – 58	67 – 74
Obere Kama	Sylvinit	250 – 400	4,8 – 5,0	41 – 51	55 – 65
Werra	Sylvinit/Carnallitit	300 – 1.200	5,0	31 – 57	43 – 69

5.1.1.1 Gewinnungsmethoden

Bezüglich der Methode des bergmännischen Herauslösens von Kalirohsalzen aus dem Gesteinsverband unterscheidet man das Bohren und Sprengen von der Schneidenden Gewinnung. Die ältere klassische Methode der bohr- und sprengtechnischen Gewinnung stellt ein diskontinuierliches Verfahren dar, während die Schneidende Gewinnung mit den Voll- (VSM) oder Teilschnittmaschinen (TSM), den sogenannten *continuous miners*[110], tatsächlich auch ein kontinuierliches Herauslösen des Lagerstätteninhaltes leisten kann. Bezogen auf den Anteil an der weltweiten Kalirohsalzgewinnung dominiert bereits seit den 1960er Jahren die Schneidende Gewinnung über die des Bohrens und Sprengens und macht heute mehr als 80 Prozent aus (▸Tabelle 11).

Diese Methoden des Herauslösens finden für beide strukturellen Grundtypen der Kalilagerstätten Anwendung, werden also sowohl in der Flachen wie auch in der Steilen Lagerung genutzt. Allerdings nimmt die vielfach von der tektonischen Struktur der Lagerstätte bestimmte Absetzigkeit, also die räumliche Diskontinuität, großen Einfluss auf die Effektivität der Schneidenden Gewinnung und entscheidet letztlich über die Anwendbarkeit dieser Methode.

Sowohl bei der Schneidenden Gewinnung (Bohnenberger 2001, /114/; 2007, /115/; Fortney 2001, /280/; Roberts 2001, /843/; Drüppel 2010, /210/) als auch bei der Methode des Bohrens und Sprengens (Kogelmann 1973, /542/; Sönksen 1990, /958/; Kokorsch 1991, /543/; 1993, /544/; Wolperding 1993, /1128/; Grimmig 1996, /350/; Helms, Heidecke & Nauke 1996, /383/; Ganzer 2002, /306/; Jacob & Triebel 2002, /448/; Hunstock 2004, /424/; Weigert 2007, /1105/) sind in den vergangenen 2 Jahrzehnten viele Arbeitsabläufe automatisiert worden, was zu einem höheren Maß an Arbeitssicherheit und zur Leistungssteigerung geführt hat.

Besteht bei den Gewinnungs- und Vortriebsarbeiten die Gefahr der spontanen Freisetzung explosiver Gase und/oder Gas-Salzgemischen, wie dies zum Beispiel im Werra-Kalirevier der Fall ist, kann die Schneidende Gewinnung nur begrenzt beziehungsweise unter sehr spezifischen Sicherheitsvorkehrungen zum Einsatz kommen (Dietterle, Fliege & Marggraf 1988, /199/; Duchrow 1990, /212/). Daher ist die Anwendung der Bohr- und Sprengtechnik hier der Schneidenden Gewinnung vorzuziehen. Da die zu besorgende Gasfreisetzung maßgeblich mit dem Vorgang des Herauslösens der Kalirohsalze aus dem Gesteinsverband, also der Sprengung selbst, vonstatten geht, ist es hier einfacher möglich, die Arbeitssicherheit durch ein zentrales Sprengen zum Schichtende mit zurückgezogener Belegschaft herzustellen. Nichtsdestotrotz ist aber auch beim Bohren der Großbohr- oder auch der Sprenglöcher bereits der potentiellen Gefährdung durch mögliche Gasfreisetzung Sorge zu tragen. Ähnliche Einschränkungen für die Schneidende Gewinnung kann es theoretisch auch bei besonderen gebirgsmechanischen Verhältnissen geben, die den Schneidvorgang selbst beeinflussen oder aber die Stabilität der geschnittenen Firste nicht dauerhaft gewährleisten (Thuro & Pillinger 1998, /1008/).

Auch bei größeren Mächtigkeitsschwankungen und wechselhaften Einfallensverhältnissen in einer Lagerstätte, wie es für die deutschen Kalilagerstätten der Fall ist, wird zweckmäßigerweise ebenfalls die flexiblere Methode der Bohr- und Sprengtechnik bevorzugt. So hat sich in den Kalibergwerken von K+S in der Flachen Lagerung für die Gewinnung nahezu ausschließlich das Bohren und Sprengen, überwiegend im Kammerpfeilerbau mit quadratischen Pfeilern, etabliert. Für spezielle Lagerstättenbedingungen wurden auch spezifische Abbauverfahren entwickelt, wie der Kuppenabbau und der Kuppenstrossbau im Kalibergwerk Unterbreizbach des Verbundwerkes Werra.

In der Flachen Lagerung kommt bei Gasfreiheit beziehungsweise dann, wenn ein spontanes Austreten explosiver Gasgemische auszuschließen ist, die Schneidende Gewinnung im Kammerpfeilerbau mit langen Pfeilern zur Anwendung und ermöglicht dann auch sehr hohe Gewinnungsleistungen.

Im Folgenden sollen beide Methoden der Herauslösung der Kalirohsalze aus dem ursprünglichen Gesteinsverband näher erläutert und hinsichtlich der erforderlichen Arbeitsschritte und maschinentechnischen Ausrüstungen beschrieben werden.

Tabelle 11 Prozentuale Anteile von Schneidender Gewinnung und Bohren und Sprengen an der Gesamtmenge des bergmännisch gewonnenen Kalirohsalzes im Jahr 2013

Gewinnungsmethode	Prozentualer Anteil [%]
Schneidende Gewinnung	84
Bohren und Sprengen	16

110 Unter dem angelsächsischen Begriff *continuous miner* werden elektrisch betriebene, auf Selbstfahrwerken installierte Gewinnungsmaschinen verstanden, die sich – Bohrwerkzeugen gleich – schneidend oder schrämend kontinuierlich durch das Gebirge bewegen. Sie können dabei einen vollen Querschnitt des aufzufahrenden Grubenbaues in Einem (Vollschnittmaschinen mit einem Gewicht bis 240 t) oder aber abschnittsweise in Sektionen (Teilschnittmaschinen mit einem Gewicht bis 130 t) herstellen.

a Schneidende Gewinnung

Die Abfolge der Arbeitsschritte und der Rohsalztransport bei der Schneidenden Gewinnung sind schematisch in Abbildung 21 dargestellt. Bei der Schneidenden Gewinnung kommen einmal Teilschnittmaschinen (TSM) zum Einsatz, die mit beweglichen Schneidwerkzeugen in einer Dimension deutlich geringer als der Querschnitt der Grubenbaue die Abbaufront durch zyklische Bewegung schrämend vorantreiben. Weit höhere Gewinnungsleistungen sind jedoch mit den Vollschnittmaschinen (VSM) zu erzielen, deren Schneidwerkzeug etwa der Dimension eines primären Streckenquerschnittes entspricht, wenngleich für die Auffahrung der gesamten Streckenbreite oder -höhe auch mehrere Schnitte erforderlich sein können. Insbesondere die VSM haben jedoch den entscheidenden Nachteil einer relativ geringen Flexibilität gegenüber wechselnden Lagermächtigkeiten und/oder Einfallensverhältnissen, so dass ihr Einsatz in der industriellen Praxis nur in sehr homogenen Lagerstätten effektiv ist. Beispiele dafür sind die flach lagernden Lagerstätten in Saskatchewan, Kanada (McWhorter 1962, /629/; Hebblewhite 1977, /379/; Miller 1980, /655/; 1983, /656/; Jones & Prugger 1982, /461/; Fortney & Lewis 1991, /281/; Strathdee 1994, /987/; Labbe & Kelly 2009, /579/), in der Region Carlsbad, New Mexico, USA (Herne & McGuire 2001, /389/; Livingstone et al. 2001, /600/) und an der Oberen Kama, Russland, (Chelpanova 2004, /151/). In Saskatchewan, Kanada, werden mit Vollschnittmaschinen der Serie *Sandvik MF 120* (▸Abbildung 22) durchschnittliche Gewinnungsleistungen bis zu 700 Tonnen pro Stunde, an der Oberen Kama, Russland, mit den Maschinen des Typs *Ural 20R* (▸Abbildung 23a) etwa 150 Tonnen pro Stunde erreicht. Das geschnittene Rohsalz wird direkt von der Maschine entweder über flexible Bänder (Nordamerika) oder auch mit Hilfe von Bunkerpendelwagen (Russland) zu den Hauptförderbändern transportiert (▸Abbildung 30 und Abbildung 31).

Bei der kontinuierlichen Methode der Schneidenden Gewinnung ist eine Überwachung der Wertstoffinhalte durch radiometrische Verfahren bereits an der VSM oder TSM möglich, so dass die von den Maschinen gelieferten Haufwerksströme unmittelbar hinter der Abbaufront, über die Zwischen- und die Hauptförderung bis hin zum Schachtbunker zur Steuerung eines optimalen Gesamtförderstromes verschnitten werden können.

Eine besondere Form der Schneidenden Gewinnung ist die im Strebbau[111] praktizierte Methode der schrämenden Gewinnung, die früher im Elsässischen Kalibergbau (Greif & Streckdenfinger 1983, /349/; Breniaux & Marx 1991, /126/; MDPA 2004b, /632/; 2004d, /634/) für den Abbau von Kalisalzen weiterentwickelt wurde und heute – in einem wiederum auf die dort herrschenden lagerstätten- und hydrogeologischen Randbedingungen (▸Abschnitte 4.1 und 4.2) adaptierten Strebbauverfahren – sehr erfolgreich in Belarus angewendet wird (Peshchenko & Mychko 2008, /749/) (▸Abbildung 24).

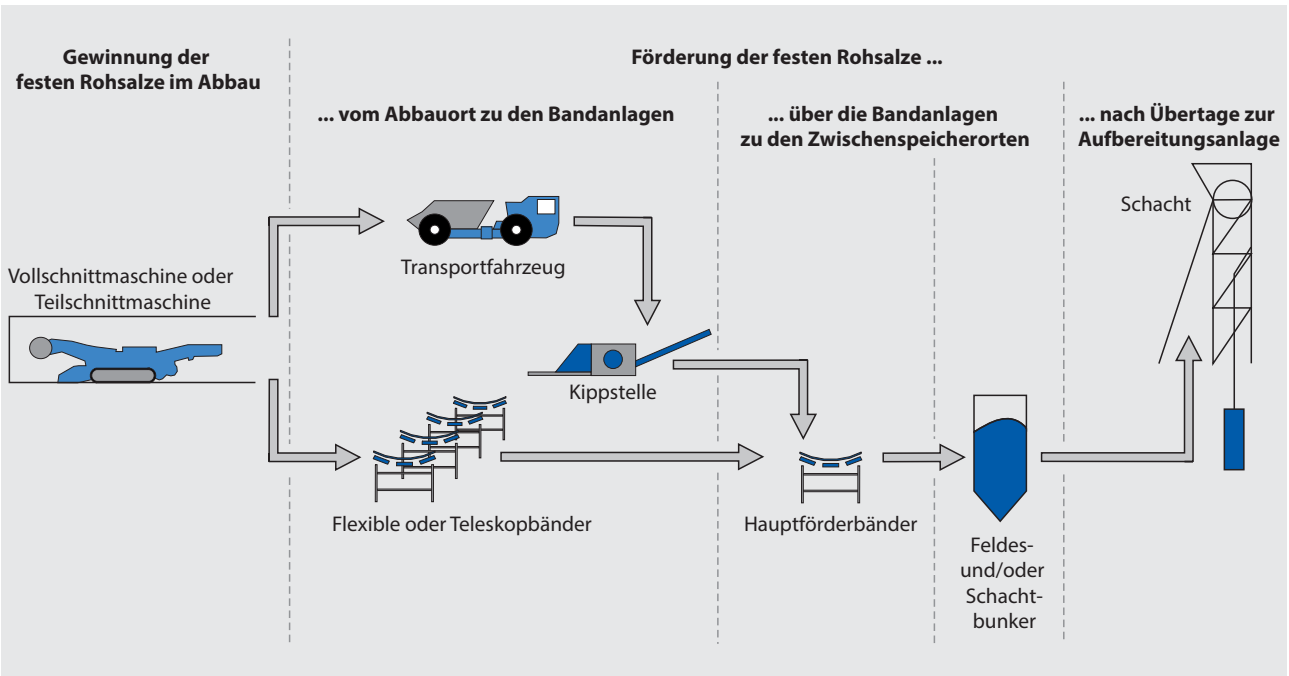


Abbildung 21 Rohsalztransport bei der Schneidenden Gewinnung von der Abbaufront über die Zwischen- und Hauptförderung bis zur Schachtförderung nach über Tage und die dabei eingesetzte Maschinentechnik

111 Der Strebbau als Abbauverfahren wird im Kalibergbau ohne Versatz des Abbauhohlraumes, d. h. als Strebbruchbau betrieben und im Folgenden auch als Strebbruchbau bezeichnet.

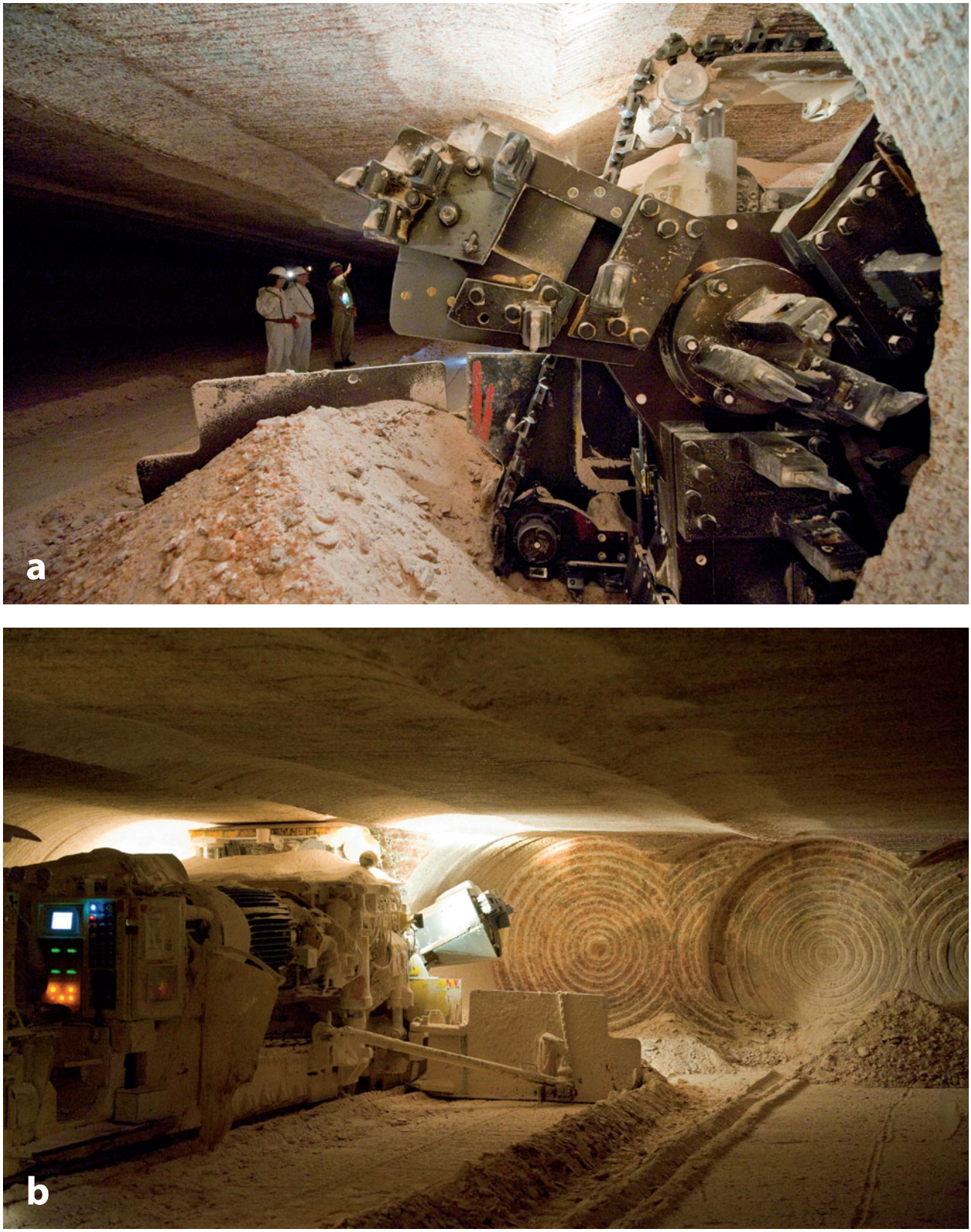


Abbildung 22 Bergbaumaschinen zur Schneidenden Gewinnung im Kalibergwerk Esterhazy K1 von MOSAIC, Saskatchewan, Kanada: a – Einsatz einer Vollschnittmaschine mit 2 Rotoren der Serie *Sandvik MF 120* im Kalilager Esterhazy; b – Seitenansicht und Schnittbild einer Vollschnittmaschine dieses Typs im Kalilager Esterhazy [Fotos mit freundlicher Genehmigung von Martin Mraz, Prag, Tschechische Republik]

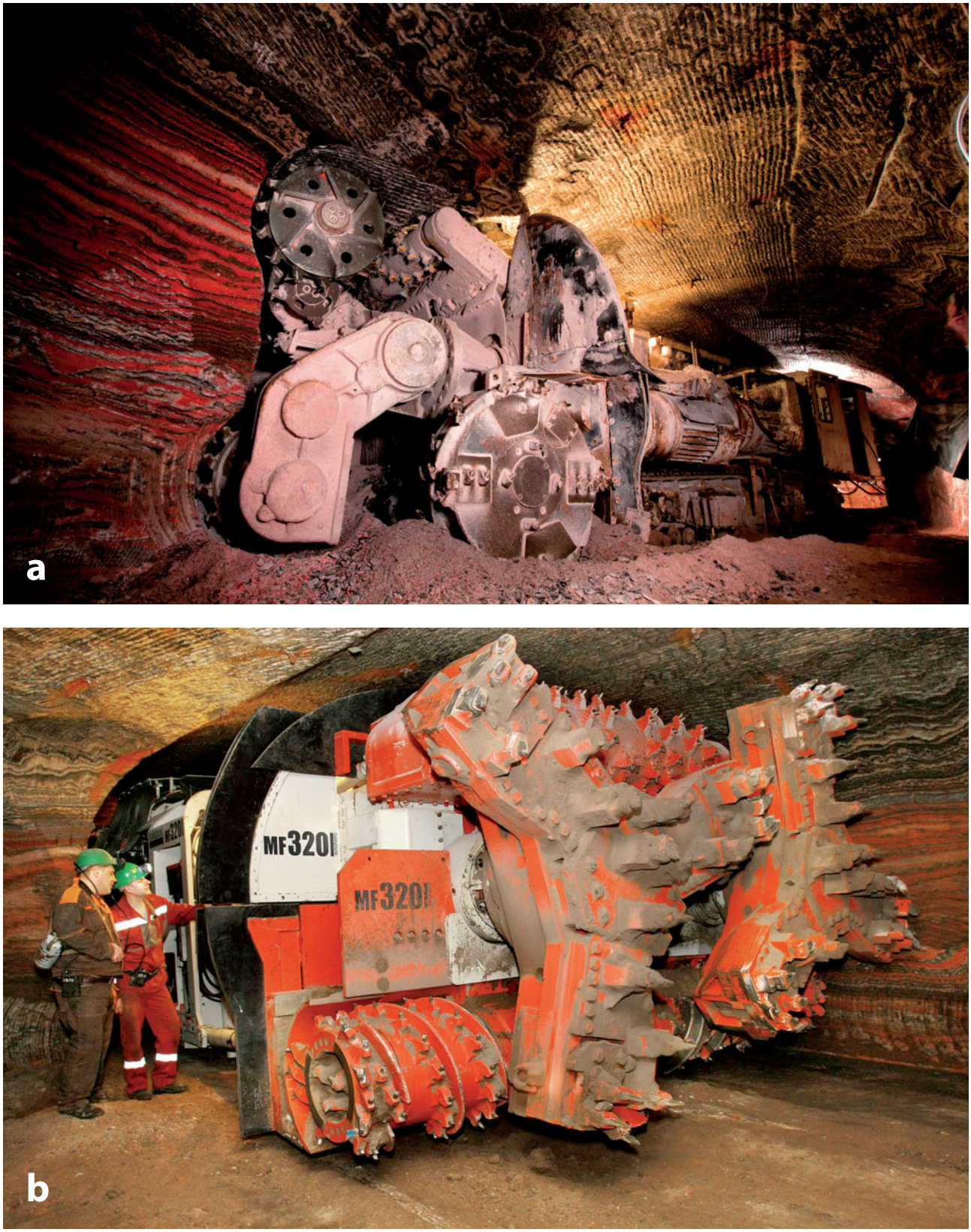


Abbildung 23 Bergbaumaschinen zur Schneidenden Gewinnung im Kalibergwerk Berezniki 4 von URALKALI, Kalilagerstätte Obere Kama, Region Perm, Russland: a – Einsatz einer Vollschnittmaschine im Kalilager AB; b – Einsatz einer Vollschnittmaschine mit 2 Rotoren im Kalilager Krasnyj II [Mit freundlicher Genehmigung für Foto a von PAO Uralkali, Berezniki, Russland; für Foto b von Sandvik Mining and Construction Central Europe GmbH, Essen, Deutschland]



Abbildung 24 Walzenschrämlader zur Schneidenden Gewinnung im Strebbruchbau im Kalibergwerk Soligorsk 1, von BELARUSKALI, Minskaja Woblasz, Belarus

b Bohren und Sprengen

Wie der Name bereits sagt, sind die Bohr- und Sprengmethoden darauf angewiesen, zunächst Bohrlöcher in den Gebirgsverband zu treiben, die dann mit Sprengmitteln versehen, also mit Explosivstoffen und den Zündern gefüllt, und in einem Folgeschritt gezündet werden. Mit jeder Sprengung, also der Detonation der Explosivstoffe, erfolgt schrittweise und diskontinuierlich die Herauslösung der Gesteinsmassen aus dem ursprünglichen Gebirgsverband. Im Einzelnen ist das Methodeninventar beim Bohren und Sprengen sehr vielfältig und komplex. Die notwendigen Vorbereitungsarbeiten für das Gewinnungssprengen in einem Kaliabbau mit einer Kammerbreite von 16 Meter und einer Abbauhöhe von 5 Meter sollen hier kurz exemplarisch erläutert werden (▸Abbildung 26):

Zunächst wird ein vorangestellter Einbruch, die sogenannte Kanone, hergestellt. Dabei werden mittels Großbohrlochwagen mehrere Bohrlöcher hergestellt, deren offenes Hohlraumvolumen beim Sprengvorgang die für die Gesteinsfragmentierung erforderliche Volumenzunahme gewährleistet. Im Anschluss daran erfolgt das Bohren der eigentlichen Sprenglöcher mittels Sprenglochbohrwagen. Dabei werden die Bohrlöcher nach einem optimierten Schema, das sowohl gesteins- und lagerstättenspezifisch wie auch nach der Geometrie des Kammerpfeilersystems variieren muss, in den Abbaustoß gebohrt. Im Anschluss werden diese Sprenglöcher mit Explosivstoff gefüllt und mit Zündern bestückt. Für den genannten Abbau mit 16 Meter Breite und 5 Meter Höhe werden neben den 3 Großlochbohrungen mit Durchmessern von 280 bis 320 Millimeter und einer Länge von 7 Meter zusätzlich noch rund 90 Sprengbohrlöcher mit einem Durchmesser von 38 Millimeter und 7 Meter Länge gebohrt.

Bei diesem in Abbildung 26 dargestellten Abbau werden pro Sprengabschnitt etwa 560 Kubikmeter sylvinitisches Kalisalz mit einer Masse von etwa 1.200 Tonnen aus dem Gebirge gelöst, was in der Regel in einer Arbeitsschicht erfolgen kann.

In Abbildung 25 sind die für das Bohren und Sprengen erforderlichen Geräte einschließlich der Geräte zur Herstellung der First- und Stoßsicherheit sowie der Rohsalztransport schematisch dargestellt.

Das durch das Sprengen aus dem Gebirgsverband gelöste Rohsalz wird mit LTF zu einer Kippstelle mit Brecher gefördert, dort vorzerkleinert und auf ein Förderband aufgegeben. Beim Bohren und Sprengen erfolgt mindestens ab hier die Online-Überwachung der Kalium-Wertstoffgehalte mit Hilfe radiometrischer Verfahren. Somit kann ein auf die Wertstoffmaximierung gerichtetes Verschneiden der in verschiedenen Abbauen gewonnenen und unterschiedliche Wertstoffinhalte führenden Haufwerkströme zu einem optimalen Gesamtförderstrom gesteuert werden. Für die Zwischenförderung kommen LTF unterschiedlicher Bauart und Größe entweder mit Diesel- oder Elektromotor zum Einsatz. Bei einem Schaufelvolumen von bis zu 13 Kubikmeter und einer Nutzlast von bis zu 20 Tonnen ist die Transportleistung dieser Fahrzeuge jedoch in erster Linie von der Transportentfernung abhängig und nicht pauschal zu beziffern. Anschließend erfolgt der Transport des Rohsalzes über Bandanlagen direkt zum Förderschacht beziehungsweise in Feldes- und/oder Schachtbunker mit einem Fassungsvermögen von bis zu 70.000 Tonnen Rohsalz, wo es zwischengelagert werden kann. Im Füllortbereich unmittelbar am Förderschacht erfolgt der Umschlag des Rohsalzes von der horizontalen Förderung, also der Bandanlage zur vertikalen Schachtförderung in einem speziellen Fördergefäß, dem sogenannten *Skip*. Mit der Schachtförderung wird das Rohsalz nach über Tage und dort über Bandanlagen zur weiteren Verarbeitung in die Aufbereitungsanlage transportiert.

Im Anschluss an das Abfördern des Haufwerkes müssen zunächst in den einzelnen Abbaukammern und den Vortriebsstrecken die Firsten und Stöße von losen Gesteinsfragmenten, den sogenannten "Lösern", mit einem Beraubefahrzeug befreit werden. Anschließend erfolgt die Sicherung der Firste durch Anker, welche mit einem speziellen Bohrwagen eingebracht werden. Vor Beginn des nächsten Zyklus werden die jeweiligen Arbeitsorte durch erfahrene, dazu berechtigte Aufsichtspersonen freigegeben.

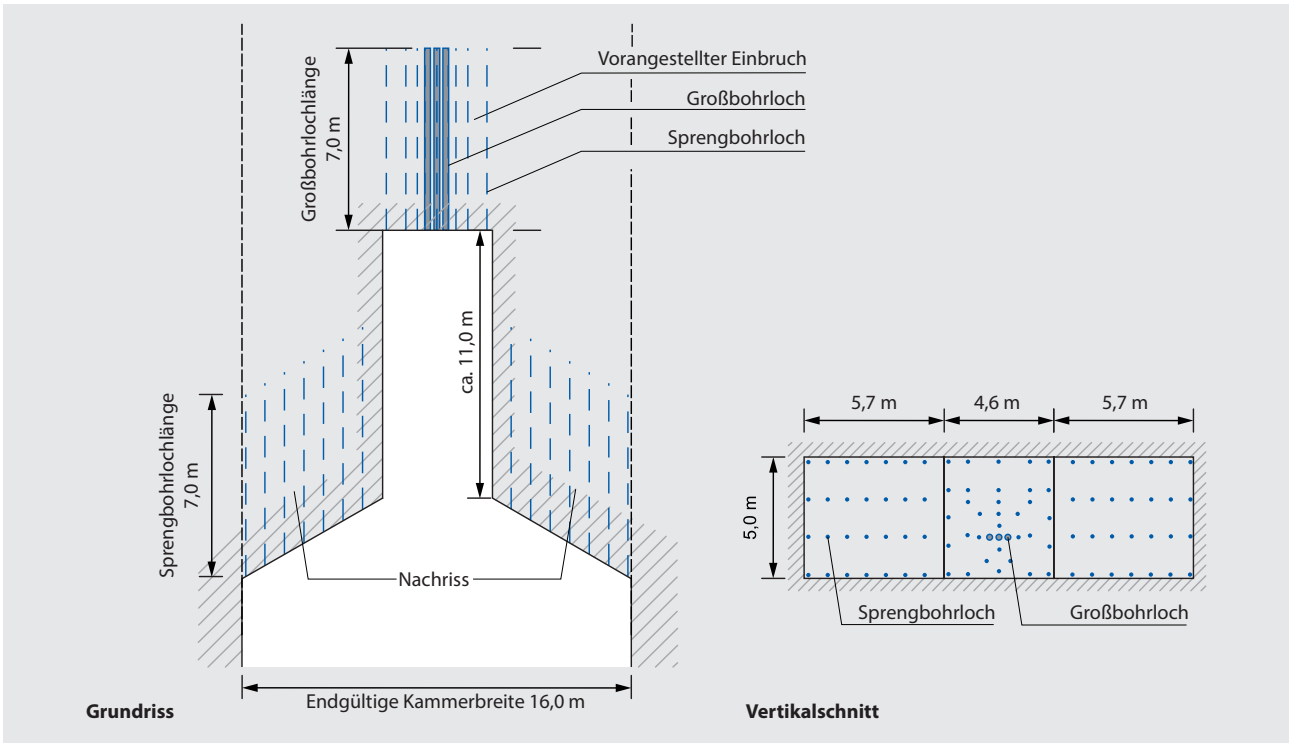


Abbildung 26 Räumliche Anordnung der Großbohrlöcher und der Sprengbohrlöcher für einen Abbau in der Flachen Lagerung beim Bohren und Sprengen, dargestellt in einem Grundriss und einem Vertikalschnitt

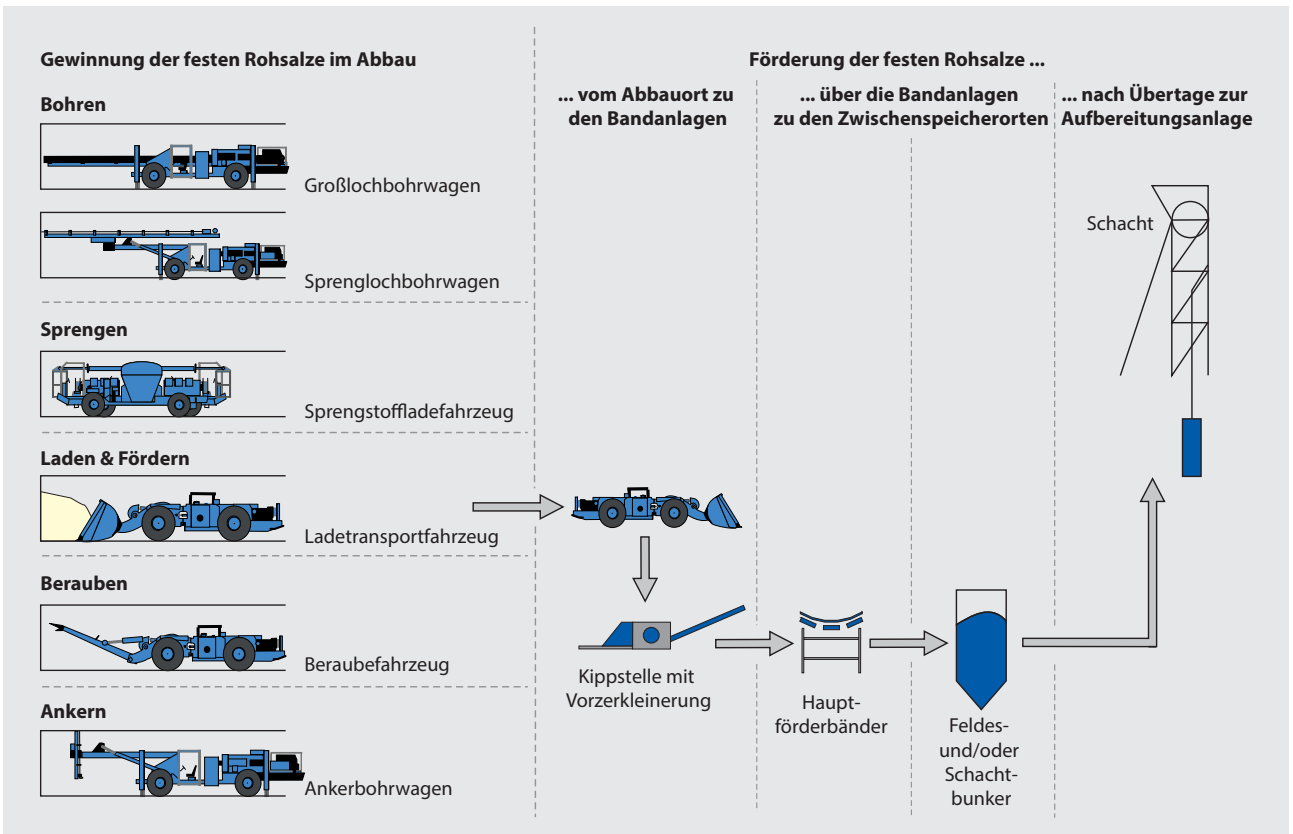


Abbildung 25 Rohsalztransport bei der Gewinnung mittels Bohren und Sprengen von der Abbaufront über die Zwischen- und Hauptförderung bis zur Schachtförderung nach über Tage und die dabei eingesetzte Maschinentechnik

Zur Beherrschung der Gefahren, welche mit dem Auftreten von Gasen (Kohlendioxid) in den oder in unmittelbarer Nachbarschaft der Abbauhorizonte verbunden sein können, wird in den Kaliwerken des Werra-Kalireviers in Deutschland eine spezielle Sicherheitsstrategie angewandt. Diese zielt maßgeblich darauf, den Schutz von Leben und Gesundheit der Belegschaft zu gewährleisten. Aufgrund des Risikos des explosionsartigen Austretens von Gasen und/oder Gas-Salzgemischen ist das Sprengen während der Schicht untersagt, solange Mannschaften noch vor Ort sind. Die Sprengarbeiten erfolgen in der Regel zum Schichtwechsel und werden zentral ausgelöst, nachdem sich die Belegschaft bereits oder noch über Tage beziehungsweise in vorher festgelegten Aufenthaltsräumen in der Nähe der Seilfahrtsschächte befindet. Diese Sicherheitsstrategie hat sich über viele Jahre bewährt, konnte aber nicht verhindern, dass es bei einem Kohlendioxidausbruch von beispieloser Dimension am 01. Oktober 2013 im Bergwerk Unterbreizbach zu einer tragischen Havarie kam, in deren Folge 3 Bergleute ums Leben kamen.

5.1.1.2 Abbauverfahren auf Lagerstätten der Flachen Lagerung

Hinsichtlich der räumlichen Auslegung der Gewinnungsfelder werden in der Flachen Lagerung die folgenden Abbauverfahren unterschieden und entsprechend den für einen individuellen Standort spezifischen Randbedingungen angewendet:

- Kammerpfeilerbau mit langen Pfeilern;
- Kammerpfeilerbau mit quadratischen/rechteckigen Pfeilern;
- Kuppenabbau und Kuppenstrossbau

sowie

- Strebbau[111].

Tabelle 12 zeigt, dass bei Flacher Lagerung in den Kalibergwerken mit Schneidender Gewinnung der Kammerpfeilerbau mit langen Pfeilern dominiert. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass der größte Teil der Kalilagerstätten einfache geologische Bedingungen aufweist und dort auch kein Risiko von explosionsartigem Austreten von Gasen und/oder Gas-Salzgemischen besteht. So haben beispielsweise die kanadischen, russischen und weißrussischen Lagerstätten über mehrere Kilometer hinweg eine gleichmäßige Lagermächtigkeit und geringe Welligkeit der Kaliflöze. Somit können mit Vollschnittmaschinen beziehungsweise Walzenschrämladern Kammern mit einer Länge bis etwa 2.000 Meter aufgefahren werden. Aufgrund der eingeschränkten Beweglichkeit der großen Maschinen werden nur unbedingt notwendige Verbindungen zwischen den einzelnen Abbaukammern angelegt.

Tabelle 12 Übersicht zu den heute weltweit praktizierten verschiedenen Gewinnungsmethoden und Abbauverfahren fester Kalirohsalze

Abbauverfahren	Gewinnungsmethode	Anzahl Bergwerke
Flache Lagerung[112]		
Kammerpfeilerbau mit langen Pfeilern	Schneidend	22
Kammerpfeilerbau mit quadratischen/rechteckigen Pfeilern	Bohren und Sprengen	5
Kuppenabbau	Bohren und Sprengen	1
Kuppenstrossbau	Bohren und Sprengen	1
Strebbruchbau	Schneidend	6
Steile Lagerung		
Firstenstoßbau mit Versatz	Schneidend	1
Weitungsbau mit Versatz	Bohren und Sprengen	1

Im Folgenden werden die Anwendungsbereiche der einzelnen Gewinnungsmethoden und Abbauverfahren zusammenfassend diskutiert.

a Kammerpfeilerbau mit langen Pfeilern[113]

Bei diesem Abbauverfahren handelt es sich um einen offenen Kammerpfeilerbau mit einem Stehenlassen von langen Pfeilern. Die Auffahrung erfolgt überwiegend mittels Schneidender Gewinnung. Es werden pro Panel als Gewinnungsabteilung in der Regel mittig 3 Abbaustrecken zum Transport des Rohsalzes, des Personals und der Materialien sowie der notwendigen Wettermengen aufgefahren. Am Ende der Gewinnungsabteilung wird je eine Galeriestrecke zum Abtransport der verbrauchten Wetter angelegt. Die Abmessungen der Pfeiler und die Breite der Kammern werden durch die Teufe, die abgebaute Mächtigkeit und das anstehende Kalisalzgestein bestimmt.

112 Bei dieser Zuordnung sind Mehrfachaufzählungen möglich, da auf einem Bergwerk durchaus verschiedene Abbauverfahren zur Anwendung kommen können.

113 Vielfach kurz auch als sogenannter Langkammerbau benannt.

Die Abbaukammern können Breiten zwischen 5 und 30 Meter aufweisen. Die Pfeilerbreite wird in Abhängigkeit von der Auslegung der Pfeiler (dauerhaft standsicher oder nachgiebig) entsprechend angepasst. Je nach verwendetem Abfördersystem variiert die Kammerlänge zwischen wenigen hundert Meter bei diskontinuierlich arbeitender Abförderung mittels Bunkerpendelwagen, Muldenkipper und/oder Schiebekastenfahrzeug und wenigen tausend Meter bei kontinuierlich arbeitender Abförderung mittels Förderband. Für die Gewinnung kommen TSM oder VSM zum Einsatz. Nach dem Aussalzen der Gewinnungskammern werden die Abbauhohlräume gegen Zutritt abgesperrt.

Im Weltmaßstab betrachtet, wird der Hauptanteil der bergmännisch gewonnenen Kalisalze im Kammerpfeilerbau mit langen Pfeilern unter Einsatz der Schneidenden Gewinnung abgebaut, was der Rohstoffbasis für knapp 50 Prozent der globalen Kalidüngemittelproduktion entspricht. Dieses Abbauverfahren wird nicht nur in den Kalibergwerken Kanadas, der USA und Russlands angewendet, deren Rohstoffgewinnung zusammengenommen die Grundlage für etwa 42 Prozent der Weltkaliproduktion schaffen, sondern auch und mit diversen Modifikationen in den kleineren Bergwerken in Katalonien, in Großbritannien und in Brasilien betrieben. Im Bergwerk Taquari-Vassouras, Sergipe, Brasilien, wird zur Senkung der recht hohen Abbauverluste zumindest partiell die Durchörterung der langen Pfeiler in einer Sekundärphase durchgeführt (Rothenburg, Carvalho & Dusseault 2007, /851/).

Dieser Kammerpfeilerbau mit langen Pfeilern wird in den Kalibergwerken der Flachen Lagerung in der Provinz Saskatchewan, Kanada, praktiziert (▸Tabelle 13), wo im Jahr 2013 insgesamt rund 44 Millionen Tonnen Rohsalze abgebaut wurden. Hier findet die Gewinnung in den Kalilagern *Esterhazy Member* oder *Patience Lake Member* der *Prairie-Evaporite*-Folge statt, wobei in beiden sylvinitisches Rohsalz mit geringen Anteilen von Carnallitit gewonnen wird.

Die Schneidende Gewinnung erfolgt mittels Vollschnittmaschinen (VSM), die in mehreren Generationen aus dem legendären *Marietta Miner* weiterentwickelt wurden. Zum Einsatz kommen in der Region Esterhazy VSM mit 4, vereinzelt auch mit 2 Rotoren als Schneidwerkzeug in verschiedenen Konfigurationen und in der Region Saskatoon VSM mit 2 Rotoren (INFOMINE 2012, /435/; Prugger & Jones 1980, /786/; NMHFM 2015, /713/). Die Abbaublöcke werden je nach Region entweder mit parallel angeordneten Langkammern (Region Esterhazy) oder im Chevronmuster mit kürzeren Abbaukammern (Region Saskatoon) aufgefahren (▸Abbildung 27). Für den Abtransport des geschnittenen Rohsalzes kommen diskontinuierlich (Bunkerpendelwagen) oder kontinuierlich arbeitende Fördermittel (flexible Bänder) zum Einsatz. Die weitere Förderung vom Panel zum Füllort erfolgt über Bandanlagen und von dort per Gefäßförderung durch den Schacht nach über Tage (Prugger 1979a, /783/; 1979b, /784/; Prugger & Jones 1980, /786/; Strathdee 1994, /987/).

Tabelle 13 Abbauparameter der Kalibergwerke in Saskatchewan, Kanada, unterteilt nach Regionen

Parameter		Region Esterhazy [m]	Region Saskatoon [m]
Teufe		ca. 960	ca. 1.080
Hangendschutzschicht	Mächtigkeit	~ 29	~ 13
	Gestein	Steinsalz	tonhaltiges Steinsalz, Steinsalz mit Tonlagen
Abgebaute Mächtigkeit des Kalilagers		~ 2,4	~ 3,3
Kammerbreite		~ 19,8	~ 9,7

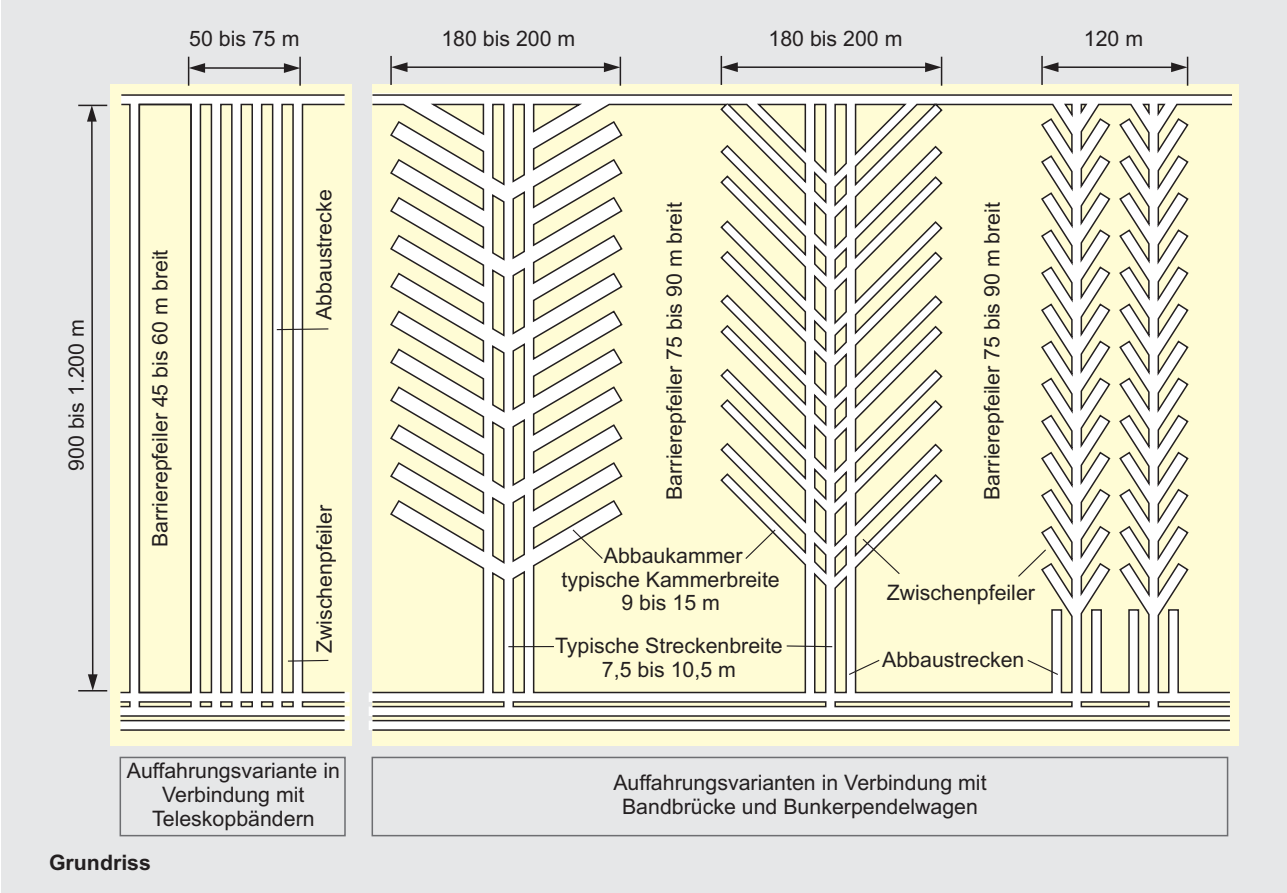


Abbildung 27 Auffahrungsvarianten der Abbaukammern in den kanadischen Kalibergwerken bei Schneidender Gewinnung in der Flachen Lagerung [nach Prugger & Jones 1980, /786/, modifiziert]

Die in den Kaliwerken in der Provinz Saskatchewan zum Einsatz kommenden VSM des Konstruktionsprinzipes *Marietta Miner* wurden speziell für diese Lagerstätte optimiert und weisen ausgesprochen hohe Schneidleistungen auf: Die theoretische Schneidleistung bei der VSM vom Typ *Marietta MBM 780-AW4* liegt bei maximal 1.400 Tonnen pro Stunde. Die tatsächlichen Schneidleistungen sind geringer und liegen bei etwas mehr als 40 Prozent der theoretischen Schneidleistung (ERCOSPLAN 2015, /255/). Abbildung 22 zeigt eine typische Einsatzsituation in der Region Esterhazy für eine VSM vom Typ *Sandvik MF 120* (vergleichbar mit *Marietta MBM 780*). In den bis zu 2.000 Meter langen und bis zu 20 Meter, vereinzelt bis zu 30 Meter, breiten Abbaukammern der durch parallele Auffahrungen erschlossenen Blöcke werden für den 1. Schnitt Teleskopbänder mit der VSM mitgeführt und hinter diesen für die weiteren Schnitte ein stationäres Förderband installiert. Für die weiteren Schnitte zur Aufweitung der Kammer auf die endgültige Breite wird von der VSM ein Querband mitgeführt, welches das Rohsalz auf das parallel zur VSM verlaufende Förderband aufgibt (▸Abbildung 28). Die weitere Förderung vom Panel zum Füllort erfolgt auch hier über Bandanlagen. Die Förderung durch den Schacht nach über Tage wird per *Skip* durchgeführt (Prugger & Jones 1980, /786/).

Entsprechend der verschiedenartigen Randbedingungen sind auch die Anordnungen von Kammern und Pfeilern verschieden. Während in den Kaliwerken in der Region Esterhazy parallel einzelne Kammern mit dauerhaft standsicheren Pfeilern oder aber zwischen 2 dauerhaft standsicheren Barrierepfeilern Mehrkammersysteme mit nachgiebigen Zwischenpfeilern aufgefahren werden, kommen in den Kaliwerken in der Region Saskatoon Mehrkammersysteme im Chevronmuster mit kürzeren Abbaukammern und nachgiebigen Zwischenpfeilern zur Anwendung, wobei die Abbaukammern Längen bis zu 160 Meter und Breiten zwischen 9 und 15 Meter aufweisen. Für das Anlegen von Infrastrukturstrecken wird das sogenannte *stress relief mining* genutzt. Dabei werden mehrere Strecken oder Kammern in ihrer Reihenfolge so aufgefahren, dass die äußeren Strecken/Kammern des Systems den Gebirgsdruck aufnehmen und relativ schnell verbrechen, während die inneren Strecken/Kammern entlastet werden und langfristig stabil bleiben (Prugger & Jones 1980, /786/).

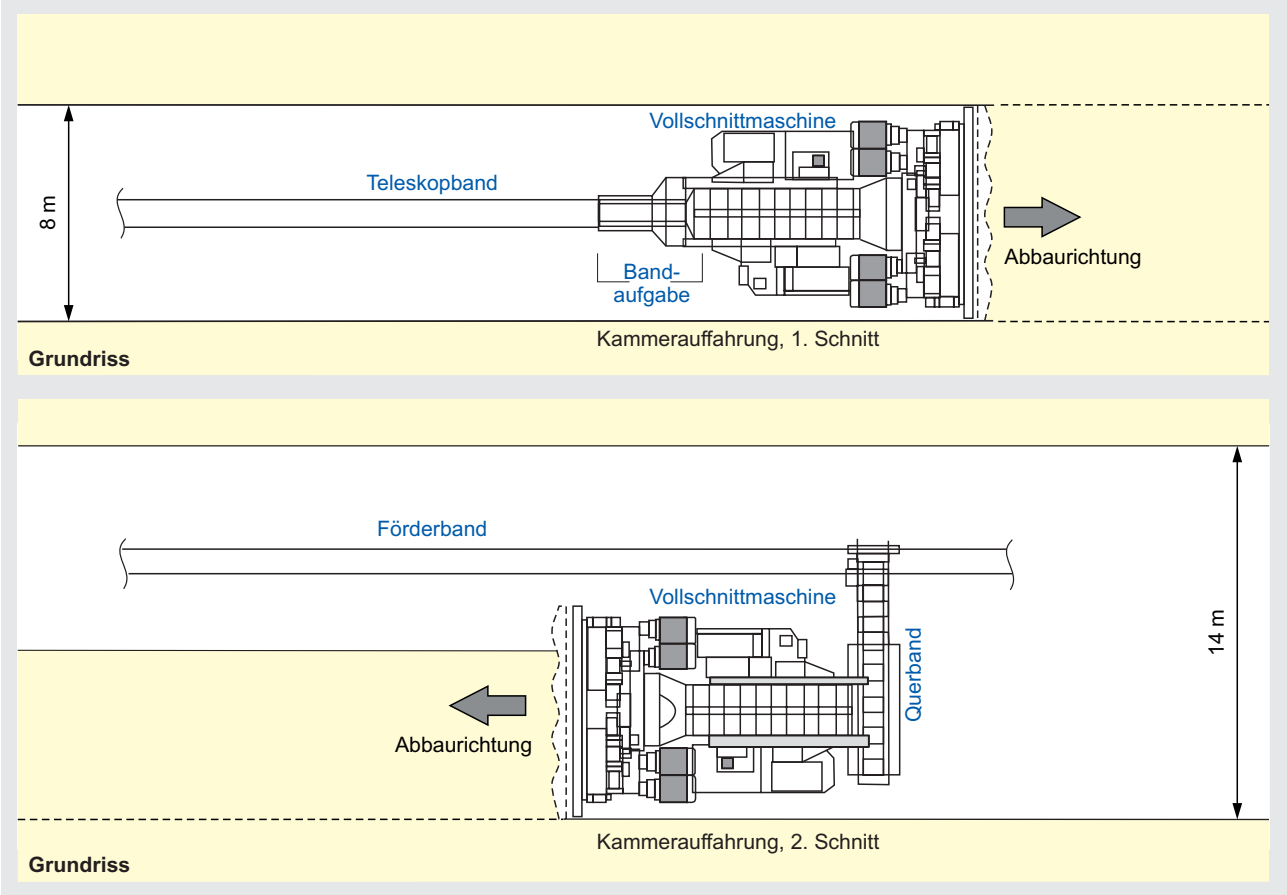


Abbildung 28 Bandaufgabe von der Vollschnittmaschine auf Teleskopbänder im ersten sowie auf ein parallel verlaufendes Förderband in den nachfolgenden Schnitten bei der Schneidenden Gewinnung in den Kalibergwerken in Saskatchewan, Kanada [nach Fortney 2001, /280/, modifiziert]

Der Kammerpfeilerbau mit langen Pfeilern wird ebenfalls in den Kalibergwerken an der Oberen Kama, Region Perm, Russland, angewendet, wo in den 5 Bergwerken von URALKALI im Jahr 2014 rund 50 Millionen Tonnen Rohsalze gewonnen wurden. In den Kalibergwerken von URALKALI wurde die Infrastruktur wie Bunker, Lager und Werkstätten beginnend von den Schächten angelegt, weiterhin wurden zur Ausrichtung der Kalibergwerke von den Schächten aus die sogenannten Magistralbandstrecken mit je 2 begleitenden Strecken aufgefahren. Diese Hauptstrecken, also die langlebigen Grubenbaue werden im Steinsalz unterhalb der Kalilager angelegt. Die Blockstrecken werden dagegen im jeweiligen Kalilager AB und Krasnyj II aufgefahren (▸Abbildung 29). Ein Panel hat eine Länge von etwa 3.000 Meter und eine maximale Breite von 700 Meter. Jedes Panel wird in 5 Blöcke unterteilt, in denen die Gewinnung der beiden Kalilager AB und Krasnyj II in langen Kammern stattfindet (Kuznetsov 2006, /576/). Die Abbaukammern mit Längen bis etwa 300 Meter und Breiten zwischen etwa 5 und 9 Meter werden im Winkel von 90 Grad zu den Vorrichtungsstrecken der Panels aufgefahren. Je nach der Mächtigkeit der abzubauenden Kalilager beziehungsweise der Kammerbreite werden die Kammern von VSM in einem oder mehreren vertikalen beziehungsweise horizontalen Schnitten aufgefahren. Untergeordnet erfolgt auch der Abbau des Kalilagers W sowohl abschnittsweise in seiner sylvinitischen als auch in sehr kleinen Umfang in seiner carnallitischen Ausbildung.

Die Aus- und Vorrichtung der Lagerstätte als auch die Gewinnung der beiden sylvinitisch ausgebildeten Kalilager erfolgen durch Schneidende Gewinnung mit VSM vom Typ:

- *URAL – 20 A* und *R*;
- *URAL – 10 A* und *R* (▸Abbildung 30)

und

- *PK 8*,

wogegen der begrenzte Abbau von Carnallitit mittels Bohren und Sprengen erfolgt.

Die theoretische Schneidleistung der *URAL – 20 R* liegt bei maximal 420 Tonnen pro Stunde. Die tatsächlichen Schneidleistungen sind jedoch wesentlich geringer und liegen im langjährigen Mittel bei rund 30 Prozent der theoretischen Schneidleistung.

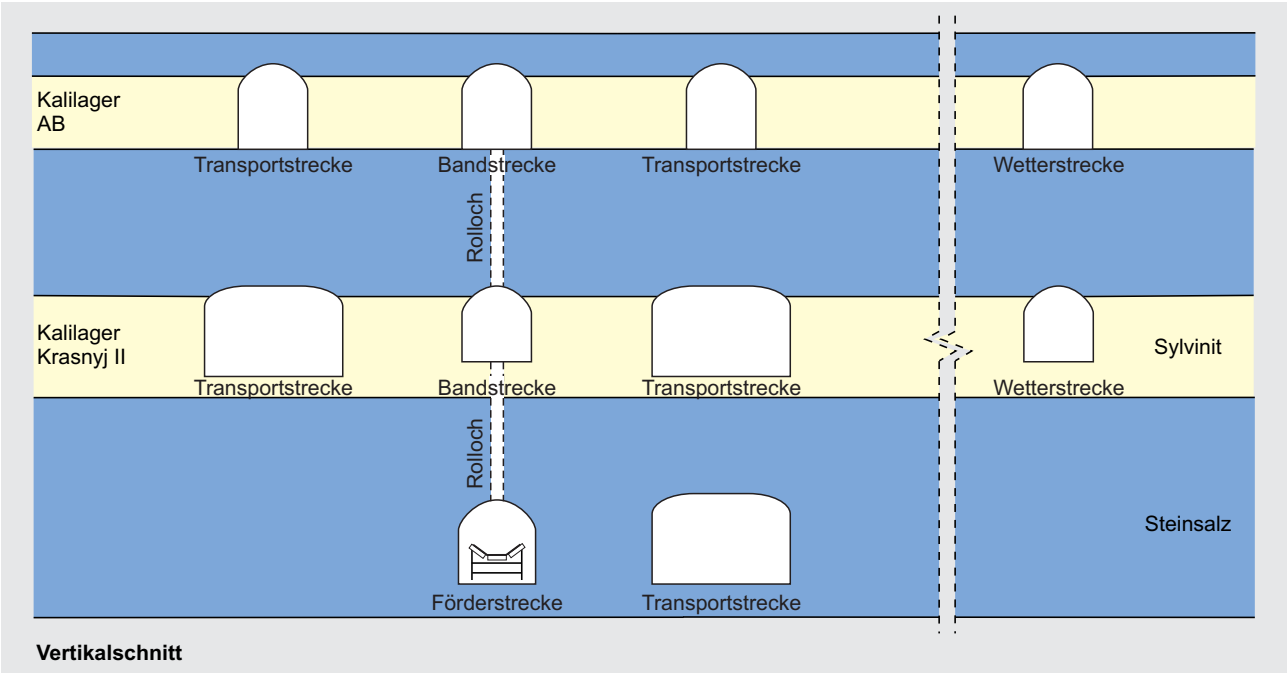


Abbildung 29 Aus- und Vorrichtung beim Zwei-Flöz-Abbau der Kalilagerstätte Obere Kama in der Region Perm, Russland [nach Kuznetsov 2006, /576/, modifiziert]



Abbildung 30 Vollschnittmaschine mit Bunkerpendelwagen beim Ladevorgang [Foto mit freundlicher Genehmigung von ЗАО Управляющая горная машиностроительная компания РУДГОРМАШ]

Da eine direkte Zwischenbunkerung durch die VSM aufgrund des fehlenden Ladetisches nicht möglich ist, werden Bunkerlader mit einer Nutzlast von 15 bis 30 Tonnen eingesetzt, welche unmittelbar an die VSM angehangen werden. Der Betrieb der VSM mit dem Bunkerlader erfolgt zusammen mit einem Bunkerpendelwagen mit 15 bis 30 Tonnen Nutzlast, welcher das Rohsalz vom Arbeitsort zur Übergabe auf das Panelband transportiert (▸Abbildung 31 und Abbildung 32). Derzeit sind bei URALKALI insgesamt 121 solcher Gewinnungseinheiten im Einsatz.

Das Rohsalz wird mit der Bandanlage zum Zwischenbunker oder direkt auf die magistrale Bandanlage gefördert. Durch die Zwischenbunker werden der Förderstrom und die Rohsalzqualität vergleichmäßigt. Mit den magistralen Bandanlagen wird das Rohsalz zu einem Hauptbunker gefördert, der sich in Schachtnähe befindet. Von dort aus wird das Rohsalz per Bandanlage zum Schacht und anschließend über eine Skipförderung im Schacht nach über Tage gefördert.



Abbildung 31 Bunkerpendelwagen bei der Zwischenförderung
[Foto mit freundlicher Genehmigung von ЗАО Управляющая горная машиностроительная компания РУДГОРМАШ]

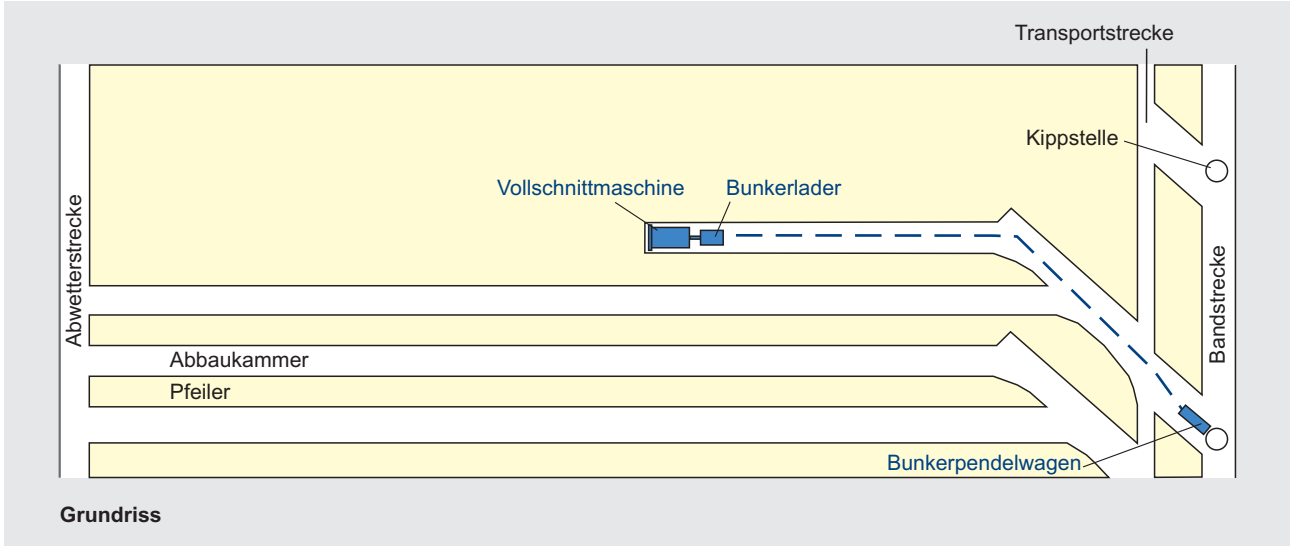


Abbildung 32 Aus- und Vorrichtung sowie Abbauführung und Maschinentechnik bei der Schneidenden Gewinnung in den russischen Kalibergwerken an der Oberen Kama in der Region Perm, Russland

b Kammerpfeilerbau mit quadratischen beziehungsweise rechteckigen Pfeilern

Der Kammerpfeilerbau mit quadratischen Pfeilern wird vorwiegend in den deutschen Kalibergwerken der Flachen Lagerung von K+S praktiziert. Das betrifft die Kalibergwerke des Verbundwerkes Neuhof-Ellers, Werra und Zielitz. Bei diesem Abbauverfahren erfolgt die Gewinnung des Rohsalzes durch Herstellung eines Systems von zumeist rechtwinklig zueinander angeordneten Abbaukammern, zwischen denen zur Unterstützung des Hangenden quadratische beziehungsweise rechteckige Abbaupfeiler mit den jeweils gebirgsmechanisch erforderlichen Pfeilerabmessungen stehenbleiben. Die Abmessungen der Pfeiler und die Breite der Kammern werden durch die Teufe, die abgebaute Mächtigkeit und das anstehende Kalisalzgestein (Sylvinit, Hartsalz, Carnallitit) der Lagerstätte bestimmt. Der Abbau wird in mehreren Gewinnungsabteilungen durchgeführt. Dabei werden vorab pro Abteilung mittig 3 Vorrichtungsstrecken zum Transport des Rohsalzes, des Personals und der Materialien sowie der notwendigen Wettermengen aufgefahren. Der Abbau des Kalisalzes erfolgt von diesen Strecken aus im Raster mit der beschriebenen Gewinnungsmethode Bohren und Sprengen. Nach Auffahrung des Rasters wird die Zuführung von Frischwettern und Abführung von verbrauchten Wettern an die Peripherie der Abteilung verlegt (▸Abbildung 33).

Bei größeren Lagermächtigkeiten kann in einer zweiten Phase ein weiterer Teil derselben oder die Gesamtmächtigkeit durch Strossen hereingewonnen werden (▸Abbildung 34), wodurch die Wirtschaftlichkeit dieses Abbauverfahrens weiter erhöht wird (Helms, Heidecke & Nauke 1996, /383/). Nach dem Aussalzen der Gewinnungsabbaue werden die Abbauhohlräume gegen Betreten gesichert.

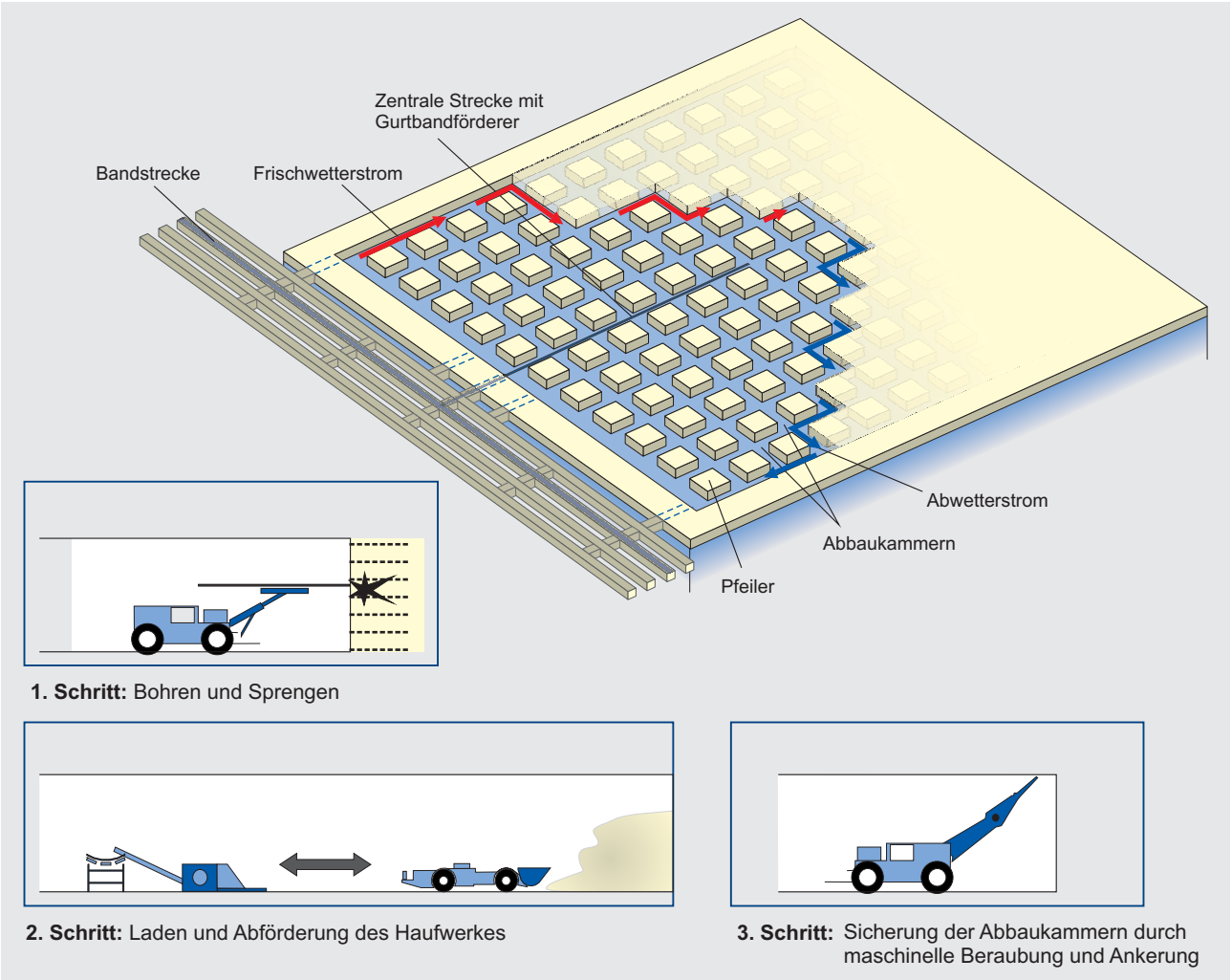


Abbildung 33 Aus- und Vorrichtung sowie Abbauführung im Kammerpfeilerbau mit quadratischen Pfeilern bei der Gewinnung durch Bohren und Sprengen in der Flachen Lagerung

Die Aus- und Vorrichtung der Lagerstätte kann entweder durch Schneidende Gewinnung oder aber durch Bohren und Sprengen, die Gewinnung in den Abbaurevieren dagegen ausschließlich durch Bohr- und Sprengarbeit ausgeführt werden. Der Abbauzyklus erfordert die nachfolgenden Großgeräte:

- Großlochbohrwagen (▸Abbildung 35a);
- Sprenglochbohrwagen (▸Abbildung 35b);
- Sprengstoffladefahrzeug zum Befüllen der Sprenglöcher mit Explosivstoff (▸Abbildung 35c);
- Ladetransportfahrzeug (▸Abbildung 35d);
- Beraubefahrzeug (▸Abbildung 35e)

und

- Ankerbohrwagen (▸Abbildung 35f).

Die Gewinnungsleistung wird bei dem Einsatz einer solchen Gerätekette durch den Umstand bestimmt, dass der Arbeitsschritt der Sprengung jeweils nur zum Schichtwechsel stattfinden darf. Damit ist die tatsächliche Gewinnungsleistung maßgeblich abhängig von der Länge der Großbohrlöcher und Sprengbohrlöcher, das heißt der Länge des Sprengabschnittes, sowie vom Querschnitt des Abbaus.

Der Einsatz aller für den Abbauzyklus erforderlichen Fahrzeuge erfolgt unabhängig voneinander an mehreren Abbauorten, so dass eine Beeinflussung der Gewinnungsleistung durch die übrigen Arbeitsschritte des Besetzens der Sprenglöcher, des Beraubens der Firste/Stöße sowie des Ankersetzens nicht gegeben ist.

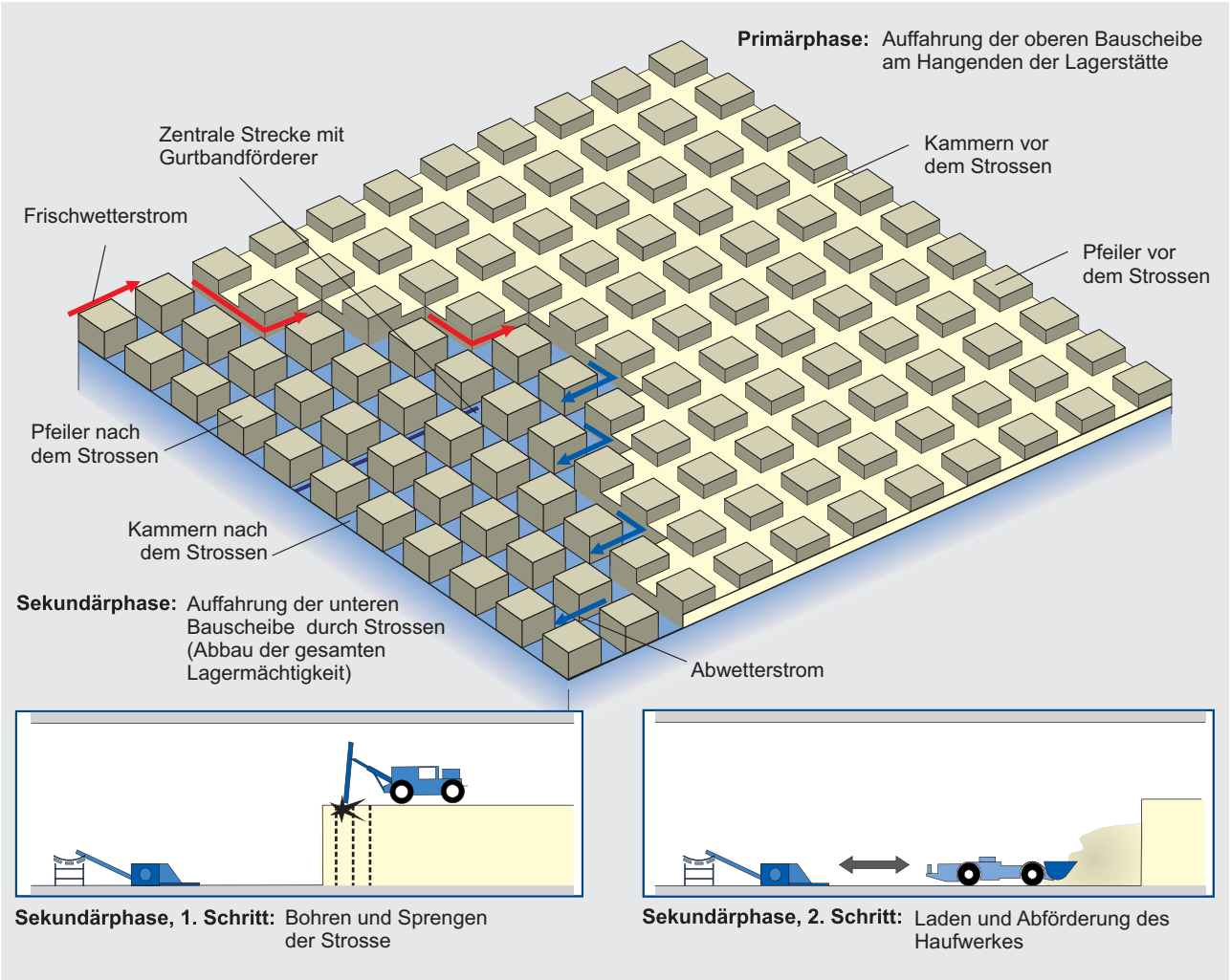


Abbildung 34 Aus- und Vorrichtung sowie Abbauführung im Kammerpfeilerbau mit quadratischen Pfeilern und anschließendem Strossen bei der Gewinnung durch Bohren und Sprengen in der Flachen Lagerung

c Kuppenabbau

Der Kuppenabbau ist ein Abbauverfahren, das speziell für den Einsatz im Werra-Kalirevier, Deutschland, in Bereichen mit großen Carnallititmächtigkeiten entwickelt wurde. Diese Kuppenstrukturen sind eine geologische Besonderheit im Werra-Kalirevier, wobei das untere carnallitische Kalilager (Kaliflöz Thüringen) diapirartig mit teilweise bis zu 120 Meter Mächtigkeit ausgebildet ist. Der Kuppenabbau wird derzeit ausschließlich im Kalibergwerk Unterbreizbach in Lagerstättenteilen mit Carnallititmächtigkeiten von mehr als 25 Meter angewandt.

Der Kuppenabbau wurde ursprünglich als versatzloser Langkammerbau konzipiert[114] (Mocka 1994, /675/), der heute aber auch mit dem Einbringen von festen Aufbereitungsrückständen mittels Spülversatzverfahren betrieben wird. Jedem Abbauhohlraum ist ein großer, massiver Barrierepfeiler zugeordnet (▸Abbildung 36). Dieser dient als Hauptstützelement bei diesem Abbauverfahren. Entsprechend der Ausbildung der Kuppenstruktur kann als spezifische Abbauvariante des Kuppenabbaues der sogenannte Einzelkuppenabbau mit Doppelstreckenvorrichtung im unterlagernden Steinsalz (Unteres Werra-Steinsalz) angewandt werden. Die Kuppenhohlräume sind einzelne Langkammern mit einer Breite von maximal 55 Meter und einer Höhe bis etwa 90 Meter, wobei die anzusetzende Kuppenabbauhöhe durch die gebaute Lagermächtigkeit definiert wird. Das Hohlraumvolumen beträgt bis zu einer Million Kubikmeter. Für den Kuppenabbau wird eine modifizierte, dem Grunde nach aber typische Maschinentechnik der bohr- und sprengtechnischen Gewinnung eingesetzt.

114 Zur Verringerung der Salzlast des Flusses Werra werden die offenen Kuppenhohlräume mittels Spülversatz wieder mit Salzrückständen der Aufbereitungsanlage Unterbreizbach verfüllt (Schlotzhauer & Jacob 2005, /882/).

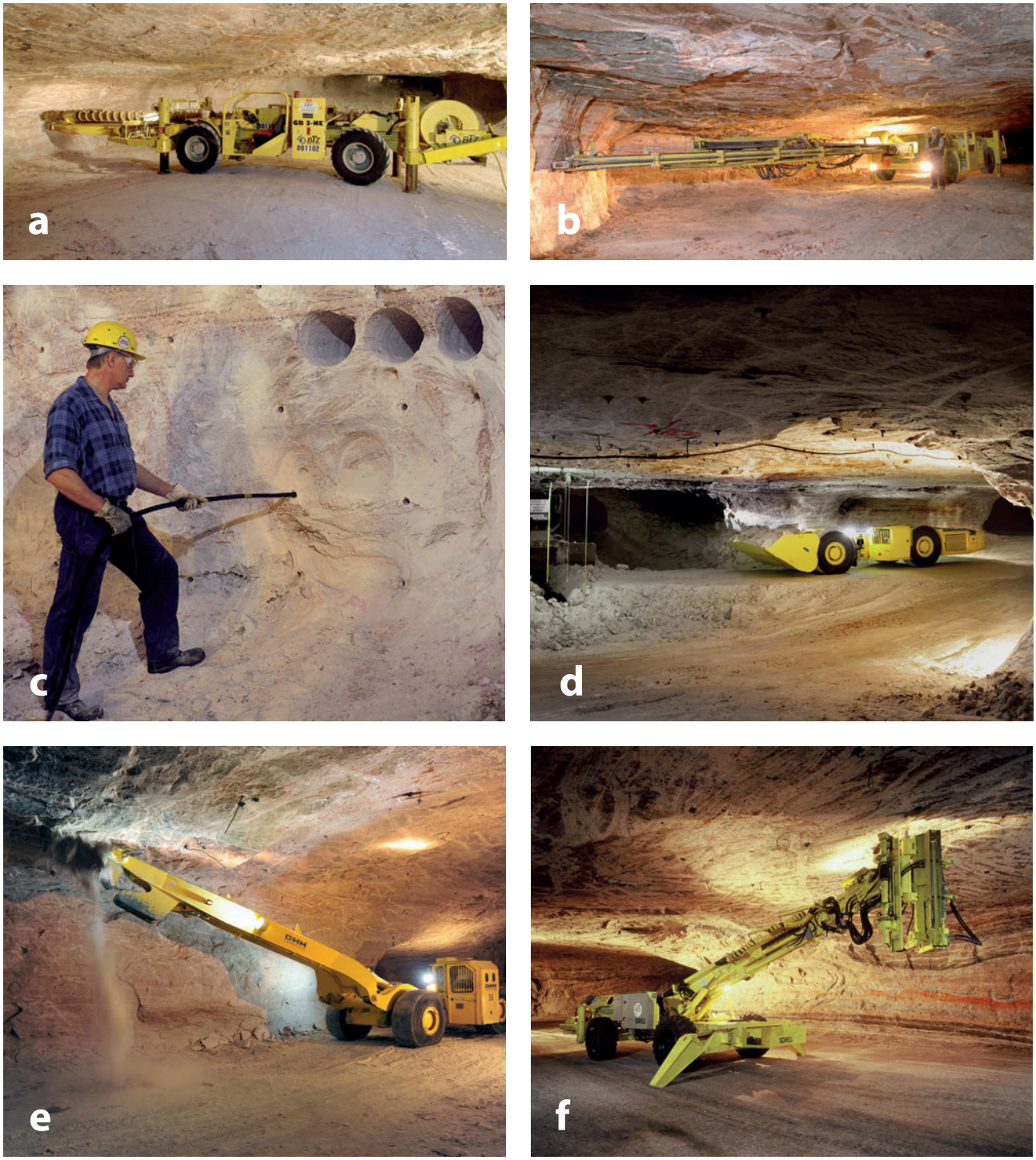


Abbildung 35 Bergbaumaschinen zum Bohren und Sprengen in der Flachen Lagerung in den Kalibergwerken Neuhof-Ellers, Werra und Zielitz von K+S, Deutschland; a – Einsatz eines Großlochbohrwagens; b – Einsatz eines Sprenglochbohrwagens; c – Befüllen der Sprenglöcher; d – Einsatz eines Dieselfahrladers an einer Kippstelle mit Brecher; e – Einsatz eines Beraubefahrzeugs; f – Einsatz eines Ankerbohrwagens [Fotos mit freundlicher Genehmigung von K+S KALI GmbH, Kassel, Deutschland]

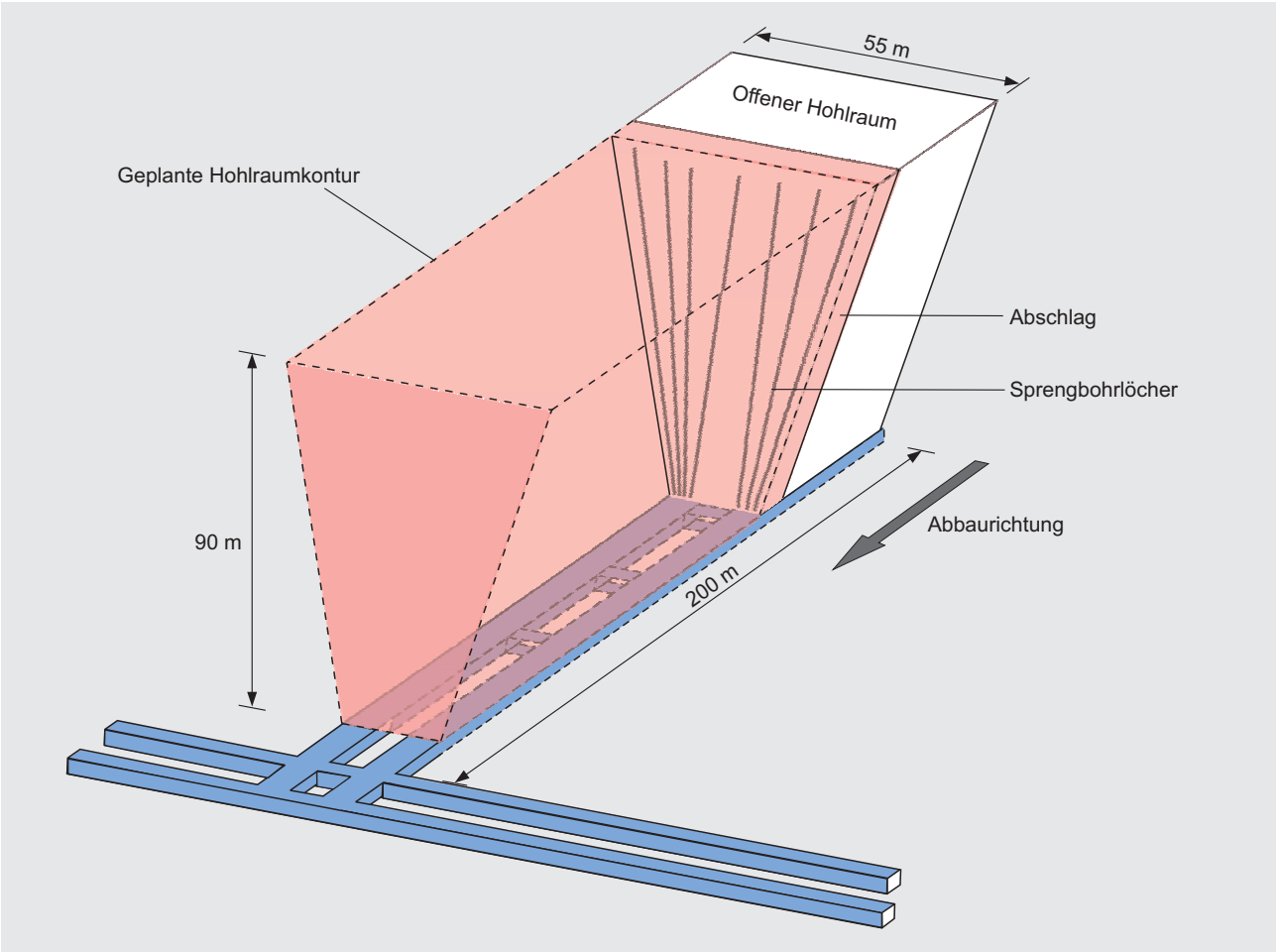


Abbildung 36 Aus- und Vorrichtung sowie Abbauführung im Kuppenabbau im Kalibergwerk Unterbreizbach von K+S mit Firstspannweiten bis 55 Meter und der erforderlichen Doppelstreckenauffahrung im Unteren Werra-Steinsalz

d Kuppenstrossbau

Der Kuppenstrossbau (▸Abbildung 37) wird ebenfalls ausschließlich im Kalibergwerk Unterbreizbach, Deutschland, von K+S praktiziert. Der Abbau erfolgt in carnallitischen Lagerstättenteilen mit Mächtigkeiten zwischen 12 und 25 Meter, die von bauwürdigem Sylvinit überlagert sind. Beim Kuppenstrossbau werden in einer Primärphase in 2 Schritten Langkammerabbaue mit entsprechender Kammerbreite aufgefahren. Im ersten Schritt erfolgt die Auffahrung der Grundstrecke im Sylvinit am Hangenden mit 13 Meter Kammerbreite und maximal 7 Meter Abbauhöhe. Anschließend wird in einem zweiten Schritt die Hangendstrecke auf 22 Meter Gesamtbreite erweitert. Im abschließenden dritten Schritt, der einer sekundären Abbauphase entspricht, wird bis zu einer Gesamtmächtigkeit von 25 Meter beziehungsweise bis zur Unterkante des Kaliflözes Thüringen im Carnallitit gestrosst, wobei die Stöße mit einer Neigung von 76° angelegt werden.

Die Vorrichtung der Baublöcke ist durch zentrale Band- und Fahrstrecken gekennzeichnet sowie rechtwinklig dazu liegende Abteilungsstrecken für Wetterführung und Haufwerkstransport mit Streckenbreiten von ≤ 10 Meter im liegenden Steinsalz (Unteres Werra-Steinsalz). Diese Strecken dienen während der Sekundärphase als Förderstrecken. Darüber hinaus wird in der Mitte des Baublockes eine Hangendauffahrung angelegt, aus der die Hangendstrecken entwickelt werden. Eine leichte Firstwölbung in den Abbaukammern erhöht die Konturstabilität, wobei die Firstsicherheit durch eine Ankerdichte von einem Anker je 4 Quadratmeter Firstfläche erreicht wird.

Die Kuppenstrosse wird aus dem Liegenden aufgebrochen. Der Strossenfortschritt erfolgt durch Bohr- und Sprengarbeit aus der Hangendauffahrung heraus, wodurch ein Arbeiten unter gesicherten Firsten gewährleistet wird. Der Abtransport des Haufwerkes erfolgt mit ferngesteuerten LTF.

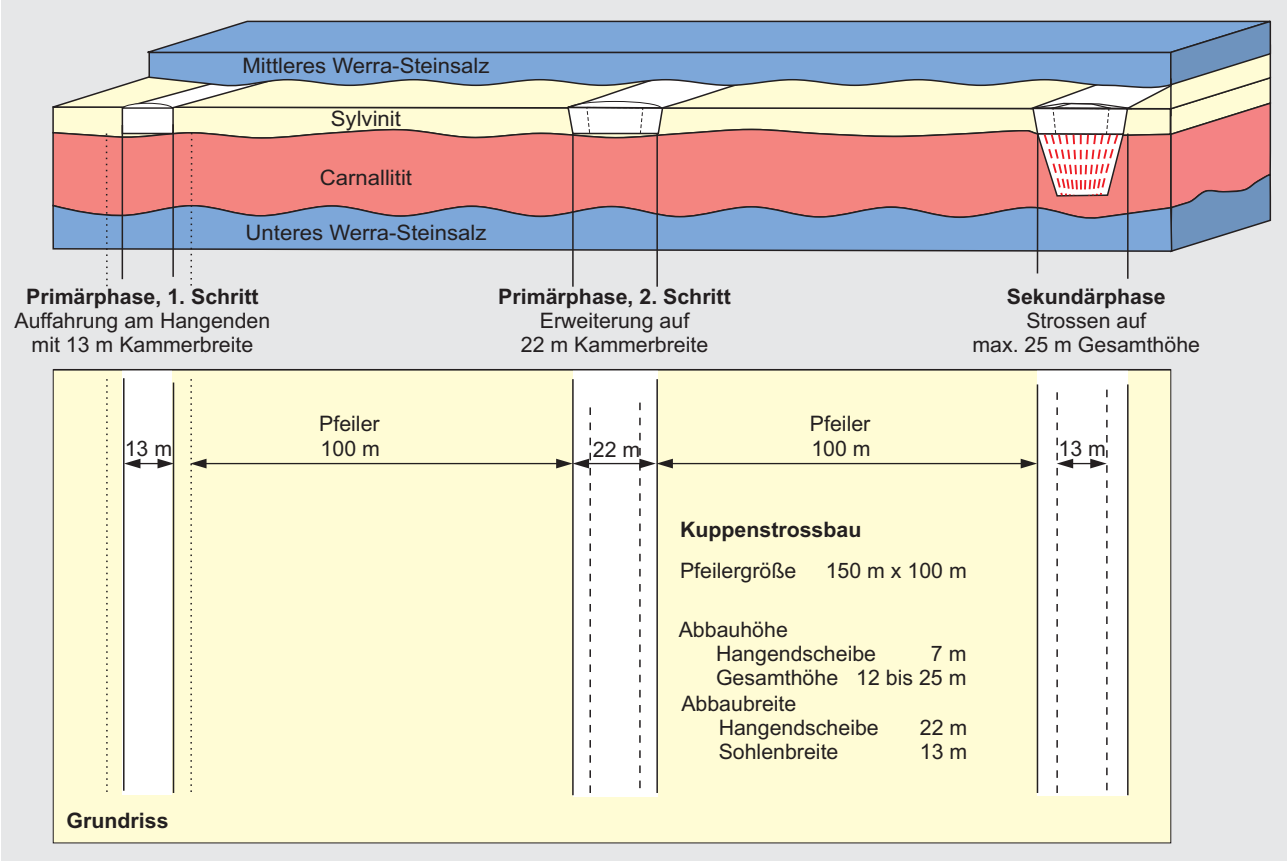


Abbildung 37 Aus- und Vorrichtung sowie Abbauführung im Kuppenstrossbau im Kalibergwerk Unterbreizbach von K+S, Deutschland

e Strebbruchbau

Der Strebbruchbau ist ein sogenannter Totalabbau von Teilbereichen der Lagerstätte, wo die gesamte Mächtigkeit des Abbauhorizontes innerhalb eines Abbaupanels ohne Stehenlassen von Pfeilertragelementen hereingewonnen wird. Das ehemals über dem Abbauhorizont lagernde Gebirge geht hinter der Abbaufront planmäßig zu Bruch, was eine starke Auflockerung der darüber lagernden Hangendschichten verursacht. Daher ist dieses Verfahren nur unter spezifischen hydrogeologischen Verhältnissen im Deckgebirge anwendbar, die einen Zutritt von Grundwässern in das Bergwerk auch im Zuge der Auflockerung der Deckgebirgsschichten nicht erwarten lassen. In Abhängigkeit von der Ausbildung der salinaren Hangendschutzschicht sind die Strebabbaue aber in jedem Falle derart zu dimensionieren, dass beim Zubruchgehen der Gesteinsschichten im unmittelbaren Hangenden des Abbauhorizontes eine ausreichend mächtige ungestörte Hangendschutzschicht verbleibt. Damit wird die Schutzfunktion der überlagernden Schichten gewährleistet und das Eindringen von Wässern aus oberen, innerhalb der hangenden Gesteinseinheiten lagernden Grundwasserleitern verhindert. Zwischen den einzelnen Abteilungen müssen daher zur Stabilisierung des gesamten Grubenfeldes Barrierepfeiler mit entsprechender Dimensionierung stehen gelassen werden, so dass auch beim Strebbruchbau nicht die gesamte Lagerstätte im Grubenfeld abgebaut werden kann. Die Firstsicherheit im Streb wird durch einen schreitenden hydraulischen Ausbau gewährleistet. Hinter diesem Ausbau kommt es zur planmäßigen Absenkung der Hangendschichten. Die unmittelbar angrenzenden Schichten im Hangenden reißen auf und gehen zu Bruch. Dieser Bereich der hereingebrochenen Hangendschichten wird als "Alter Mann" bezeichnet und kann nach dem Abbau nicht mehr betreten werden (▸Abbildung 38).

Bei diesem Abbauverfahren wird der Lagerstätteninhalt durch sogenannte Walzenschrämlader[115] mechanisch aus

115 Unter dem Begriff Walzenschrämlader werden TSM mit einem Gewicht bis zu 150 t verstanden, die auf einem Trogkettenförderer verfahrbar installiert sind und in Schneidender Gewinnung kontinuierlich Rohsalze aus dem Gebirge lösen. Das Rohsalz wird durch einen oder 2 rotierende Meißelträger (Schneidwalzen) geschnitten, auf den unter der Maschine verlaufenden Trogkettenförderer aufgegeben und von diesem aus dem Gewinnungsstreb auf nachgeschaltete Fördereinrichtungen transportiert.

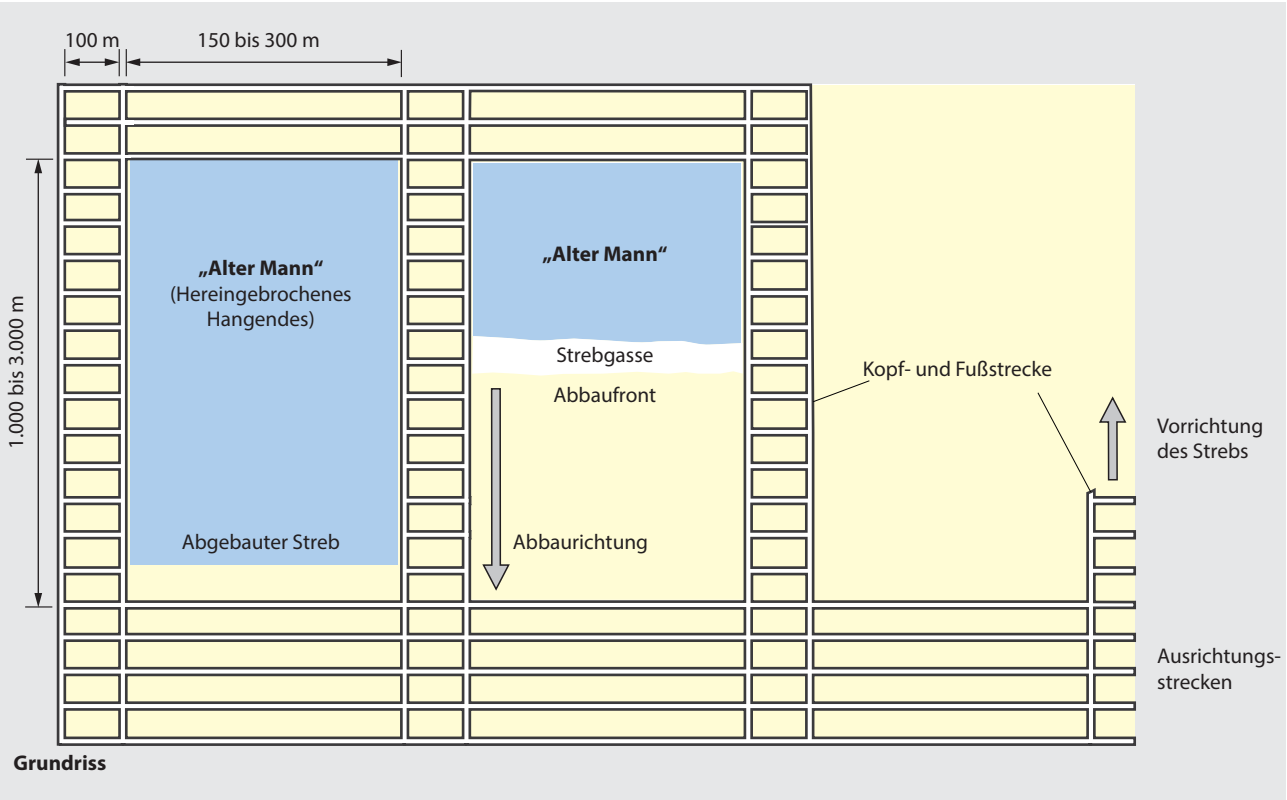


Abbildung 38 Aus- und Vorrichtung sowie Abbauführung im Strebbruchbau mit mehreren Streben [nach MSEC 2007, /692/, modifiziert]

dem Gebirgsverband heraus geschnitten und im Streb mittels Trogkettenförderer zu den nachgeschalteten Bandanlagen transportiert. Die Rohsalzförderung mittels Bandanlagen, der Personal- und Materialtransport sowie die notwendige Wetterführung erfolgen über je eine zuvor aufgefahrene Kopf- und Fußstrecke des Strebs. Der Abbau kann ein oder gleichzeitig mehrere Kalilager einschließen, was letztlich allein von der über die Abbauhöhe verteilten Wertstoffkonzentration abhängt. Die Abbauführung erfolgt stets im sogenannten Heimwärtsbau, das heißt die Abbaurichtung ist vom Ende der Abteilung hin zur Hauptbandanlage gerichtet. Typische Dimensionen beim Strebbruchbau sind für den einzelnen Streb eine Breite zwischen 150 und 300 Meter und eine Länge von 1.000 bis 3.000 Meter (Garrett 1996, /315/). Die Abbauhöhe ist abhängig von der Lagerstättenmächtigkeit und liegt zwischen 1,5 und 5,0 Meter.

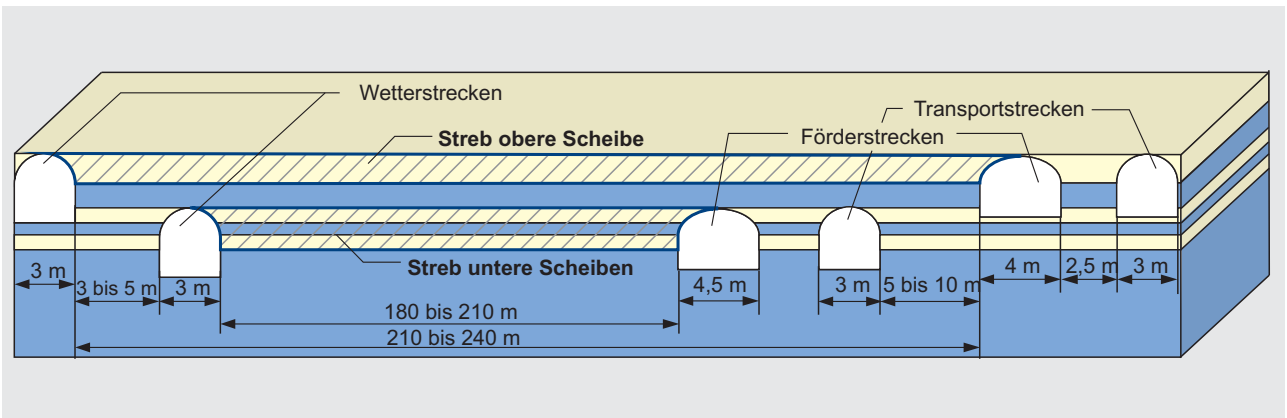


Abbildung 39 Aus- und Vorrichtung sowie Abbauführung im Strebbruchbau auf den Kalibergwerken Soligorsk, Belarus [nach Kirienko et al. 2010, /521/, modifiziert]

Der Strebbau, ursprünglich im Kohleabbau entwickelt und dort auch vorrangig eingesetzt, wird aufgrund der geologischen Anforderungen an die Hangendschutzschicht bislang nur in wenigen Kalibergwerken eingesetzt. Gegenwärtig wird dieses Abbauverfahren nur in den 6 Bergwerken von BELARUSKALI, nahe der Stadt Soligorsk in der Republik Belarus angewandt. Das dabei praktizierte Grundprinzip ist schematisch in Abbildung 39 skizziert.

Das Abbauverfahren Strebbruchbau zeichnet sich durch eine hohe Effektivität bei geringen Betriebskosten aus, ist aber nur unter sehr speziellen Randbedingungen, wie sehr homogen ausgebildeten und kontinuierlichen Lagerungsverhältnissen, anwendbar. Bei größeren Lagermächtigkeiten beziehungsweise einer hydrogeologischen Gefährdung aus dem Hangenden ist dieses Abbauverfahren nicht geeignet. Weiterhin ist aufgrund des schnellen Zubruchgehens des "Alten Mannes" das nachträgliche Einbringen von Versatz kaum möglich.

5.1.1.3 Abbauverfahren auf Lagerstätten der Steilen Lagerung

Weltweit befinden sich heute nur noch zwei Lagerstätten der Steilen Lagerung in Verhieb. In dem Kalibergwerk New Brunswick, Kanada, wird ein Firstenstoßbau und im Kalibergwerk Sigmundshall bei Hannover, Deutschland, hingegen ein Weitungsbau praktiziert (▸STANDORTSTECKBRIEFE in Kapitel 10). Um die Abbauverluste in diesen Bergwerken der Steilen Lagerung zu minimieren, sind die Abbauverfahren in beiden Fällen auf das Einbringen von Versatz optimiert worden (▸Tabelle 12).

Ein schematischer Schnitt durch eine Lagerstätte der Steilen Lagerung ist in Abbildung 40 am Beispiel des Kaliwerkes New Brunswick von PCS dargestellt.

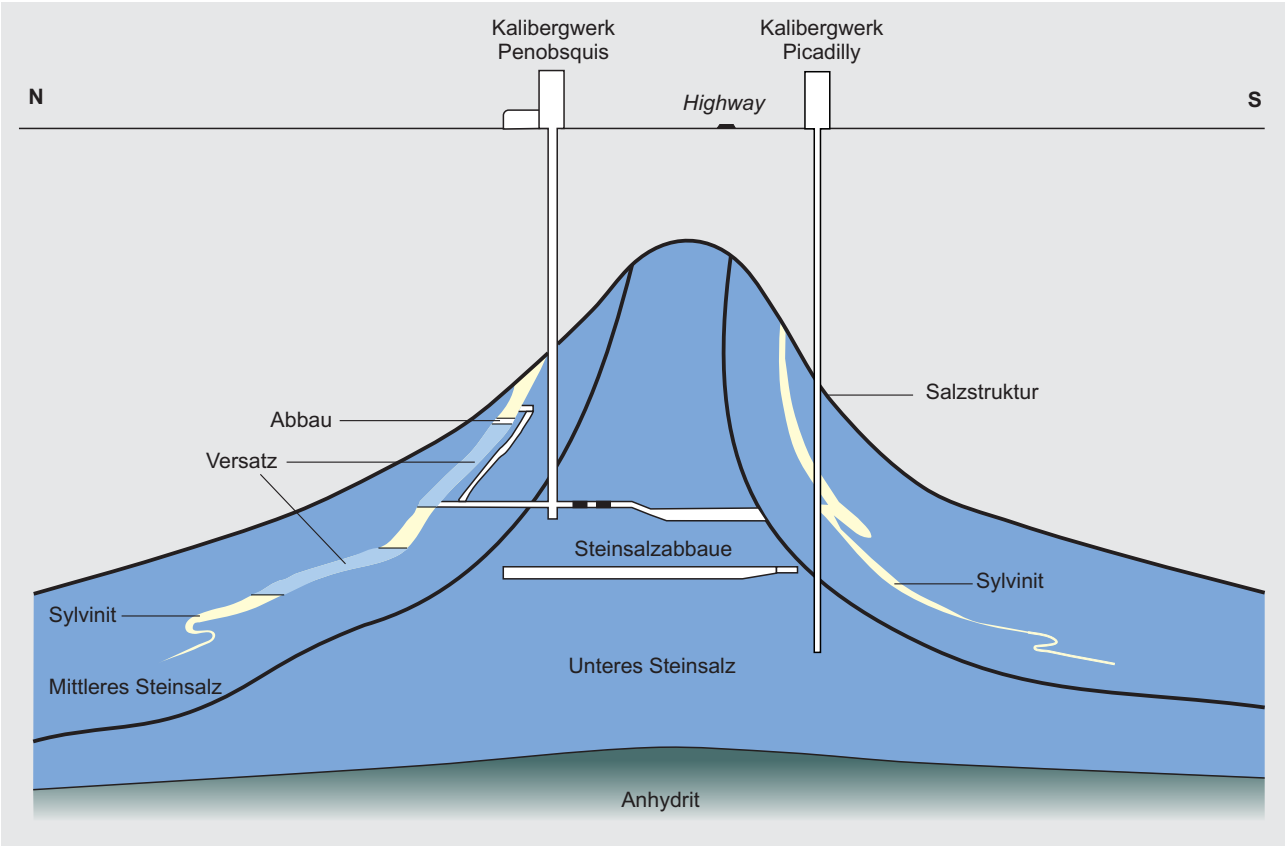


Abbildung 40 Lagerungsverhältnisse, Position der Schächte sowie Lage der Kali- und der Steinsalzabbaue und der Versatzlokationen in den Kalibergwerken Penobsquis und Picadilly in New Brunswick, Kanada [nach Roulston 1995, /852/; Roberts 2001, /843/; modifiziert]

a Firstenstoßbau mit Versatz

Im Firstenstoßbau mit Versatz sind die Abbaukammern bis zu 120 Meter hoch und 900 Meter lang. Die Abbaukammern werden vertikal durch Kopf- und Fußstrecken begrenzt, welche durch Rampen im Steinsalz verbunden werden. Je eine Förder- und Versatzrampe grenzen die Kammern ein. Die Gewinnung erfolgt schneidend mittels Teil- oder Vollschnittmaschine. Der erste Schnitt wird an der Sohle der Kammer angesetzt und anschließend der entstandene Hohlraum versetzt. Auf dem eingebrachten Versatz wird als neue Sohle der jeweils nächste Schnitt angesetzt. Das geschnittene Haufwerk wird per Förderband über die Förderrampe in die Förderstrecke (Kopfstrecke) und von dort zum Schacht transportiert. Das Versatzmaterial wird ebenfalls per Förderband über die Versatzrampe in die Kammer transportiert. Die Abbauhohlräume im Bereich des Kalilagers werden dabei komplett mit halitischen Aufbereitungsrückständen versetzt, was die verfahrenstechnische Voraussetzung für die Anwendung eines solchen Abbauverfahrens ist (Webb & Smith 2009, /1104/). Auf diese Interaktion zwischen dem verfahrenstechnisch erforderlichen Versatzeinbringen und der damit betriebenen Beseitigung fester Aufbereitungsrückstände wird in den Kapiteln 7 und 8 noch einmal eingegangen (▸Box 7.1).

Der Firstenstoßbau mittels Schneidender Gewinnung durch Teilschnittmaschinen kommt im kanadischen Kaliwerk New Brunswick von PCS zur Anwendung, wo seit 1983 auf der Nordflanke eines Salzstockes sylvinitische Rohsalze der *Cassidy Lake Formation* abgebaut werden. In diesem Kaliwerk werden neben der jährlichen Gewinnung von etwa 2,3 Millionen Tonnen Kalirohsalz auch etwa 0,7 Millionen Tonnen des Unteren Steinsalzes des Salzstockes abgebaut und verkauft. Hierfür werden sogenannte *Salt Stopes* als Langkammern im Kammerpfeilerbau mit einer Länge von 300 bis 460 Meter, einer Breite von 20 Meter und einer Höhe von 20 Meter söhlig aufgefahren. Die Aufbereitungsrückstände werden als Trockenversatz unter Tage in die Abbauhohlräume der Kalisalzgewinnung und als Spülversatz in die Abbauhohlräume der Steinsalzgewinnung eingebracht.

Das im Jahre 2014 in Betrieb genommene Bergwerk Picadilly auf der Südflanke des Salzstockes wird künftig ebenfalls Firstenstoßbau mit Versatz betreiben.

b Weitungsbau mit Versatz

Beim Weitungsbau mit Versatz werden ausgehend von Hauptsohlen und der im Steinsalz stehenden Wendel für jede Abbaukammer mehrere Teilsohlen aufgefahren. Beginnend mit der untersten Teilsohle wird das Rohsalz im strossenartigen Verhieb durch Bohren und Sprengen gewonnen. Die typischen Kammern sind 200 Meter hoch, 100 Meter lang und haben eine Strossenhöhe von jeweils 20 Meter. Ihre Breite richtet sich nach der jeweiligen Mächtigkeit des Kalilagers. Um die Standfestigkeit des Gebirges zu gewährleisten, bleiben Pfeiler mit 10 bis 12 Meter Breite stehen (Riesche 2004, /841/). Das Haufwerk wird in die unter den Kammern aufgefahrenen Trichter gesprengt und von dort in die Hauptförderstrecke abgezogen. Danach werden die hohen ausgesalzenen Abbauräume von der Versatzstrecke aus durch Rolllöcher mit Aufbereitungsrückständen verfüllt. Abbildung 41 zeigt schematisch die verschiedenen Phasen des Weitungsbaues mit Versatz von der Vorrichtung über den Abbau bis hin zum Versatz mit Aufbereitungsrückständen.

Der Weitungsbau mit Versatz als ein Abbauverfahren in der Steilen Lagerung kommt in Deutschland im Kalibergwerk Sigmundshall von K+S zum Einsatz.

5.1.1.4 Vergleich der Abbauverluste für die heute praktizierten Abbauverfahren der Flachen und der Steilen Lagerung

Im Hinblick auf die im Rahmen dieses Buches zur Rede stehende Ableitung eines Standes der Technik für die bergmännischen Gewinnungsmethoden bei der Kalidüngemittelproduktion ist eine vergleichende Analyse der angewendeten Methoden, Verfahren und Anlagen anhand solcher Kennziffern erforderlich, die Auskunft über die Nachhaltigkeit der Lagerstättennutzung geben. In Tabelle 14 ist die Bandbreite der tatsächlichen Abbauverluste[116] der einzelnen Abbauverfahren in Abhängigkeit vom jeweils abgebauten Kalisalzgestein, von der Teufe und von der Lagerstättenmächtigkeit dargestellt. Diese Zusammenstellung zeigt die relativ starke Abhängigkeit der Abbauverluste von der bauwürdigen Mächtigkeit und der Teufe des Kalilagers. Die Höhe der in situ Abbauverluste variiert dementsprechend stark zwischen 25 und 70 Prozent. Tabelle 14 zeigt auch, dass bei der Gewinnung von Carnallitit aufgrund seiner andersartigen geomechanischen Eigenschaften mindestens etwa 10 Prozent höhere Abbauverluste als im Sylvinit oder Hartsalz auftreten. Bei den Abbauverfahren für die Steile Lagerung sind mitunter höhere Abbauverluste in Kauf zu nehmen. Die Abbauverluste beim Kammerpfeilerbau mit quadratischen Pfeilern, wie er vorwiegend im deutschen Kalibergbau angewendet wird, liegen im weltweiten Vergleich im besseren Mittelfeld.

Der Kalibergbau war in seiner mehr als 150jährigen Geschichte schon aus ökonomischen Motiven stets bemüht, die Abbauverluste zu senken (Gimm 1961, /330/; Fulda 1965,

116 Hier handelt es sich um solche Kennziffern, wie sie für die einzelnen Abbauverfahren bei der industriellen Rohstoffgewinnung im langjährigen Regelbetrieb erzielt wurden, also nicht solcher im Planungsstadium, oftmals allein auf theoretischer Grundlage von optimistisch prognostizierten Kennziffern.

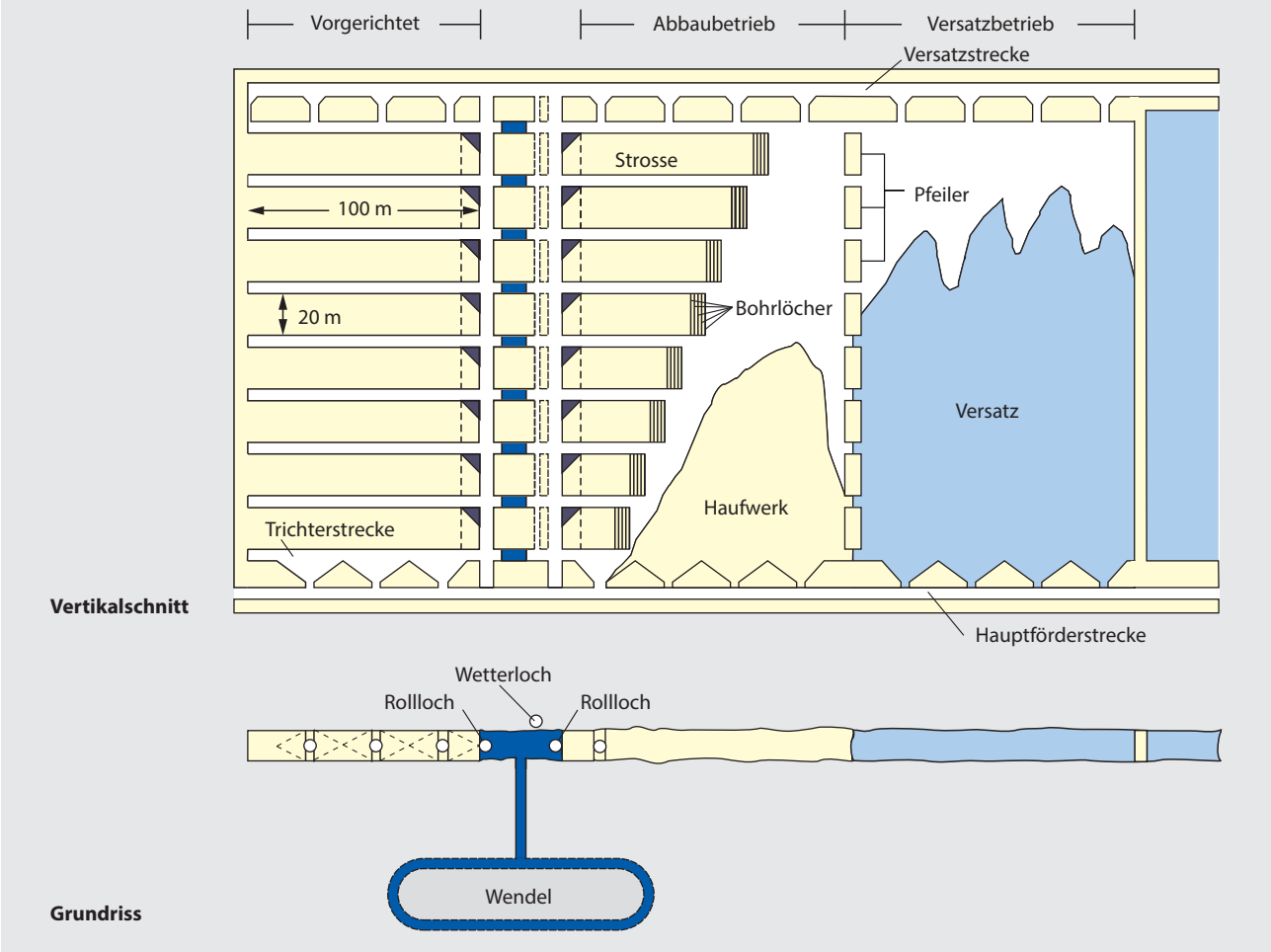


Abbildung 41 Aus- und Vorrichtung sowie Abbau- und Versatzführung im Weitungsbau mit Versatz in Steiler Lagerung im Kalibergwerk Sigmundshall von K+S, Deutschland [nach Riesche 2004, /841/; K+S 2012h, /484/, modifiziert]

/298/; Höfer, Fulda & Seidl 1967, /403/; Gimm & Sigmundt 1975, /333/; Böhnel, Menzel & Schreiner 1981, /113/; Miller 1983, /656/; Fulda, Jäger & Kutscha 1988, /303/; Roulston 1995, /852/; Michalzik 2001, /649/; Rauche, Fulda & Schwalm 2001, /813/). Dabei wurden einerseits verschiedene gebirgsmechanische Ansätze für die Dimensionierung der Tragelemente (im Wesentlichen dauerstandfeste versus nachgiebige Pfeiler) oder für zeitlich aufeinander folgende Gewinnungsphasen (Primär-, Sekundär- und Tertiärabbau) gewählt und andererseits relativ frühzeitig Untersuchungen zur Stützwirkung von Versatz angestellt, was bereits im Vorspann des Abschnittes 5.1 in seiner historischen Entwicklung beschrieben wurde. Die systematischen F/E-Arbeiten waren nun auf die Verbesserung der Stützwirkung von Versatz gerichtet, was vor allem durch eine gute Firstanbindung erreicht werden sollte, die sich im Routinebetrieb aber in vielen Fällen als problematisch erwies. Zum anderen wurden Versuche zum Rückbau standfest dimensionierter Pfeiler zwischen versetzten Langkammern durchgeführt, die ebenfalls dem Ziel der Senkung der primären Abbauverluste dienten. Letztere fanden dort statt, wo aufgrund der spezifischen lagerstättengeologischen und bergtechnischen Randbedingungen im Kammerpfeilerbau mit langen Pfeilern der Flachen Lagerung im Südharz-Kalirevier bereits seit den 1910er Jahren ein speziell für diese Verhältnisse modifiziertes Spülversatzverfahren zur Anwendung kam. In diesen Langkammerabbauen mit Schrapperförderung konnten durch den Pfeilerrückbau auch über mehrere Jahrzehnte gewisse ökonomische Effekte erzielt werden, die sich betriebswirtschaftlich vor allem durch die Konzentration der Betriebspunkte, das heißt eine geringere Verhiebsgeschwindigkeit im Abbaufeld, abzeichneten. Um aber in den 1970er Jahren die Wettbewerbsfähigkeit der mitteldeutschen Bergwerke zu erhalten, war es zwingend erforderlich, ebenfalls die anderenorts bereits ab etwa Mitte der 1960er Jahre erfolgreich eingesetzte leistungsstarke Großgerätetechnik auch im Südharz-Kalirevier zu etablieren. Um die Leistungsvorteile dieser Großgeräte auch tatsächlich nutzen zu können, wurde ein völlig anderer Grubenzuschnitt und eine Gewinnung im Kammerpfeilerverfahren mit quadratischen Pfeilern notwendig. Bereits durch diese veränderte Geometrie im Kammerpfeilersystem verbesserte sich die Ressourcennutzung deutlich (Sievers 1972, /932/; Duchrow & Schilder 1985, /213/; Fulda 1986, /299/;

Duchrow 1990, /212/; Michalzik 2001, /649/). Durch den anderen räumlichen Grubenzuschnitt waren aber dem Spülversatzeinbringen nunmehr erhebliche Grenzen gesetzt, da gravierende Probleme für die Arbeitsabfolge sowie für die Arbeits- beziehungsweise Bergbausicherheit erwartet wurden und auch tatsächlich auftraten. Nunmehr war ein sehr hoher Aufwand für zum Beispiel die Spülpunktvorbereitung und die Errichtung der Spülversatzdämme zu betreiben. Schwerwiegender war die Tatsache, dass aufgrund der für die Großgerätetechnik optimierten Feldesgröße nunmehr die maximale Verweildauer zwischen Gewinnungsphase und Versatzeinbringen nicht mehr einzuhalten und mit dem verspäteten Versatzeinbringen insbesondere in Carnallititabbauen plötzliche Tragfähigkeitsverluste bis hin zu Gebirgsschlägen zu besorgen waren.

Tabelle 14 Vergleich der Abbauverluste für die einzelnen Abbauverfahren

Abbauverfahren	Abgebautes Kalisalzgestein	Abbauteufe [m]	Pfeilerbreite [m]	Kammerbreite [m]	Abbauhöhe [m]	Abbauverluste Panel/Abteilung
Kammerpfeilerbau mit langen Pfeilern[117]	Carnallitit	300 – 900	12 – 60	12 – 18	3 – 10	44 – 69
	Sylvinit/Hartsalz	300 – 900	8 – 38	12 – 18	3 – 10	34 – 60
Kammerpfeilerbau mit quadratischen bzw. rechteckigen Pfeilern[117]	Carnallitit	300 – 900	24 – 45	10 – 16	3 – 10	31 – 61
	Sylvinit/Hartsalz	300 – 1.300	18 – 30	12 – 18	3 – 10	23 – 50
Kuppenstrossbau	Carnallitit	900 – 1.150	100	25	25	71
Kuppenabbau	Carnallitit	900 – 1.100	104	35 – 45	50 – 90	60 – 70
Strebbruchbau	Sylvinit	750	100	250	2 – 5	29
Firstenstoßbau mit Versatz[118]	Sylvinit	400 – 700	bis 12	5 – 40	120 – 200	54
Weitungsbau mit Versatz	Sylvinit/Hartsalz	350 – 1.400	10 – 25	50 – 100	150 – 220	20 – 45

Wie bereits im historischen Abriss zur Entwicklung der Abbauverfahren beschrieben, fanden nach Einführung der Großgerätetechnik auch weiterhin kleinräumig betriebene Versuche zum Pfeilerrückbau noch bis in die 1980er Jahre im Bergwerk Bleicherode statt – hier aber vor allem mit der Zielstellung der Stabilisierung des K_2O-Gehaltes im Förderrohsalz (Vorspann des Abschnitt 5.1 zur historischen Entwicklung: Zeitraum 1970 bis etwa 1980) – wurden letztlich aber aufgrund der fehlenden Effektivität und vor allem der dabei auftretenden arbeits- und bergbausicherheitlichen Probleme nicht weiter verfolgt oder gar auf andere Bergwerke übertragen.

Insbesondere seitens der Öffentlichkeit wird die Möglichkeit des Pfeilerrückbaues für den deutschen Kalibergbau im Sinne einer nachhaltigeren Lagerstättennutzung, aber auch im Hinblick auf die Reduzierung der festen Aufbereitungsrückstände ins Gespräch gebracht, wobei nicht selten auf die wissenschaftlichen Publikationen über die Ergebnisse der damaligen F/E-Vorhaben speziell im Südharz-Kalirevier Bezug genommen wird (zum Beispiel Ruhmannseder 1955, /865/; Pforr & Michalzik 1966, /757/; Höfer, Fulda & Seidl 1967, /403/; Duchrow & Schilder 1985, /213/; Fulda, Jäger & Kutscha 1988, /303/). Dabei wird jedoch vielfach übersehen, dass keines der stets allein durch temporär geltende Sonderbetriebspläne zugelassenen, im kleinen Maßstab erprobten Versuchsverfahren seinerzeit derart positiv bewertet wurde, dass daraus ein industrietaugliches Verfahren zu entwickeln gewesen wäre. Gewissermaßen turnusmäßig werden solche Ansätze auch unter Würdigung

117 Die Abbauverluste im Kammerpfeilerbau mit langen beziehungsweise quadratischen Pfeilern wurden nach dem Dimensionierungsverfahren von Uhlenbecker (1978, /1036/) ermittelt.

118 Globaler Abbauverlust des Bergwerkes Penobsquis, New Brunswick, Kanada (PCS 2011a, /736/)

der heute bestehenden rohstoffwirtschaftlichen Rahmenbedingungen und auch der fortgeschrittenen technischen Möglichkeiten sowohl durch die Kaliproduzenten als auch ihre ingenieurtechnischen Berater überprüft (zum Beispiel Fulda, Jäger & Kutscha 1988, /303/; Baryakh 2001c, /70/; ERCOSPLAN 2007a, /241/). Bislang haben diese Prüfungen keine grundsätzlich anderen Einschätzungen zugelassen. Nach wie vor bestehen große Schwierigkeiten eines verfahrensgerechten Einbringens der Versatzmassen in horizontale Kammern. Darüber hinaus ist das Sammeln und der geordnete Abzug der aus dem Spülversatz austretenden Transportlösungen im betrieblichen Ablauf für die eingesetzte Großgerätetechnik problematisch (Fulda 1964, /297/; Höfer, Fulda & Seidl 1967, /403/; Michalzik 2001, /649/). Ferner bestehen Probleme hinsichtlich der Produktionsstabilität durch mögliche Störungen infolge des Spülversatzeinbringens und durch die Erhöhung der Verdünnung infolge des Beibrechens von verfestigtem Spülversatz bei der Pfeilerrückgewinnung. Neben diesen verfahrenstechnischen Problemen waren mit dem auf das Spülversatzeinbringen folgenden Rückgewinnen einzelner Pfeiler auch ein erhöhter Personalbedarf und erhöhte Betriebskosten aufgrund längerer Standzeiten der Feldesteile verbunden. Abgesehen von diesen arbeitsorganisatorischen, berg- und maschinentechnischen sowie den Problemen der Wirtschaftlichkeit eines Spülversatzbetriebes sind bis heute auch Fragen der Bergbausicherheit, besonders in Abbaufeldern mit Carnallititaufschluss, nicht hinreichend gelöst (Fulda 1963, /296/; Pforr & Michalzik 1966, /757/; Jendersie 1969, /454/; Lindloff & Klemmer 1999, /596/; Martens 2009, /621/). Insofern kann eine großflächige Anwendung parallel zum Gewinnungsbetrieb in der Flachen Lagerung nicht oder nur unter Hinnahme wirtschaftlicher Einbußen infolge einer verminderten Leistungsfähigkeit des Gewinnungsbetriebes realisiert werden.

Im kanadischen Kalibergbau wurden in Saskatchewan seit den 1960er Jahren gleichfalls umfangreiche Untersuchungen zur Reduzierung der Abbauverluste angestellt (▸Tabelle 15), die letztlich zum heute praktizierten *yield mining* führten. Hier konzentrierte man sich jedoch allein auf veränderte Kammerpfeilerarrangements. Der Rückbau nach dem Versatz von Aufbereitungsrückständen wurde zwar als Option untersucht, spielte hier jedoch aufgrund der lagerstättengeologischen und bergtechnischen Randbedingungen mit einer Ausnahme niemals eine Rolle (Baar 1977, /53/; Munroe 1986, /694/; Holcomb & Shields 1987, /408/; Sjaardema & Krieg 1987, /948/; Fordham 1988, /279/; Kaskiw, Morgan & Ruse 1989, /501/). Allein im Bergwerk Esterhazy K1/K2 wird zur Stabilisierung der durch Auflösungserscheinungen destabilisierten Zuflussbereiche Aufbereitungsrückstand eingesetzt (van Sambeck 1992, /1059/). In New Brunswick, im Osten Kanadas, in der Steilen Lagerung, wird hingegen Versatz eingebracht (MPC 1990, /683/) (▸Box 7.1).

Tabelle 15 Ausgewählte Abbauverluste bei der Bergmännischen Gewinnung fester Kalirohsalze in Saskatchewan, Kanada [nach MOSAIC 2012a, /681/; PCS 2011a, /736/; 2012, /738/]

Kalibergwerk		Abbauverluste ...	
		... im Panel/ Abteilung [%]	... im gesamten Kalibergwerk [%]
PCS			
Rocanville	Flache Lagerung	58	69
Cory	Flache Lagerung	65	73
Penobsquis	Steile Lagerung	–[119]	54
MOSAIC			
Esterhazy K1/K2	Flache Lagerung	45	73

119 Für das im Kalibergwerk Penobsquis angewendete Abbauverfahren Firstenstoßbau mit Versatz ist eine Angabe zu den Abbauverlusten in den Abteilungen nicht sinnvoll anzuwenden.

5.1.2 Soltechnische Gewinnung von festen Kalirohsalzen

Von den weltweit insgesamt 69 Standorten, an denen im Jahr 2014 im planmäßigen industriellen Betrieb Rohstoffe für die Kalidüngemittelproduktion gewonnen wurden, nutzen 5 Standorte die Soltechnische Gewinnung von festen Rohsalzen für die Erzeugung wertstoffhaltiger technischer Lösungen (▸Tabelle 16).

Tabelle 16 Standorte der Kalidüngemittelproduktion weltweit, an denen Soltechnische Gewinnung fester Kalirohsalze betrieben wird (▸ Tabelle 1)

Produzent/ Standort[5]	Rohsalz	Solprozess findet statt in ...
PCS		
Patience Lake	Sylvinit	... abgesoffenem/ geflutetem Bergwerk
MOSAIC		
Belle Plaine	Sylvinit	... Solkavernen, die von Vertikalbohrlöchern aus entwickelt werden
Hersey	Sylvinit	... Solkavernen, die von Vertikalbohrlöchern aus entwickelt werden
INTREPID		
Moab	Sylvinit	... abgesoffenem/geflutetem Bergwerk und in Solkavernen, die von Horizontalbohrlöchern aus entwickelt werden
DEUSA		
Kehmstedt/ Bleicherode	Carnallitit	... Solkavernen, die von Vertikalbohrlöchern aus entwickelt werden

Neben der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Bergmännischen Gewinnung spielt die Soltechnische Gewinnung von Kalirohsalzen (▸Abbildung 42) insbesondere bei Lagerstätten eine Rolle, die mit bergmännischen Abbauverfahren nicht zu erschließen sind. Das betrifft zum Beispiel sehr tief gelegene Lagerstätten mit erhöhter Gebirgstemperatur, wo letztlich aus Kostengründen untertägiger Abbau nicht zur Anwendung kommen kann. Ferner findet die Soltechnische Gewinnung in abgesoffenen oder gefluteten, ehemals zur Bergmännischen Gewinnung angelegten Bergwerken Anwendung.

Die weltweit größte soltechnische Gewinnungsanlage Belle Plaine, Saskatchewan, Kanada, von MOSAIC, (▸Abbildung 43a) wurde in den 1960er Jahren als weltweit erste Anlage zur Soltechnischen Gewinnung von Sylvinit geplant und in der Folgezeit stufenweise auf- und ausgebaut (Jackson & Liebe 2005, /446/; Nancy 2012, /700/). Im Jahr 2013 produzierte das Kaliwerk Belle Plaine etwa 2,1 Millionen Tonnen Kalidüngemittelprodukte. Belle Plaine ist damit die größte, heute existierende Anlage zur Soltechnischen Gewinnung von Sylvinit und verfügt über eine Kapazität, die der von modernen Kaliwerken mit Bergmännischer Gewinnung fester Rohsalze gleichkommt. Sie ist daher Vorbild für zahlreiche *greenfield* Projekte, darunter auch für das Legacy Projekt von K+S POTASH CANADA, einem in Kanada registrierten Unternehmen der K+S Gruppe (Werdelmann et al. 2012, /1113/).

MOSAIC betrieb außerdem in Hersey, Michigan, USA, bis 2014 eine weitere Anlage zur Soltechnischen Gewinnung von Sylvinit[9], die allerdings mit einer Kapazität von nur 100.000 Jahrestonnen Fertigprodukt deutlich kleiner ist. Eine ebenfalls um Größenordnungen kleinere Anlage wurde in den 1970er und 1980er Jahren am Standort Kehmstedt/Bleicherode, Thüringen, Deutschland, für die Soltechnische Gewinnung von Carnallitit entwickelt (▸Box 5.4). Dort produziert das mittelständische Unternehmen DEUSA derzeit jährlich etwa 80.000 Tonnen KCl (▸Abbildung 43b).

Alle anderen Anlagen, in denen mit Hilfe von Solprozessen feste Kalisalze aus dem geologischen Untergrund herausgelöst werden, wurden ursprünglich nicht für diese Gewinnungsmethode konzipiert. Das von PCS betriebene Kaliwerk Patience Lake in Saskatchewan, Kanada, ist ein ehemaliges Kalibergwerk, in dem Salzlösungszuflüsse auftraten und das infolge dieser im Jahre 1987 aufgegeben und geflutet wurde (Gendzwill & Martin 1996, /319/; Mackintosh & McClung 2000, /613/; Maas 2003, /611/). Heute wird das geflutete Bergwerk zur Gewinnung von Produktionslösungen genutzt. Die Produktionskapazität vom Kaliwerk Patience Lake liegt heute bei etwa 300.000 Tonnen KCl im Jahr (Moore et al. 2011, /679/; PCS 2011a, /736/; 2012, /738/). Nahe Moab, Utah, USA, betreibt INTREPID mit dem gefluteten ehemaligen Sylvinitbergwerk Moab eine vergleichbare Produktionsanlage (▸Abbildung 44), die jedoch eine geringere Kapazität von etwa 110.000 Tonnen KCl besitzt (Jackson 1973, /445/; Harvey et al. 2006, /374/; INTREPID 2013, /439/; 2014, /440/).

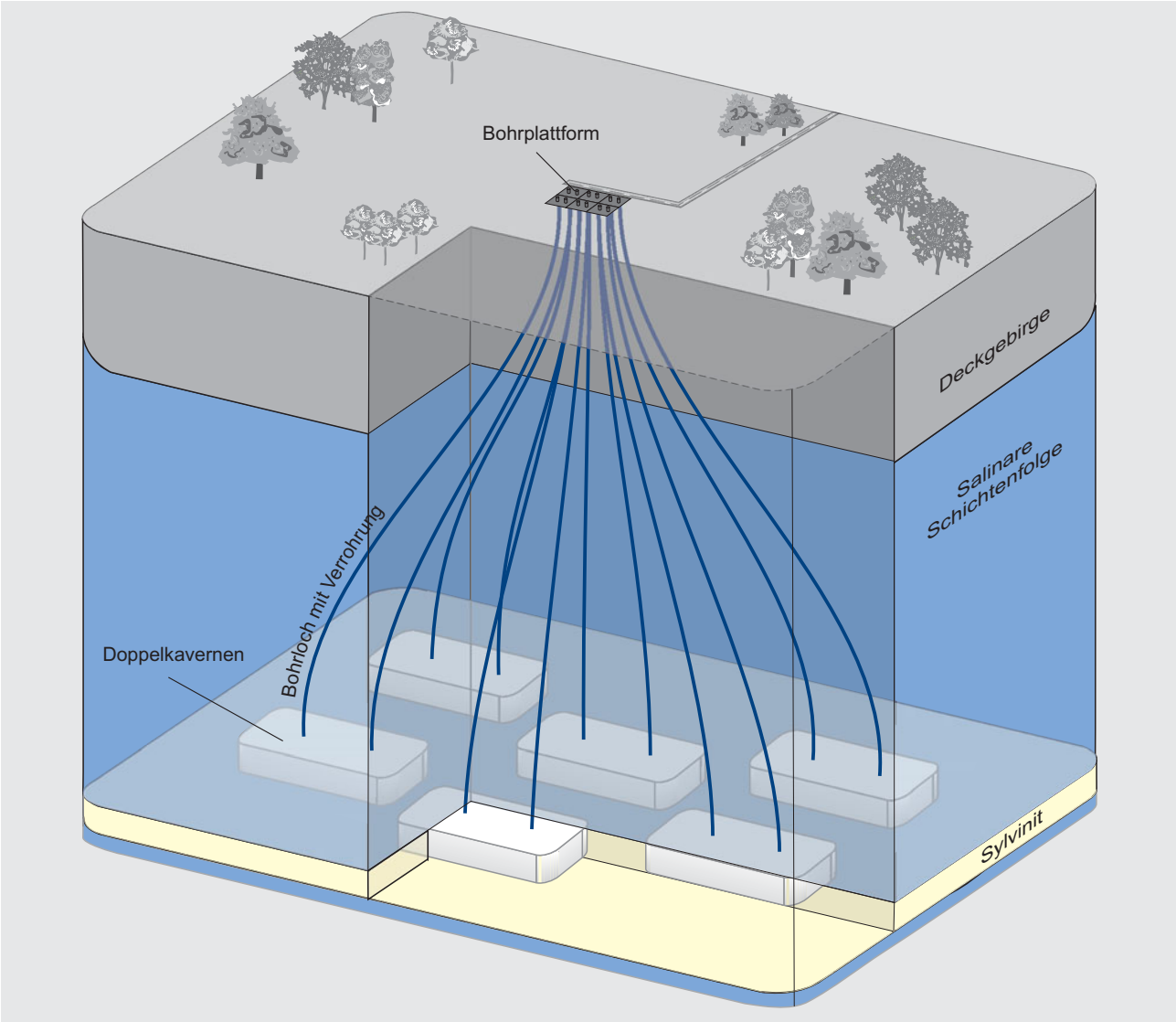


Abbildung 42 Soltechnische Gewinnung fester Kalirohsalze aus dem geologischen Untergrund in mehreren hexagonal angeordneten Doppelkavernen, die durch Richtbohrtechnik von einer Bohrplattform aus erschlossen werden

Technisch erfordert die Soltechnische Gewinnung von Kalirohsalzen in jedem Fall zunächst das Abteufen von Bohrungen in das Kalisalzlager, respektive in die lösungserfüllten Abbauhohlräume des ehemaligen Kalibergwerkes. Die Bohrungen werden entsprechend den standortspezifischen geologischen Gegebenheiten verrohrt und zementiert, vornehmlich um Kurzschlüsse mit dem/den Grundwasserstockwerk/en zu vermeiden. Bei tiefen Lagerstätten, zum Beispiel in Saskatchewan, Kanada, kommen dabei zunehmend auch moderne Verfahren der Richtbohrtechnik zum Einsatz. Stand der Technik stellt unter bestimmten lagerstättengeologischen Rahmenbedingungen der Aufschluss mehrerer Kavernen von einer Bohrplattform aus dar (▸Abbildung 42). Als technisch besonders anspruchsvoll und in der solenden Gewinnung von Kalisalzen noch nicht praktiziert, gestaltet sich der Aufschluss mehrerer Kavernen über nur einen gemeinsamen Vertikalbohrstrang, aus welchem durch mehrere Ablenkungen in entsprechender Teufe die einzelnen Kavernen aufgeschlossen werden. In die Verrohrung werden in der Regel 2 konzentrisch ineinander hängende Rohrleitungen, die sogenannten Solstränge, eingebaut. Durch einen der beiden Solstränge wird Frischwasser oder vorkonzentrierte Salzlösung als Lösungsmittel, das sogenannte *solvent*[120], injiziert.

120 Obgleich der aus dem Lateinischen entlehnte Begriff des *solvent* aus der angelsächsischen auch in deutsche Fachliteratur übernommen wurde, soll zum besseren Allgemeinverständnis im Folgenden zugunsten des Begriffes Lösungsmittel auf seine Nutzung verzichtet werden.

BOX 5.4

Soltechnische Gewinnung von Carnallitit: Eine Innovation aus Mitteldeutschland

Inspiriert durch die industrielle Anwendung der Soltechnischen Gewinnung von Steinsalz bei der Errichtung von Speicherkavernen für die Öl- und Gasindustrie, aber auch schon in Kenntnis der frühen Versuche zur Soltechnischen Gewinnung von Sylvinit in Kanada, entstanden auch im KALI-INGENIEURBÜRO Erfurt, dem späteren Direktionsbereich Projektierung des ostdeutschen Kalidüngemittelproduzenten VEB Kombinat KALI und der Vorgängerinstitution von ERCOSPLAN, bereits Mitte der 1960er Jahre erste technologische Konzepte zur Soltechnischen Gewinnung von Carnallitit, von denen einige auch zur Patentreife gebracht wurden. Diese wurden vor allem in den 1970er Jahren insbesondere in Zusammenarbeit mit dem Direktionsbereich Forschung in Sondershausen, aus dem nach der politischen Wende letztlich das Unternehmen K-UTEC hervorgegangen ist, und dem Kaliwerk Bleicherode bis hin zur industriellen Anwendung weiterentwickelt.


AMT FÜR ERFINDUNGS- UND PATENTWESEN
DER DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN REPUBLIK

Beschluß

PATENTSCHRIFT 53 054

PATENTSCHRIFT 134 665

Nach erfolgreichen Versuchen im Labor- und Technikumsmaßstab wurde im Jahr 1976 im Kalibergwerk Bleicherode eine kleintechnische in situ Versuchsanlage unter Tage in Betrieb genommen. Nachdem die grundsätzliche Beherrschbarkeit des Solprozesses in dieser Anlage nachgewiesen werden konnte, begann im Jahr 1980 der Aufbau einer Großtechnischen Versuchsanlage (GTVA) auf dem späteren Solfeld Kehmstedt, das bereits seit 1976 durch zahlreiche neue Bohraufschlüsse im Detail erkundet und infrastrukturell vorbereitet worden war. Die Premiere der Soltechnischen Gewinnung von Carnallitit erfolgte mit dem Beginn der ersten Breitsolphase am 30. November 1981 in der Bohrung Kehmstedt 102 und wurde mit der erfolgreichen Verbindung zweier Bohrlöcher zu einer Doppelkaverne am 07. Januar 1983 vollendet. Schon 2 Jahre später, Anfang 1985, begann der Heißsolbetrieb in der ersten Doppelkaverne und die Verarbeitung der dabei gewonnenen Produktionslösungen in der neu errichteten Aufbereitungsanlage der GTVA lief im Oktober 1988 zunächst im Probebetrieb an. Ab 17. Juli 1989 arbeitete die Pilotanlage im Dauerbetrieb.

Durch die politische Wende in Deutschland und die damit verbundene Konsolidierung der deutschen Kaliindustrie kam es nicht zur Errichtung der seinerzeit bereits in Planung befindlichen industriellen Produktionsstätten zur Soltechnischen Gewinnung von Carnallitit im Vorratsfeld Nohra-Elende. Nichtsdestotrotz ist die GTVA-Pilotanlage nach verschiedenen Eigentümerwechseln seit 1990 und nunmehr seit 2001 als DEUSA als Kalidüngemittelproduzent etabliert. DEUSA hat seit der Umfirmierung im Jahre 2001 wichtige Investitionen durchgeführt und die Produktionsanlagen wie auch das Produktportfolio auf diese Weise effizient weiterentwickelt und ist heute immerhin in der Lage, bis zu 120.000 Tonnen KCl pro Jahr auf Grundlage der in den 1960er Jahren entwickelten Konzepte zur Soltechnischen Gewinnung fester Carnallititressourcen zu produzieren.

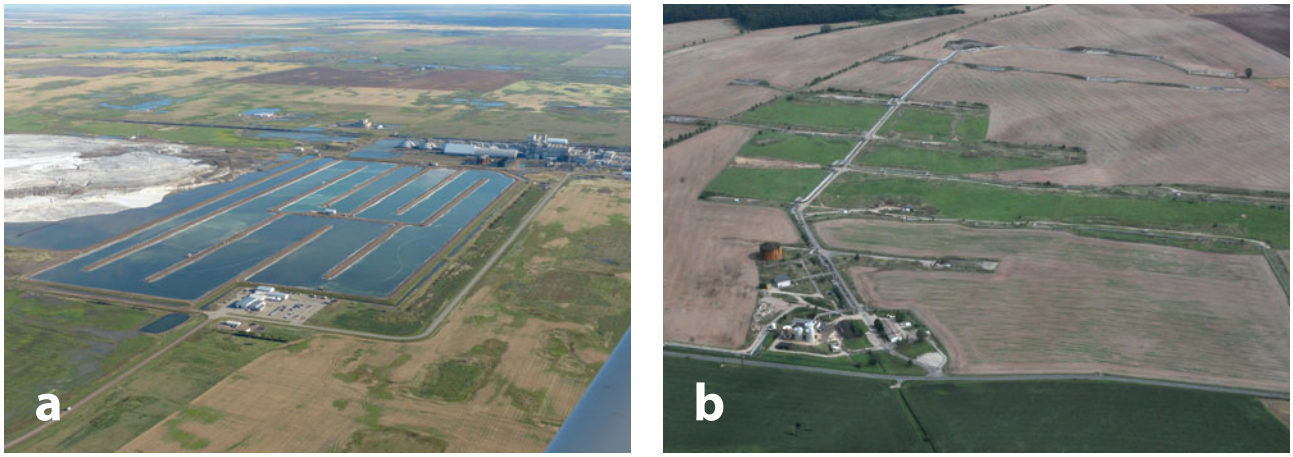


Abbildung 43 Anlagen zur Soltechnischen Gewinnung von Kalisalzen; a – Kristallisationsbecken und Aufbereitungsanlagen des Kaliwerkes Belle Plaine von MOSAIC, nahe Regina in Saskatchewan, Kanada; b – Solfeld der DEUSA in Kehmstedt in Thüringen, Deutschland; beides im Luftbild

Dieses Lösungsmittel löst die einzelnen Komponenten des Kalisalzgesteins entsprechend ihren unterschiedlichen Löslichkeiten auf und in der Kaverne entsteht als Ergebnis dieses Lösungsprozesses eine wertstoffhaltige technische Lösung, die für die Kalidüngemittelproduktion benötigt wird. Diese Produktionslösung[121] wird durch den zweiten Solstrang wieder zu Tage gefördert und über Rohrleitungen zur Aufbereitungsanlage transportiert. Mit wachsender Konzentration des Lösungsvolumens stellt sich eine Dichteschichtung ein, so dass im oberen Teil der Kaverne stets die geringer konzentrierten Lösungsanteile anstehen, was eine bevorzugt nach oben gerichtete Kavernenausbreitung zur Folge hätte. Da dies keine effektive Lagerstättennutzung erlaubt, wird mit Hilfe eines Sperrmittels, dem sogenannten *blanket*, ein bevorzugt horizontaler Lösefortschritt im Kavernenhohlraum provoziert. Das *blanket* ist ein nicht-salzlösendes Medium, zum Beispiel Rohöl, Propan, Butan, Stickstoff oder auch Pressluft, das leichter als die das Kavernenvolumen ausfüllende technische Lösung ist und daher über dieser, am hangenden Kontakt zum Wirtsgestein lagert und den vertikal nach oben gerichteten Lösungsfortschritt verhindert. Das Lösungsmittel wird üblicherweise über den äußeren Ringraum eingebracht.

Zwei alternative Verfahren gestatten die kontrollierte Entwicklung der Kavernenform:

- Das direkte Solverfahren: Hierbei wird durch das tiefer hängende Zentralrohr Lösungsmittel eingeleitet. Die entstehende Produktionslösung gelangt über das höher hängende, äußere Spülrohr nach über Tage.
- Das indirekte Solverfahren: Hierbei wird der Spülkreislauf umgekehrt, das heißt, durch den höher hängenden, äußeren Spülstrang wird das Lösungsmittel injiziert, die entstehende Produktionslösung wird durch den tiefer hängenden, inneren Strang nach über Tage gefördert.

Durch eine wechselnde Anwendung beider Solverfahren, durch die Veränderung der Rohrlängen und der Menge des *blanket* sowie der Solrate[122] und der Dauer der Solintervalle werden die gewünschte Kavernenform und -größe den technischen und wirtschaftlichen Vorgaben gemäß angenähert. Alle sicherheitsrelevanten gebirgsmechanischen, geologischen sowie hydrogeologischen Aspekte werden ähnlich wie bei der Bergmännischen Gewinnung durch maximale Kavernen- und minimale Pfeilervolumina vorgegeben und während des Solbetriebes mittels verschiedener Methoden turnusmäßig überwacht.

Das grundsätzliche Ziel der Soltechnischen Gewinnung von Kalisalzen besteht im Erreichen einer höchstmöglichen KCl-Konzentration in den Produktionslösungen. Daneben kann es erwünscht sein, selektiv nur – in der soltechnischen Praxis bevorzugt – die Wertstoffkomponente KCl aus dem Gesteinsverband zu lösen. Insbesondere dies erfordert eine Anpassung und oftmals auch eine laufende Optimierung der Zusammensetzung und der Fließraten des Lösungsmittelstromes an die spezifischen Randbedingungen einer Lagerstätte, insbesondere an Art und Menge der unterschiedlichen Begleitkomponenten im Rohsalz und auch an deren Verwachsungsgefüge.

121 Die Produktionslösungen werden im Folgenden auch technische Lösungen genannt, um solche Produktionslösungen von den natürlichen Lösungen zu unterscheiden.

122 Die Solrate beschreibt eigentlich den Lösefortschritt pro Zeiteinheit in der Kaverne, wird praktisch jedoch durch die Menge des injizierten Lösungsmittels pro Zeiteinheit bestimmt.

Dementsprechend müssen bei Planung und Betrieb des Solprozesses stets die sich einstellenden temperaturabhängigen Lösungsgleichgewichte berücksichtigt werden (Storck 1968, /983/; Meyer 1970, /646/; Podio 1974, /768/; Saberian 1981, /870/; 2003, /871/; Nigbor 1982, /710/; Duchrow et al. 1990, /214/; 1991, /215/; Grüschow & Saalbach 1990, /356/; Goor, Lin & Metcalfe 1992, /342/; Maia da Costa & Cabral de Melo 1992, /614/; Bieniawski & Bieniawski 1994, /102/; Grüschow 1994, /352/; 1998, /353/; Grüschow & Krumbein 1997, /354/; Mackintosh & McClung 2000, /613/; Maas 2003, /611/; Plosz 2004, /765/; 2005, /766/; Jackson & Liebe 2005, /446/; Freeman 2007, /289/; Halabura & Hardy 2007, /364/; Middleton 2011, /652/; Grüschow & Rembe 2012, /355/):

Die physikalisch-chemischen Grundlagen der Soltechnischen Gewinnung von Kalisalzen werden von der polymineralischen Zusammensetzung der Lagerstätte bestimmt. Bei der Auflösung von Kalisalzen in wässrigen Lösungen entstehen relativ komplex zusammengesetzte Salzlösungen (▸Abschnitt 6.1.2). Deshalb basiert jeder Aussolprozess auf den Lösungsgleichgewichten der in der Lagerstätte auftretenden Minerale und ihrer wässrigen Salzlösungen. Im Fall der Aussolung von sehr reinen Steinsalzlagerstätten kann eine solche Betrachtung vereinfachend im System $NaCl – H_2O$ vorgenommen werden. Am Aufbau der Kalirohsalze sind dagegen aber viel mehr Minerale beteiligt. Für die physikalisch-chemische Beschreibung ihrer Auflösung ist daher auch eine weitaus größere Anzahl von Variablen zu berücksichtigen. Für die konzeptionelle Planung des Solprozesses von Kalisalzlagerstätten müssen daher komplexere Systeme als für das Steinsalz bemüht werden. Im Falle von reinem Sylvinit ist das anzuwendende Lösungsgleichgewicht das ternäre System $KCl – NaCl – H_2O$. Im festen Kalirohsalz sind neben den bisher behandelten Salzen meist noch andere lösliche Salzkomponenten vorhanden, die auf die Löslichkeitsverhältnisse Einfluss nehmen. Besondere Bedeutung kommt hier dem $MgCl_2$ zu, dessen Einfluss auf die Lösungsgleichgewichte, Löslichkeiten und Lösegeschwindigkeiten außerordentlich groß ist. Wenn die Mineralzusammensetzung in den für die Aussolung näher zu betrachtenden Lagerstätten die Anwesenheit von Carnallit zeigt, ist mindestens die Anwendung des quaternären Systems $MgCl_2 – KCl – NaCl – H_2O$ zwingend erforderlich. Normalerweise tritt in Kalilagerstätten unter anderem auch anhydritische Gesteine auf, welcher die Komponente $CaSO_4$ in das Lösungssystem einbringt.

Erfahrungstatsachen beim Betrieb der Solkavernen belegen aber, dass die Lösungsgleichgewichte, Löslichkeiten und Lösegeschwindigkeiten in den Systemen $KCl – NaCl – H_2O$ beziehungsweise $MgSO_4 – MgCl_2 – KCl – NaCl – H_2O$ für praktische Zwecke in den meisten Anwendungsfällen hinreichend genau wiedergegeben werden.

Aus der konsequenten Anwendung der Lösungsgleichgewichte resultiert in der Praxis eine grundlegende Unterscheidung von 2 Verfahren der Soltechnischen Gewinnung von Kalisalzen, dem nichtselektiven und dem selektiven Solverfahren, die im Folgenden vorgestellt werden.

5.1.2.1 Nicht-selektives Solverfahren

Beim nicht-selektiven Solverfahren wird Wasser als Lösungsmittel verwendet. Wasser ist gegenüber allen chemischen Komponenten der Kalilagerstätte untersättigt, so dass die Auflösung aller Salzminerale gleichzeitig erfolgt. Der Konzentrationsanstieg der einzelnen Komponenten im Lösungsmedium wird im Wesentlichen durch die spezifischen Lösegeschwindigkeiten der einzelnen Minerale kontrolliert. Aufgrund der starken Differenz der Konzentration findet die Auflösung aber mit höherer Geschwindigkeit als beim selektiven Solen statt, was hohe Durchflussraten des Lösungsmediums bei Erreichen von hohen KCl-Gehalten ermöglicht.

Exemplarisch verdeutlicht wird dies in Abbildung 44, welche die Löslichkeiten von KCl und NaCl im relativ einfachen ternären System $KCl – NaCl – H_2O$ für verschiedene Temperaturen zeigt. Es handelt sich um eine Isothermendarstellung, das heißt, jeweils für bestimmte Temperaturen sind Konzentrationswerte dargestellt, die die maximale Löslichkeit des einen Salzes in Abhängigkeit der Konzentration des anderen Salzes widerspiegeln. Befindet sich das System auf der rot eingezeichneten Linie, ist die Lösung sowohl an KCl als auch an NaCl gesättigt. Die Isothermen oberhalb dieser Linie liegen im sogenannten NaCl-Feld; hier ist das System an KCl untersättigt. Die Isothermen unterhalb der roten Gleichgewichtslinie befinden sich im sogenannten KCl-Feld, in welchem eine NaCl-Untersättigung gegeben ist. Mittels solcher Isothermen ist es möglich, die Sättigungskonzentration einer Salzkomponente bei gegebener Konzentration der zweiten für eine bestimmte Temperatur zu ermitteln. Anhand der Darstellungen können Vorgänge bei Heißlöseverfahren oder beispielsweise Prozesse bei der nicht-selektiven Solung veranschaulicht werden. Es ist dadurch möglich, Vorhersagen über die gelösten beziehungsweise kristallisierten Salze für die Löseverfahren zu treffen.

Bei der Solung eines Kalisalzgesteins, welches Sylvin und Halit enthält, reichert sich die resultierende Lösung in der Kaverne zunächst sukzessive an NaCl und KCl an. Die Lösegeschwindigkeit wird maßgeblich von der Ausgangskonzentration der Lösung kontrolliert, die wiederum temperaturabhängig ist. Nach einer bestimmten Verweilzeit der Lösungen in der Solkaverne wird eine höhere Konzentration erreicht. Um den für eine spezifische Produktionskapazität erforderlichen Volumenstrom aus der Summe der Kavernen zu optimieren, wird eine möglichst hohe KCl-Konzentration der Produktionslösung angestrebt.

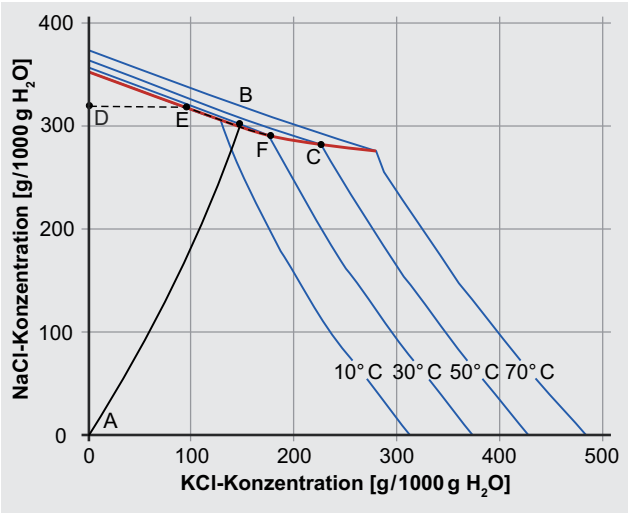


Abbildung 44 Entwicklung der Lösungskonzentrationen bei der nicht-selektiven Solung von Sylvinit, dargestellt im ternären System KCl-NaCl-H_2O mit Polythermen zwischen 10° C und 70° C

Ein solcher Löseprozess in der Kaverne wird in Abbildung 44 beispielhaft durch den Konzentrationspfad vom Startpunkt A zum Punkt B für eine Lagerstättentemperatur von 30°C dargestellt. Am Punkt B ist die Salzlösung leicht an NaCl übersättigt und an KCl untersättigt. Im Verlauf der Förderung ist eine (signifikante) Abkühlung der Produktionslösung zu vermeiden, um eine unerwünschte KCl-Kristallisation in den vertikalen Rohrsträngen in der Bohrung und in den Rohrleitungen auf dem Solfeld auszuschließen. Deshalb ist eine Lösungszusammensetzung, wie zum Beispiel in Punkt C gegeben, für den praktischen Betrieb nicht zwangsläufig besser: Im Vergleich zu Punkt B besitzt diese Lösung auf der 50°C-Isotherme zwar eine deutlich höhere KCl-Konzentration und transportiert somit pro Volumeneinheit deutlich mehr KCl, allerdings ist sie an KCl gesättigt, was im anschließenden Förderprozess schneller zu den oben genannten Problemen führen kann.

Die Abbildung 44 verdeutlicht auch, dass ein Solprozess bei höherer Temperatur im Hinblick auf den KCl-Inhalt der Produktionslösung prinzipiell vorteilhafter ist. Deshalb kommt der Lagerstättentemperatur als einer wichtigen, naturgegebenen Einflussgröße für die Wirtschaftlichkeit der Soltechnischen Gewinnung wesentliche Bedeutung zu.

Eine Temperaturerhöhung des Lösevorganges wird in Grenzen aber auch durch eine Vorwärmung des Lösungsmittels möglich. Da dies jedoch einen erheblichen Energieverbrauch erfordert, kann eine Lösungsmittelvorwärmung überall dort ökonomisch und ökologisch sinnvoll sein, wo Abwärme aus anderen Aufbereitungsprozessen nachgenutzt werden kann. Diese Abwärme steht immer mit dem Einsatz einer Eindampf- und Kühlkondensation im Aufbereitungsprozess zur Verfügung.

5.1.2.2 Selektives Solverfahren

Beim selektiven Solverfahren wird eine vorkonzentrierte Salzlösung als Lösungsmittel verwendet. Diese Lösung besteht bei der Carnallititsolung am Standort Bleicherode/Kehmstedt, Thüringen, Deutschland, in der Regel aus einer Mischung von Frischwasser und Lösungen aus dem Aufbereitungsprozess. Sie weist eine hohe Konzentration an $MgCl_2$ und demzufolge eine geringere Konzentration anderer Salzkomponenten auf. Dies bietet 2 Vorteile:

- Zum einen gehen aufgrund des hohen $MgCl_2$-Gehaltes geringere Mengen an Halit und eventuell vorhandener anderer Komponenten (Sulfate) in Lösung, so dass diese unerwünschten Nebengemengteile als fester Rückstand in der Kaverne verbleiben.
- Zum anderen enthalten die verwendeten Lösungen aus dem Aufbereitungsprozess noch geringere Anteile an KCl, die somit wieder in den Aufbereitungskreislauf zurückgeführt werden.

Mit einem anderen Hintergrund kann ein mit NaCl vorkonzentriertes Lösungsmittel bei der Sylvinitsolung zur Anwendung kommen: Ist das Lösungsmittel schon an NaCl gesättigt, kommt es unter Aufnahme von KCl zur Ausfällung von NaCl. Die an NaCl vorgesättigte Lösung (▸Abbildung 44 Punkt D) wird bevorzugt noch Sylvin auflösen und unter Ausfällen von NaCl wird in der Lösung KCl angereichert, bis die Gleichgewichtslinie in Punkt E (▸Abbildung 44 gestrichelte Linie) erreicht ist. Der Sylvin-Lösungsprozess und die NaCl-Ausfällung wird langsam weitergehen, bis die Gleichgewichtszusammensetzung bei der Lagerstättentemperatur erreicht ist (▸Abbildung 44 für 30°C Gebirgs-/Kavernentemperatur dargestellt mit Punkt F). Soweit diese NaCl-Abscheidung großräumig in der gesamten Kaverne geschieht und nicht nur auf den Injektionsbereich beschränkt bleibt, kann dieser Effekt ebenfalls zur selektiven Wertstoffförderung aus dem Kavernenvolumen beitragen und eine Verminderung der NaCl-Aufbereitungsrückstände bewirken.

Grundsätzlich ist das Lösungsmittel im selektiven Solverfahren aufgrund der Vorkonzentration allerdings weniger reaktiv als im nicht-selektiven Verfahren. Dies erlaubt daher nur geringere Solraten und benötigt einen höheren Durchsatz, um das gleiche Volumen an KCl zu lösen, was in der Regel zu einer wesentlich größeren Zahl von gleichzeitig zu betreibenden Kavernen im selektiven Solbetrieb führt. Diese erforderliche höhere Anzahl an Kavernen führt beim selektiven Solprozess auch zu höheren Aufwendungen für ein an die höheren Volumenströme angepasstes Pumpen- und Rohrleitungssystem. Nichtsdestotrotz weist das selektive Solverfahren gegenüber dem nicht-selektiven Solverfahren wesentliche Vorteile auf, so dass es für eine Vielzahl von Anwendungsfällen die wirtschaftlichere Variante darstellt, zumindest soweit man für diese Betrachtungen längere Betriebszeiträume einer Anlage berücksichtigt.

Besonders für die Carnallititsolung kommt der Vorteil einer zumindest für Teilmengen möglichen Wiederverwertung der flüssigen Aufbereitungsrückstände hinzu.

Abhängig von der Ausbildung des Gefüges der im Gewinnungshorizont anstehenden Kalisalzgesteine beziehungsweise auch der Lagerungsverhältnisse könnte jedoch auch das nicht-selektive Solverfahren deutliche Vorteile hinsichtlich des KCl-Ausbringens bieten. Durch die Auflösung von Halit können auch Kalium-Minerale vom Lösungsmittel erreicht werden, die von Halit nahezu vollständig umschlossen sind. Zum anderen ist eine deutlich größere laterale Ausbreitung des Lösungshohlraums möglich, was eine Anwendung dieser soltechnischen Gewinnungsmethode für geringmächtige Kaliflöze auch mit hohen KCl-Gehalten möglich macht (Standort Moab, Utah, USA).

Im praktischen Betrieb der Soltechnischen Gewinnung von festen Kalirohsalzen aus dem geologischen Untergrund findet die Kavernenentwicklung in mehreren Phasen statt. Dabei sind 4 hinsichtlich der gewonnenen Lösungsmedien und auch in ihren technischen Abläufen verschiedenartige Solungsphasen zu unterscheiden. Nachfolgend sollen diese für das Beispiel der Entwicklung einer Doppelkaverne zur Gewinnung in zwei Abbauhorizonten exemplarisch skizziert werden (▸ Abbildung 45): Mit der sogenannten Sumpfsolung erfolgt eine initiale Raumschaffung im unmittelbaren Liegenden des Gewinnungshorizontes beziehungsweise in dessen tiefsten Teilen durch einen nicht-selektiven Solprozess in den später zu verbindenden Einzelkavernen (Phase 1). Anschließend werden diese Einzelkavernen in einer sogenannten Breitsolphase im unteren Abschnitt des Gewinnungshorizontes durch einen ebenfalls nicht- oder nur wenig selektiven Solprozess horizontal erweitert und letztlich miteinander verbunden (Phase 2). Diese beiden Phasen liefern noch keine verwertbare Produktionslösung, sondern NaCl-reiche Lösungen. Nachdem die beiden Einzelkavernen zu einer Doppelkaverne vereinigt sind, kann die Produktionssolung im unteren Abbauhorizont beginnen (Phase 3). Wie bei der Sumpf- und Breitsolung auch, werden die vertikal nach oben gerichteten Solfortschritte durch das *blanket* kontrolliert, so dass je nach Mächtigkeit der Abbauhorizonte eine Vielzahl einzelner Ziehstufen der inneren Rohrtour und eine Perforation der äußeren Rohrtour zur Einstellung des *blankets* erforderlich sein können. Mit dem Erreichen der Hangendgrenze der bauwürdigen Kalium-Mineralisation im unteren Abbauhorizont werden die Rohrtouren mit Packern verpfropft. Die höheren Abschnitte der Rohrtouren im oberen Abbauhorizont müssen nun perforiert werden, so dass das Lösungsmittel auch Gesteinskontakt erhält und der Solprozess im oberen Abbauhorizont beginnen kann (Phase 4).

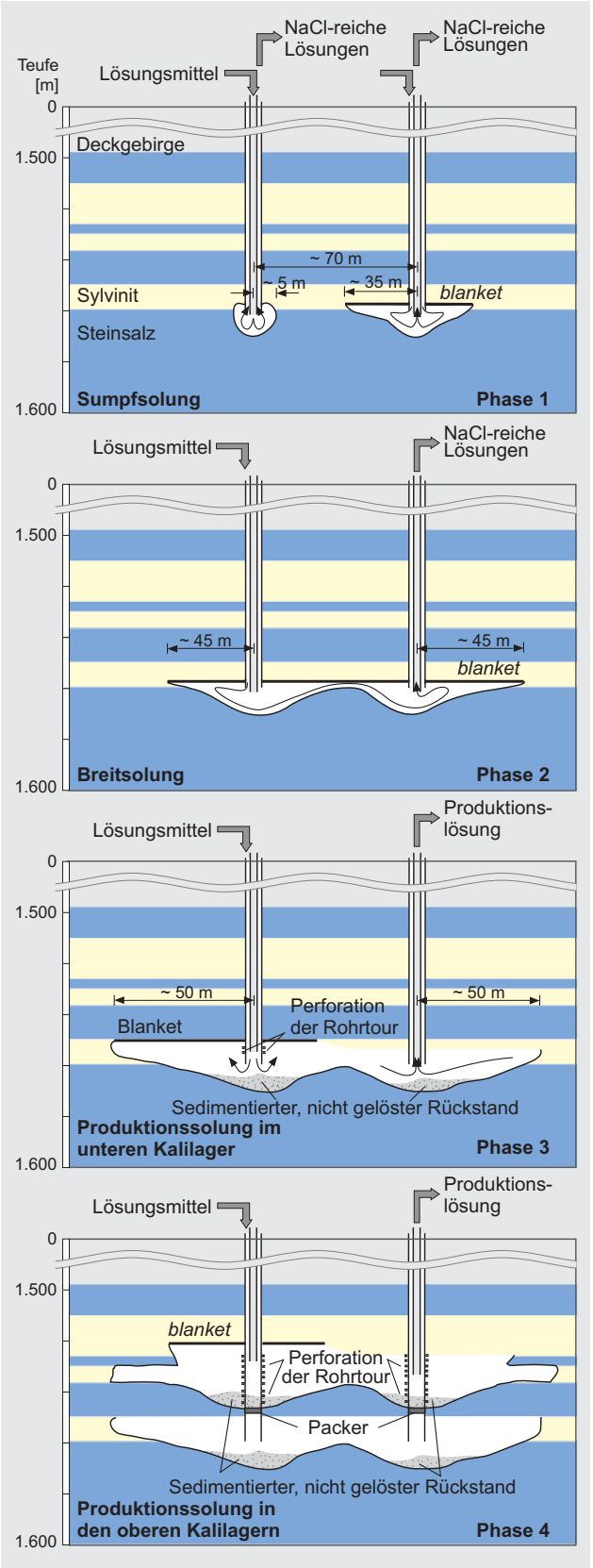


Abbildung 45 Entwicklungsphasen Sumpfsolung, Breitsolung und Produktionssolung in einer Doppelkaverne zur Gewinnung fester Kalirohsalze aus zwei Abbauhorizonten

In der Regel sind auch hier wiederum beide, die Produktionssolung vorbereitende Phasen, mindestens aber eine erneute Breitsolung erforderlich. Durch das weitere schrittweise Anheben des Blanketniveaus und die Anpassung der Teufe der inneren Rohrtour wird der Solprozess bis an die hangende Bauwürdigkeitsgrenze des oberen Abbauhorizontes fortgeführt.

In Saskatchewan, Kanada, und in Utah, USA, findet das selektive Solverfahren für Sylvinit Anwendung (▸STANDORT-STECKBRIEFE in Kapitel 10). In Saskatchewan wird es wegen der dort sehr spezifischen klimatischen Randbedingungen (▸Abschnitt 4.3), aber auch für eine nachhaltigere Nutzung der dort sehr wertstoffhaltigen Sylvinite in 2 Solphasen betrieben: Einer weniger selektiven Primärphase folgt eine selektive Sekundärphase mit sehr langer Verweildauer des vorkonzentrierten Lösungsmittel in der nahezu vollständig entwickelten Kaverne. Letztere Phase wird als sogenanntes *secondary mining* bezeichnet. Es wird dabei angestrebt, das Lösungsmittel so lange in der Kaverne zu belassen, bis es nahezu an KCl gesättigt ist. Die dabei gewonnene Produktionslösung wird dann in Abkühlbecken eingeleitet, wo während der kalten Wintermonate sehr reines KCl auskristallisiert (▸Abschnitt 6.2). Die noch immer an KCl reiche Rückstandslösung dieser natürlichen Tiefkühlkristallisation wird wieder in die Solkavernen zurückgeführt, wo sie durch die Lagerstättentemperatur erneut aufgeheizt wird und neue KCl-Fracht aufnehmen kann.

Die Abbauverluste bei der Soltechnischen Gewinnung fester Kalirohsalze liegen grundsätzlich in der gleichen Dimension wie bei der Bergmännischen Gewinnung, jedoch in aller Regel wegen geringerer erforderlicher Sicherheitskoeffizienten um wenige Prozentpunkte besser. Auch bei der Soltechnischen Gewinnung hängen sie neben den spezifischen geomechanischen Eigenschaften des gewonnenen Kalisalzgesteins vor allem von der Teufe ab. Für den hier dargestellten Referenzfall liegen sie zwischen 66 und 70 Prozent.

In einigen Fällen wird mindestens ein Teil der festen und flüssigen Aufbereitungsrückstände nach Erreichen der finalen Kavernenausdehnung in die ausgesalzenen Kavernen, respektive ehemaligen Grubenhohlräume zurückgeführt. Dies erfolgt auch mit der Motivation zur umweltschonenden Beseitigung von Rückständen, vor allem aber mit dem Ziel einer optimalen Nutzung des Lösungsvolumens (▸Abschnitt 8.1.1), indem die Rückstände einen Teil der dann im finalen Kavernenvolumen befindlichen Lösungen verdrängen und für die KCl-Produktion nutzbar machen. Dennoch war der Aspekt einer einfachen und auch umweltschonenden Beseitigung der flüssigen $MgCl_2$-Rückstände in die Kavernenhohlräume eines der Motive für die Entwicklung der Carnallitit-Solung im ehemaligen Südharz-Kalirevier in Mitteldeutschland. Für die chemische Zusammensetzung des dort anstehenden Carnallitit wurde theoretisch abgeschätzt (Döring 2005, /207/), dass alle flüssigen Aufbereiungsrückstände in die Volumina der Kavernen beseitigt werden können, wenn eine Eindampfung der Mutterlauge auf eine Konzentration von 8 bis 10 Molen Wasser pro Mol $MgCl_2$ erfolgt. Der erforderliche Bedarf an thermischer Energie, um die $MgCl_2$-Konzentration in den zu beseitigenden Lösungen also auf mindestens 430 bis über 460 Gramm pro Liter zu erhöhen, lässt aber die wirtschaftliche Machbarkeit einer solchen ausschließlichen Beseitigung in die Kavernenhohlräume scheitern.

5.2 Gewinnung von natürlichen wertstoffarmen Lösungen an oder nahe der Erdoberfläche

Von den weltweit insgesamt 69 Standorten, an denen im Jahr 2014 im planmäßigen industriellen Betrieb Rohstoffe für die Kalidüngemittelproduktion gewonnen wurden, nutzen 29 Standorte natürliche, gering wertstoffhaltige Lösungen, die in Oberflächengewässern, sogenannten Salzseen, oder aber als Porenwässern in oberflächennahen Grundwasserleitern gespeichert sind (▸Tabelle 17).

Tabelle 17 Standorte der Kalidüngemittelproduktion weltweit, an denen natürliche wertstoffarme Lösungen als Rohstoffe für die Kalidüngemittelproduktion genutzt werden(▸ Tabelle 1)

Produzent/Standort[5]	Rohstoffquelle
CHINA	
Mindestens 24 Standorte unterschiedlichster Größe	Salzseen in den Qinghai und Xinjiang Provinzen, China
DSW	
Dead Sea	Totes Meer, Israel
APC	
Safi	Totes Meer, Jordanien
SQM	
Salar de Atacama	Salar de Atacama, Antofagasta, Chile
INTREPID	
Wendover	Aquifere der *Bonneville Salt Flats*, Great Salt Lake, Utah, USA
COMPASS	
Great Salt Lake	Great Salt Lake, Utah, USA

Die von den in Tabelle 17 genannten Anlagen erzeugte Menge von Produkten entspricht etwas mehr mehr als einem Viertel der Weltkalidüngemittelproduktion.

Die älteste dieser Produktionsanlagen wird seit 1930 durch die heutige DSW, einem Tochterunternehmen der ICL, am Toten Meer betrieben (▸STANDORT-STECKBRIEFE in Kapitel 10). Hier werden die natürlichen Salzlösungen des Toten Meeres in einem System von Evaporationsbecken durch Verdunstung aufkonzentriert und über verschiedene Zwischenprodukte technisch weiter bis hin zu verkaufsfähigen Kalidüngemitteln verarbeitet (Kenat 1965, /514/; Garrett 1969b, /313/; 1996, /315/; Sonnenfeld 1992, /961/; 2000, /962/). Dabei wird das Seewasser des Toten Meeres, das einen ausgesprochen geringen K_2O-Gehalt von lediglich 0,7 Prozent aufweist, von dem tieferen nördlichen Becken in einem Kanal zum südlichen Becken gepumpt (▸Abbildung 46). Allein dieses südliche Becken nimmt eine Fläche von etwa 80 Quadratkilometer ein. Als Folge solarer Evaporation verdunsten hier etwa 50 Prozent des Wasservolumens, bevor die Lösungen in ein kleineres Beckensystem mit 12 und 6 km^2 Fläche eingeleitet wird, wo dann zunächst NaCl und $CaCl_2$ auskristallisieren. Die verbleibende Lösung wird in wiederum kleineres Becken von 2 bis 3 Quadratkilometer Größe eingeleitet und weiter eingedunstet, wobei neben weiteren Anteilen NaCl auch das Kalium-Mineral Carnallit kristallisiert. Dieser Carnallit dient als Ausgangsstoff für die weitere Kalidüngemittelproduktion. Er wird dort gemeinsam mit etwa 15 Prozent NaCl-Kristallisat und 80 bis 90 Prozent anhaftender Lösung von schwimmenden Saugbaggern aufgenommen und als Suspension zur Aufbereitungsanlage gepumpt, wo er zu KCl weiterverarbeitet wird. DSW hat 2013 aus der Salzlösung des Toten Meeres 3,39 Millionen Tonnen MOP produziert (▸STANDORT-STECKBRIEFE in Kapitel 10). Elementares Brom, Magnesium und NaCl werden als Nebenprodukte erzeugt.

Die Produktion von KCl im industriellen Maßstab begann 1952 mit dem Aufbau von Verdunstungsbecken auf 30 Quadratkilometer Marschland am südlichen Ende des Toten Meeres bei Sdom. Das seinerzeit größte Problem – was bis heute an beiden für die Kaliproduktion genutzten Küstenzonen des Toten Meeres Schwierigkeiten bereitet (Arkin & Gilat 2000, /26/; Baer et al. 2002, /56/; Closson et al. 2003, /163/; Closson 2005, /162/; Yechieli et al. 2006, /1148/; Filin et al. 2011, /273/) – waren Lösungsverluste über Karsthohlräume im Untergrund, die man durch den Einbau von lateralen Tondichtungen zu verringern versuchte. Später erweiterte man die Beckenfläche zunächst um weitere 100 Quadratkilometer. Mit dem Absinken des Seespiegels aufgrund des unzureichenden Nachflusses über den Jordan wurden weitere trockengefallene Areale in Evaporationsbecken umgewandelt, was wiederum eine Erhöhung der Produktion von DSW ermöglichte.

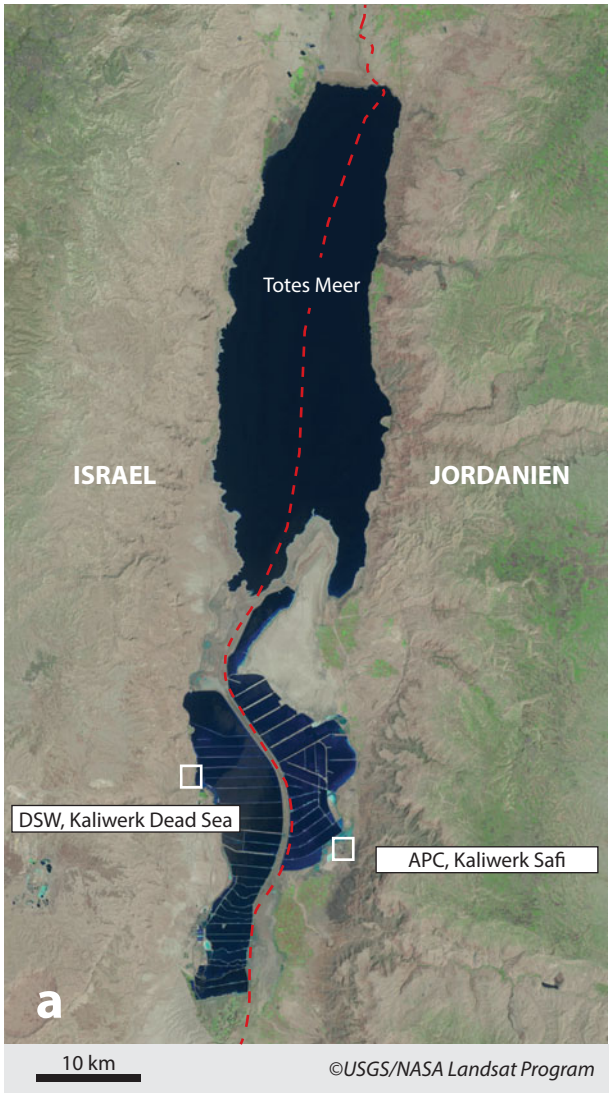


Abbildung 46 Anlagen zur Kalidüngemittelproduktion aus natürlichen Lösungen am Toten Meer: a – solare Evaporationsbecken am südlichen Ende des Toten Meeres im Satellitenbild; b –Evaporationsbecken von DSW im Luftbild; c – Aufbereitungsanlagen von DSW [Fotos b und c mit freundlicher Genehmigung von Josef Carrach, Be'er Sheva, Israel]





Auf der östlichen Seite des Toten Meeres, bei Safi, Jordanien, produzierte APC im Jahre 2013 1,7 Millionen Tonnen MOP (▸STANDORT-STECKBRIEFE in Kapitel 10). Hier werden als Nebenprodukte auch NaCl und Brom hergestellt (APC 2012, /25/). In sehr ähnlicher Weise wie bei DSW erfolgt auch am Standort Safi eine solare Evaporation der natürlichen Lösungen, so dass letztlich in 6 Becken, die gemeinsam eine Fläche von mehr als 30 Quadratkilometer einnehmen, die Kristallisation von Carnallit und Halit stattfindet. Dieser wird dann weiter zu Kalidüngemitteln aufbereitet.

Etwas andersartig gestaltet sich die Gewinnung der oberflächennahen Porenwässer in Playas und Sabkhas. Der Lösungsspiegel liegt hier in einigen Dezimetern bis wenigen Metern Tiefe, die wertstoffarmen Kalirohstoffe sind also für einen Gewinnungsprozess nicht unmittelbar an der Erdoberfläche verfügbar. Aus diesem Grunde wird in den oberflächennahen Playa- oder Sabkhasedimente ein System von Entwässerungsgräben angelegt (▸Abbildung 47), das zur Sammlung und zum Transport der Porenwässer hin zu einem zentralen Pumpensumpf oder aber direkt in Eindampfungsbecken dient. Auf diese Art wird zum Beispiel am Great Salt Lake in Utah, USA, wobei Ogden in der River Bear Bay seit 1968 und auf dem gegenüberliegenden westlichen Seeufer bei Clyman Bay seit 1990 eine Produktion von hauptsächlich sulfatischen Kalidüngemitteln mittels solarer Evaporation der natürlichen Lösungen des Great Salt Lake und der Porenwässer aus den an der Oberfläche anstehenden Evaporiten durch COMPASS durchgeführt (▸STANDORT-STECKBRIEFE in Kapitel 10).

In Wendover, am südlichen Rand des Great Salt Lakes, Utah, USA, werden die chloridischen Salzlösungen in einem 5 bis 7 Meter tiefen Grabensystem gesammelt und in dem von INTREPID betriebenen Werk zu Kalidüngemitteln aufbereitet. Auf einer Fläche von 365 Quadratkilometer wurden dazu Gräben von insgesamt etwa 200 Kilometer Länge angelegt. In einem ersten, mehr als 30 Quadratkilometer großen Evaporationsbecken wird die gesammelte Salzlösung vorkonzentriert. Die konzentrierte Lösung scheidet im Ergebnis der solaren Evaporation dann in einem etwa 2,2 Quadratkilometer großen Becken Kristallisate mit etwa 32 Prozent KCl aus. Nach der Entwässerung der Evaporationsbecken erfolgt die Ernte dieses feuchten Bodenkörpers mit speziellen Fahrzeugen. Das Kristallisat wird durch Flotation zu einem verkaufsfähigen Fertigprodukt verarbeitet.



Abbildung 47 Graben zur Drainage der Playasedimente und zur Sammlung sowie zum Transport ihrer wertstoffarmen Porenwässer für die Zuleitung in solare Eindampfbecken im *greenfield* Projekt Playa Khoor, Iran

Auf ähnliche Art gewinnt auch der chilenische Produzent SQM seit Ende der 1960er Jahre in der Atacama-Wüste in Nord-Chile K_2SO_4-mineralisierte Porenwässer aus oberflächennahen Evaporiten und verarbeitet diese vornehmlich zu SOP (▸STANDORT-STECKBRIEFE in Kapitel 10

In den vergangenen 3 Jahrzehnten entstanden darüber hinaus eine Reihe von kleineren Produktionsanlagen in den westchinesischen Provinzen Qinghai (Qīnghǎi) und Xinjiang (Sinkiang), heute zusammen genommen etwa 24 (▸STANDORT-STECKBRIEFE in Kapitel 10), die allesamt auf ähnliche Weise entweder sulfatische und/oder chloridische Kalidüngemittel produzieren. Obgleich an all diesen Standorten die Gewinnungsmethoden für die natürlichen Lösungen wie auch die Aufbereitungsverfahren auf die örtlichen Randbedingungen angepasst und daher im Einzelnen nicht miteinander vergleichbar sind, nutzen sie doch die gleichen grundlegenden Methoden zum Sammeln der natürlichen Lösungen und zur solaren Evaporation. An den westchinesischen Standorten kommt ebenfalls der natürlichen Kühlkristallisation Bedeutung zu (▸Abschnitte 5.3 und 7.2).

Die Nutzung natürlicher Lösungen als Rohstoff für die Kalidüngemittelproduktion ist ausnahmslos mit solarer Evaporation gekoppelt, so dass mindestens eine Vorkonzentration dieser ursprünglich sehr gering wertstoffhaltigen Ressourcen unter Ausnutzung der Sonnenenergie erfolgen kann (▸Abschnitt 7.3 und STANDORT-STECKBRIEFE in Kapitel 10). Anderenfalls wäre die Nutzung dieser Rohstoffe aufgrund der sehr hohen Energieaufwendungen wirtschaftlich nicht machbar. Je nach Lösungszusammensetzung werden hier vielfach weitere Bodenkörper der Kristallisationsabfolge als Nebenprodukte hergestellt und vermarktet.

Im letzten Jahrzehnt sind vermehrt Anstrengungen unternommen worden, natürliche wertstoffarme Playa- und Sabkha-Lösungen für die Mineralsalzgewinnung zu nutzen, wobei nicht allein die Erzeugung von Kaliprodukten, sondern vielfach auch die Herstellung von Lithiumkarbonat im Vordergrund standen. Auch dabei kommt der solaren Evaporation für die initiale Wertstoffanreicherung die herausragende Rolle hinsichtlich der wirtschaftlichen Machbarkeit und ebenso der ökologischen Nachhaltigkeit solcher Projekte zu. Hier werden auch vermeintlich rückstandsfreie Methoden und Verfahren vorgeschlagen, die bei einer Detailbetrachtung der Massen- und Volumenströme jedoch ebenfalls nicht frei von Überschusslösungen und/oder festen Rückständen sind (▸Box 5.5).

In porösen oder klüftigen Gesteinen des tieferen Untergrundes treten ebenfalls Salzlösungen auf, die interessante Kalium-Konzentrationen aufweisen, was aus der Kohlenwasserstoff-Exploration bekannt ist. Aufgrund des relativ hohen Aufwandes, der zu ihrer Förderung über Tiefbohrungen nötig wäre, besitzen solche Vorkommen heute und wohl auf absehbare Zeit keine wirtschaftliche Bedeutung.

In der Vergangenheit wurden auch technische Verfahren entwickelt, die eine Kristallisation von KCl – und anderen Nebenkomponenten, wie zum Beispiel Epsomit[123] – aus Meerwasser aufzeigen (Fernandez-Lozano 1973, /268/). All diese sind jedoch aufgrund der sehr hohen Energieaufwendungen – selbst bei Einsatz von Solarenergie – wirtschaftlich nicht vertretbar.

123 Epsomit ist ein hydratisiertes Magnesium-Mineral mit der chemischen Formel $MgSO_4 \times 7\ H_2O$

BOX 5.5

Das Hajipir Projekt: "Rückstandsfreie" Kalidüngemittelproduktion aus natürlichen wertstoffarmen Sabkha-Lösungen – Stand der Technik?

Aufbereitung wertstoffarmer, natürlicher Lösungen mittels klassischen Methoden und Verfahren, die dem Stand der Technik entsprechen

Ein ebenfalls im Zusammenhang mit einer vermeintlich rückstandsfreien Kalidüngemittelproduktion zitiertes Projekt ist das Hajipir Projekt der ARCHEAN CHEMICAL INDUSTRIES PRIVATE LIMITED (ACIPL). Dieses, seit mehr als einem Jahrzehnt in Diskussion stehende F/E-Projekt wird zur Zeit am Rann von Kachchh[124], einer Küstensabkha im Grenzgebiet Indien-Pakistan, in der indischen Provinz Gujarat entwickelt (ACIPL 2009, /11/; Sethuram 2012, /923/). Die etwa 28.000 Quadratkilometer große Sabkha wird hier saisonal zwischen Juli und September durch ein einfaches *flood water recharge* (Butler 1969, /140/) genährt, bei dem der Grundwasserspiegel durchschnittlich einen halben Meter über die Sedimentoberfläche ansteigt. Während der 6 Sommermonate erreichen die Tagesmitteltemperaturen vielfach 40° C, und mehr, wobei mehrere Wochen auch Tageshöchsttemperaturen über 50° C gemessen werden. Die damit verbundene hohe Verdunstungsrate erzeugt einen natürlichen, von der Evaporation angetriebenen Pumpprozess[125], der für einen raschen Entzug der Porenflüssigkeit in den supratidalen Sabkhasedimenten und zumindest saisonal auch zum unterirdischen Einströmen von Meerwasser in die Sabkha führt.

In den Teilen der Sabkha, wo der Austausch stagniert oder sehr stark verzögert abläuft, wurden höher konzentrierte Salzlösungen mit Dichten zwischen 1,20 und 1,25 Gramm pro Kubikzentimeter nachgewiesen. Das im Jahr 2002 durch das indische *Technology Information, Forecasting and Assessment Council* (TIFAC) angeregte Projekt wurde durch die indische Zentralregierung wie auch die Region Gujarat großzügig gefördert (TIFAC 2002, /1009/). Planungen der letzten Jahre zielen für eine 1. Phase auf eine jährliche Produktion von 100.000 Tonnen SOP sowie 2 Millionen Tonnen NaCl und einige Tausend Tonnen Brom-Produkte. Ferner sind als Nebenprodukte auch Gips und Epsomit geplant. Trotz des beabsichtigten breiten Spektrums an Nebenprodukten fallen auch bei dieser SOP-Produktion Verarbeitungsrückstände an, die in die Sabkha zurückgeführt werden. Ausgehend von den durch K-UTEC, Sondershausen, durchgeführten Verfahrensstudien wurde für diese 1. Phase ein Investitionsvolumen von 175 Millionen US-Dollar veranschlagt. Im September 2013 haben mehrere Agenturen das Rating des an der Delhi Stock Exchange gelisteten Projekteigentümers ACIPL aufgrund der wiederholten Budget- und Terminüberschreitungen bei der Fertigstellung des Projektes herabgestuft (ICRA 2013, /428/). Formell erfolgte eine Teilinbetriebnahme im 4. Quartal 2014, die jedoch nicht einmal die oben skizzierte sogenannte 1. Phase umfasst.

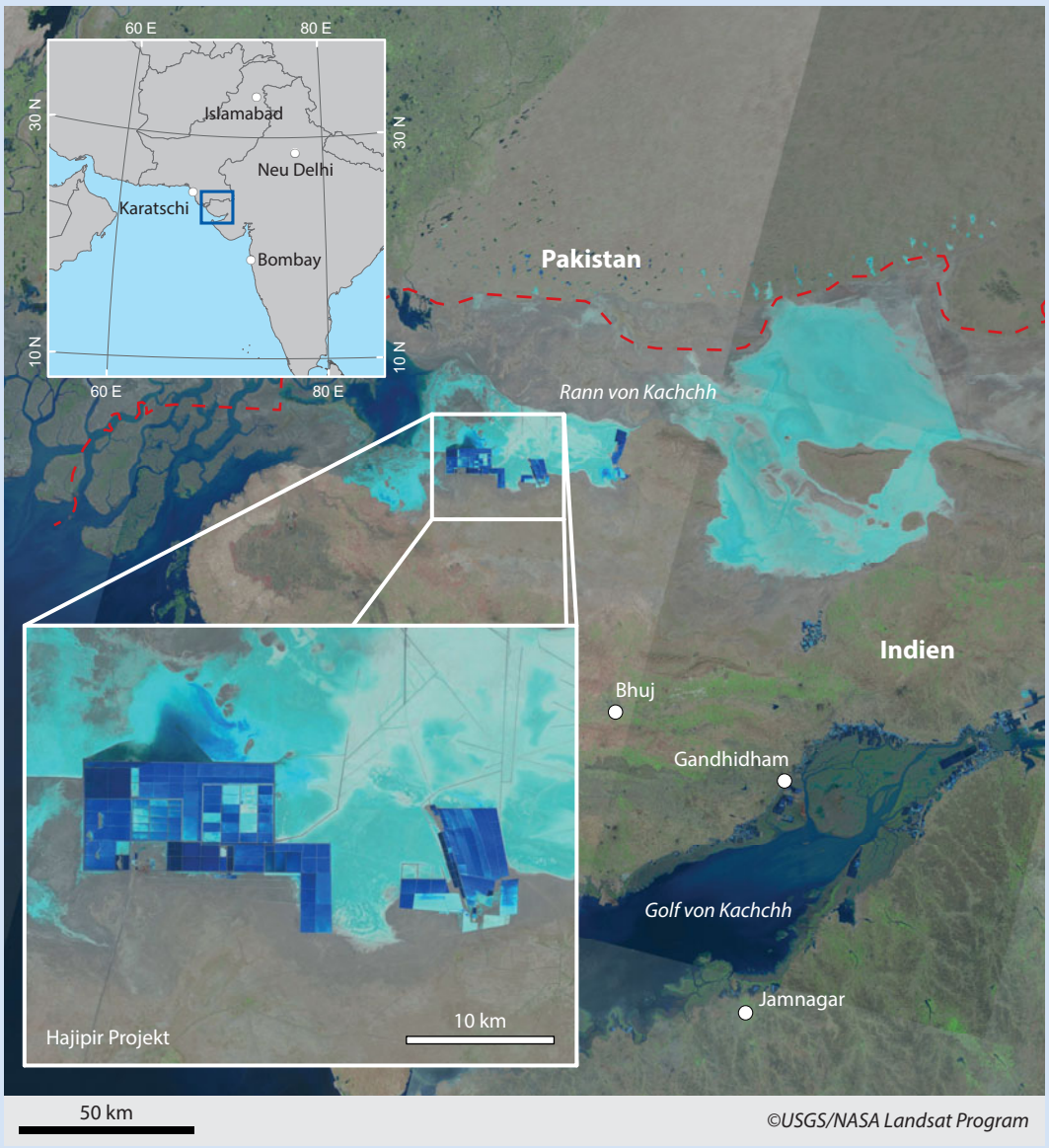
Wesentlichster Verfahrensschritt zur Wertstoffausbeute der natürlichen Lösungen ist die mehrstufige solare Eindampfung zum "Nulltarif"

Die Aufbereitung der natürlichen Lösungen erfolgt durch eine mehrstufige solare Evaporation, wozu in dem ariden Areal der Sabkha zahlreiche Evaporationsbecken mit einer Fläche von mehr als 40.000 Hektar angelegt wurden. Wie es für die Aufbereitung gering wertstoffhaltiger natürlicher Lösungen aus wirtschaftlichen Gründen stets notwendig ist, erfolgt also auch hier der hinsichtlich der Betriebskosten wesentlichste Aufbereitungsschritt unter Nutzung

124 Englisch: Rann of Kutch

125 das sogenannte evaporitische Pumpen; aus dem Englischen: *evaporative pumping* (Hsü & Siegenthaler 1969, /420/)

der (kostenfreien) Sonnenenergie. Insofern ist dieses Projekt, dessen Produktionskapazität selbst bei Realisierung der konzipierten späteren Ausbaustufen nicht der industrieüblichen Dimension entspricht und dessen Erprobung im praktischen Betrieb noch immer aussteht, nicht als Referenz für die Verwertung der in humiden Klimata anfallenden flüssigen Aufbereitungsrückstände oder Haldenlösungen tauglich. Die seitens K-UTEC konzipierten Verarbeitungsschritte stellen im Einzelnen gebräuchliche Verfahren bei der Verarbeitung von natürlichen Lösungen dar, wie sie auch von den Kalidüngemittelproduzenten anderenorts (▸Abschnitt 5.2) genutzt werden, gehören also zum Repertoire des Standes der Technik. Sie wurden lediglich – wie es anderenorts ebenfalls notwendig ist – auf die individuellen Randbedingungen des Standortes Rann von Kachchh angepasst. Dies impliziert jedoch keinesfalls, dass die in der öffentlichen Diskussion vielfach versprochene und mit diesem Projekt vermeintlich belegbare "rückstandsfreie" Kaliproduktion Wirklichkeit geworden ist oder gar dem derzeitigen Stand der Technik entspricht.



Geografische Lage und Überblick über die Produktionsanlagen und Evaporationsbecken des Hajipir Projektes von ACIPL, Provinz Gurjat, Indien

6 METHODEN, VERFAHREN UND ANLAGEN ZUR AUFBEREITUNG VON KALIROHSTOFFEN SOWIE ZUR VEREDLUNG, SPEICHERUNG UND ZUM TRANSPORT VON FERTIGPRODUKTEN

Wie für die Aufbereitung anderer Rohstoffe auch, besteht das Grundprinzip der Aufbereitung der festen Kalirohsalze, wie auch der natürlichen oder technischen Lösungen, in der Konzentration des Wertstoffinhaltes durch die Abtrennung von wertlosen und/oder schädlichen Beimengungen (Serowy 1952, /922/; Autenrieth 1958, /34/; Banks 1976, /59/; Eatock 1982, /219/; 1985, /220/; Hrynewich 1983, /417/; Zandon 1985, /1151/; Schubert 1986, /901/; Singewald 1991, /938/; Garrett 1996, /315/; Schultz et al. 2000, /904/; Stahl et al. 2005, /973/). Um diesen Trennprozess herbeizuführen, können die unterschiedlichen physikalischen wie auch die unterschiedlichen chemischen Eigenschaften der im Rohsalz auftretenden Minerale beziehungsweise Lösungskomponenten ausgenutzt werden.

Aufgrund der unterschiedlich ausgebildeten Lagerstätten – in fester Form im tiefen geologischen Untergrund sowie in gelöster Form in natürlichen Oberflächengewässern und/oder im Porenraum oberflächennaher Sedimente –, aber auch aufgrund der verschiedenen Gewinnungsmethoden fester Kalirohsalze (Bergmännische oder Soltechnische Gewinnung), liegen die zu verarbeitenden Kalirohstoffe entweder in fester Form als polymineralisches Rohsalz oder in flüssiger Form als wässrige Lösung aus verschiedenen chemischen Komponenten vor. Daraus folgend finden bei der Aufbereitung dieser Rohstoffe auch recht unterschiedliche Grundverfahren Anwendung, die wegen der individuellen Randbedingungen einer Lagerstätte beziehungsweise eines Produktionsstandortes in ihrer Auslegung modifiziert werden müssen. Im Folgenden soll dies im Rahmen einer Zustandsbeschreibung ausgewählter Produktionsstandorte der Kaliindustrie vorgestellt werden. Über die an den einzelnen Standorten der Kaliindustrie angewendeten Aufbereitungsmethoden und -verfahren geben die STANDORT-STECKBRIEFE in Kapitel 10 einen Überblick.

Im Abschnitt 6.1 wird zunächst auf die grundlegenden Aufbereitungsverfahren fester Kalirohsalze eingegangen, wobei die Hauptprozesse zur Anreicherung der Wertstoffkomponenten KCl und $MgSO_4$ im Vordergrund der Ausführungen stehen und die weiterhin erforderlichen Hilfsprozesse nur am Rande erläutert werden. Der Abschnitt 6.2 behandelt die Aufbereitung von technischen Lösungen, die aus der Soltechnischen Gewinnung von festen Kalirohsalzen resultieren. Die Aufbereitung von natürlichen Lösungen wird im Abschnitt 6.3 erläutert.

H. Rauche, *Die Kaliindustrie im 21. Jahrhundert,*
DOI 10.1007/978-3-662-46834-0_6, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

Auf dem Weg zum verkaufsfähigen Kalidüngemittel wird als Ergebnis all dieser Aufbereitungsprozesse ein festes Zwischenprodukt erzeugt, dem noch Rückstände von Produktionslösungen anhaften und das in der Regel auch noch nicht die erforderlichen KCl-Gehalte aufweist. Diese, in den genannten Prozessen erzeugten Zwischenprodukte müssen anschließend eine weitere Anreicherung, gefolgt von der Entwässerung und Trocknung, erfahren, was im Abschnitt 6.4 vorgestellt wird. Ein Teil der getrockneten Fertigprodukte wird anschließend durch Presskompaktierung[126] oder seltener durch Aufbaugranulierung veredelt, worüber im Abschnitt 6.5 berichtet wird. Letztlich bedarf es an allen Produktionsstandorten der Kalidüngemittelindustrie aufgrund des mehrheitlich saisonalen Handels der Düngemittelprodukte hinreichender Speicherkapazitäten für die Fertigprodukte und Einrichtungen zur Verladung auf die an den einzelnen Standorten zum Einsatz kommenden Transportmittel, in der Regel Bahn und LKW. Diese Hilfseinrichtungen werden im Abschnitt 6.6 erläutert.

6.1 Aufbereitung von festen Kalirohsalzen aus der Bergmännischen Gewinnung

Feste Kalirohsalze aus Bergmännischer Gewinnung können durch Flotation, durch Heißverlösung und Kristallisation oder mit Hilfe elektrostatischer Sortierung aufbereitet werden. Die beiden erstgenannten Verfahren finden auch für künstliche Kristallisate aus der solaren Evaporation natürlicher oder technischer Lösungen Anwendung. Während Flotation und elektrostatische Sortierung als physikalische Aufbereitungsverfahren vor allem die spezifischen Eigenschaften der Mineraloberflächen ausnutzen, zielt die Heißverlösung auf die unterschiedlichen Löse- und Kristallisationsverhalten der verschiedenen chemischen Komponenten. Der überwiegende Teil der weltweiten MOP-Produktion erfolgt mittels Flotation als singuläres Aufbereitungsverfahren. Oftmals werden aber auch verschiedene Verfahren miteinander kombiniert, um die von der Natur vorgegebene Rohsalzzusammensetzung bestmöglich auszunutzen, das heißt, um das Gesamtausbringen[127] einer Aufbereitungsanlage zu optimieren. Die KCl-Ausbeute einer flotativen Aufbereitung (▸Abschnitt 6.1.1) wird durch das Eindampfen (▸Abschnitt 6.1.2) einer anfallenden Überschußlösungen und die dabei erzielte KCl-Kristallisation gesteigert, um hier eingangs nur ein einfaches Beispiel zu erwähnen.

Von den weltweit insgesamt 69 Aufbereitungsanlagen, die im Jahr 2014 im planmäßigen industriellen Betrieb zur Kalidüngemittelproduktion genutzt wurden, verarbeiten 33 Standorte feste Rohsalze aus der Bergmännischen Gewinnung unter Tage (▸Tabelle 18). In 29 dieser Aufbereitungsanlagen werden die bergmännisch gewonnenen festen Kalirohsalze durch Flotation, oder in Kombination von Flotation mit Heißverlösung und Kristallisation, und an 4 Standorten ausschließlich durch Heißverlösung und Kristallisation zu Wertstoffkonzentraten aufbereitet. Das Verfahren der elektrostatischen Aufbereitung fester Kalirohsalze wird an 4 deutschen Standorten im industriellen Routinebetrieb jeweils in Kombination mit Flotation und/oder Löseverfahren eingesetzt. In allen Fällen sind neben diesen Hauptaufbereitungsschritten für die Herstellung verkaufsfähiger Kalidüngemittelprodukte auch weitere Hilfsprozesse erforderlich.

In der Regel werden bereits unter Tage die aus verschiedenen Abbaufeldern geförderten und oftmals hinsichtlich Wert- und Schadstoffgehalten unterschiedlich zusammengesetzten Rohsalzströme beim Einspeichern in Feldes- oder den zentralen Schachtbunker derart verschnitten, dass eine in relativ engen Schranken für den anschließenden Aufbereitungsprozess optimierte Rohsalzzusammensetzung vorliegt. Hierzu wird quasi von den Abbauorten entlang der Förderwege bis hin zu den Aufgabepunkten in die nachfolgenden Brecheranlagen der Aufbereitungsanlage vor allem die Wertstoffkomponente K_2O online mit Hilfe radiometrischer Methoden durch sogenannte K_2O-Sonden überwacht (Adams 1969, /13/; Weps 1981, /1111/; Stahl 1996, /972/). Je nach Rohsalzzusammensetzung und Aufbereitungsprozess kommen weitere Analysenmethoden, besonders zur Überwachung und Steuerung innerhalb der folgenden Aufbereitungsschritte hinzu, die heute ebenfalls vielfach online betrieben werden (Fleischer 1986, /277/; Schröder, Rest & Stahl 2002, /895/).

126 Im deutschen Sprachgebrauch wird die Presskompaktierung mitunter unzutreffend als Granulierung bezeichnet. Es handelt sich hierbei jedoch nicht um ein Verfahren der Aufbaugranulierung, wie es zum Beispiel für andere Düngemittel Anwendung findet, sondern um ein rein mechanisches Kompaktieren feinkörnigerer Zwischenprodukte zu Vielkornagglomeraten.

127 Unter Ausbringen ist die Ausbeute des Prozesses zu verstehen, also der prozentuale Anteil des im geförderten Rohsalz enthaltenen KCl, welcher sich letztendlich im verkaufsfähigen Produkt findet.

Tabelle 18 Aufbereitungsanlagen der Kalidüngemittelproduktion weltweit, in denen bergmännisch gewonnene feste Kalirohsalze zu Fertigprodukten verarbeitet werden (▸ Tabelle 1)

Produzent/Standort[5]	Art der Aufbereitung bergmännisch gewonnener fester Kalirohsalze
URALKALI	
Solikamsk 3	Flotation
Berezniki 4	Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation
Solikamsk 2	Flotation
Berezniki 3	Flotation
Berezniki 2	Flotation
Solikamsk 1	Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation
PCS	
Lanigan	Hauptsächlich Flotation und für kleinere Rohsalzanteile beziehungsweise für Teilmengen von Flotationsrückständen auch Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation
Rocanville	Flotation
Allan	Hauptsächlich Flotation und für kleinere Rohsalzanteile beziehungsweise für Teilmengen von Flotationsrückständen auch Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation
Cory	Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation, Flotation
New Brunswick	Hauptsächlich Flotation und für kleinere Rohsalzanteile beziehungsweise für Teilmengen von Flotationsrückständen auch Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation
MOSAIC	
Esterhazy K1	Flotation
Esterhazy K2	Schweretrennung, Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation
Colonsay	Hauptsächlich Flotation und für kleinere Rohsalzanteile beziehungsweise für Teilmengen von Flotationsrückständen auch Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation
Carlsbad	Flotation
BELARUSKALI	
Soligorsk 4	Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation
Soligorsk 3	Flotation
Soligorsk 2	Flotation
Soligorsk 1	Flotation

Produzent/Standort[5]	Art der Aufbereitung bergmännisch gewonnener fester Kalirohsalze
K+S	
Verbundwerk Werra, bestehend aus den Standorten:	
Wintershall	Flotation, Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation, ESTA®
Hattorf	Flotation, Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation, ESTA®
Unterbreizbach	Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation, Flotation
Zielitz	Flotation, Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation
Neuhof-Ellers	Flotation, ESTA®
Sigmundshall	Flotation, Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation, ESTA®
ICL IBERIA S & S	
Súria	Flotation
Sallent	Flotation
CPL	
Boulby	Hauptsächlich Flotation und für kleinere Rohsalzanteile beziehungsweise für Teilmengen von Flotationsrückständen auch Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation
AGRIUM	
Vanscoy	Hauptsächlich Flotation und für kleinere Rohsalzanteile beziehungsweise für Teilmengen von Flotationsrückständen auch Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation
INTREPID	
Carlsbad East	Hauptsächlich Flotation und für kleinere Rohsalzanteile beziehungsweise für Teilmengen von Flotationsrückständen auch Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation
Carlsbad West	Flotation
VALE	
Taquari-Vassouras	Flotation
UZKIMYOSANAT	
Dechkanabad	Flotation

Da die natürlichen Kalisalze unterschiedliche Korngrößen der Einzelminerale und sehr verschiedenartige Verwachsungsverhältnisse zeigen, erfordern alle genannten Aufbereitungsverfahren eine vorbereitende Aufmahlung der Rohsalze und zwar dergestalt, dass möglichst monomineralische Fragmente vorliegen. Insbesondere für die beiden physikalischen Aufbereitungsverfahren Flotation und elektrostatische Sortierung ist dies die entscheidende Voraussetzung für einen hinreichenden Trennerfolg. Um eine weitgehende Freisetzung der KCl-Kristalle von den NaCl-Kristallen zu erreichen, müssen hierfür feinkörnigere Fragmentströme erzeugt werden, in der Regel mit einem Kornband zwischen 1 und 2 Millimeter oder auch feiner (Rüsberg 1955, /866/; Rogers & Schulmann 1957, /848/; Schubert 1974, /900/; Arsentiev & Leja 1977, /28/; Tippin 1977, /1012/; Cormode 1985, /171/; Bischofberger 1986, /104/; Hagedorn 1986, /361/; Ciernioch 1997, /156/). Die Heißverlösung ist dagegen weniger sensitiv gegenüber der Fragmentgröße, so dass hier im allgemeinen ein Kornband von 4 bis 8 Millimeter genutzt wird (Wilson 1969, /1120/; 1970, /1121/; Wilson & McKee 1973, /1122/; Pelš & Holldorf 1983, /742/; Peuschel 1986, /754/). Folglich sind die vorbereitenden Brech-, Mahl- und Siebstufen auch unterschiedlich zu gestalten.

Die vorbereitenden Aufbereitungsschritte bestehen aus der Rohsalzzerkleinerung und der darin integrierten Klassierung in verschiedenen Siebstufen. Dabei entsteht auch Staub, der in der anschließenden Aufbereitung Probleme bereiten kann. Um dem entgegenzuwirken, erfolgt die Mahlung meist im Kreislaufsystem mit vorgeschalteter Klassiereinrichtung, in den sogenannten Siebmaschinen, wodurch der zu zerkleinernde Massenstrom verschlankt wird. Bereits bei der Auswahl der Zerkleinerungsmaschinen kann dem Anfallen von Staub entgegengesteuert werden. Die mechanische Zerkleinerung muss demzufolge so ausgelegt werden, dass ein möglichst hoher Aufschlussgrad und Mahlfortschritt bei vertretbarem Staubanfall erreicht wird (Autenrieth 1958, /34/; Götte 1990, /346/; Skvirski, Chistyakov & Kozel 1991, /950/), was im Einzelfall durchaus eine Herausforderung sein kann.

In der Regel wird das feste Rohsalz aus dem Bohr- und Sprengbetrieb bereits unter Tage mit mobilen Brechern zerkleinert. Bei einer Schneidenden Gewinnung ist eine Zerkleinerung unter Tage hingegen durch den Schneidvorgang selbst gegeben und daher eine zusätzliche Aufmahlung unter Tage nicht oder zumindest nicht in gleichem Umfang wie für das mittels Bohren und Sprengen gewonnene Haufwerk erforderlich. Über Tage erfolgt jedoch in jedem Falle eine weitere Aufmahlung mittels Hammer- oder Prallmühlen. Für die Flotation und die Aufbereitung mittels elektrostatischer Sortierung ist es zur Liberation, also zur Freisetzung monomineralischer Fragmente erforderlich, das Rohsalz noch einer Feinmahlung zu unterziehen. Für die Flotation hat sich dazu eine Nassmahlung, zum Beispiel in einer Stabrohrmühle im Kreislaufsystem mit Klassiereinrichtung (Nasssieb oder Zyklon), bewährt. In Abbildung 48 ist ein vereinfachtes Verfahrens- und Apparateschema zur mechanischen Zerkleinerung und Klassierung eines Rohsalzes dargestellt:

Das Rohsalz wird zur Vorklassierung zunächst einer Vorabsiebung unterzogen. Das Unterkorn, welches schon die gewünschte Maximalkorngröße unterschreitet, wird über einen Gurtbandförderer abgeführt. Das Überkorn wird zur mechanischen Zerkleinerung in den Brech- und Mahlungsprozess aufgegeben. Anschließend wird das zerkleinerte Rohsalz zur Nachklassierung einer weiteren Siebung unterzogen. Das Unterkorn, welches die gewünschte Korngröße aufweist, wird über den Gurtbandförderer abgeführt. Das Überkorn wird über ein Becherwerk erneut der mechanischen Zerkleinerung zugeführt.

Als Klassiereinrichtungen können neben Siebmaschinen auch Zyklone eingesetzt werden. Durch eine Abtrennung der ohnehin schon feinen Rohsalzfraktion vor der Mahlung lässt sich eine zusätzliche und unnötige Zerkleinerung dieser Fraktion minimieren und die Staubbelastung reduzieren. Als Siebmaschinen werden Vibrations-, aber auch statische Siebmaschinen eingesetzt, welche mit mehreren Siebdecks ausgestattet sein können. Als Fliehkraftabscheider werden Hydrozyklone eingesetzt, bei denen im Zuge der Separierung von Flüssigkeit und Feststoff aus der Suspension auch eine Klassierung durch gemeinsamen Austrag der feinen Rohsalzfraktion mit der Flüssigkeit und dem Verbleib der groben Rohsalzfraktion im Feststoff stattfindet. Klassiereinrichtungen werden sowohl in der trockenen als auch in der nassen Aufbereitung der Kalirohsalze eingesetzt.

Der Elektroenergieverbrauch einer typischen Rohsalzaufbereitung, bestehend aus Rohsalzzufuhr (Fördertechnik), Zerkleinerung und Klassierung (Brecher/Mühlen und Siebe/Zyklone) sowie Entstaubungsanlage, liegt zwischen 1,5 und 2,2 Kilowattstunden pro Tonne KCl-Produkt. Größere Unterschiede im spezifischen Stromverbrauch einzelner Produktionsanlagen für diesem Abschnitt der Rohsalzaufbereitung können mehrere Ursachen haben. Den größten Einfluss stellt die Rohsalzqualität, speziell der Grad der Verwachsung der Minerale, dar, was also wiederum von den natürlichen lagerstättengeologischen Randbedingungen abhängt. Ist dieser Verwachsungsgrad groß, so muss das Rohsalz relativ fein aufgemahlen werden, was einer größeren Dimensionierung der Zerkleinerungs- und Klassiereinrichtungen beziehungsweise eine Erhöhung des rückzuführenden Materialstroms zu der Zerkleinerungseinheit zur Folge hat. Beides führt auch zu einem höheren Energiebedarf für diesen Aufbereitungsabschnitt. Auch die Härte des geförderten Rohsalzes übt einen direkten Einfluss auf die benötigte Leistung der Zerkleinerungs- und Klassiereinheiten aus. Bei härteren Mineralen, besonders bei Sulfaten und Polysulfaten, ist eine erhöhte Leistung der Brech- und Mahleinheiten erforderlich.

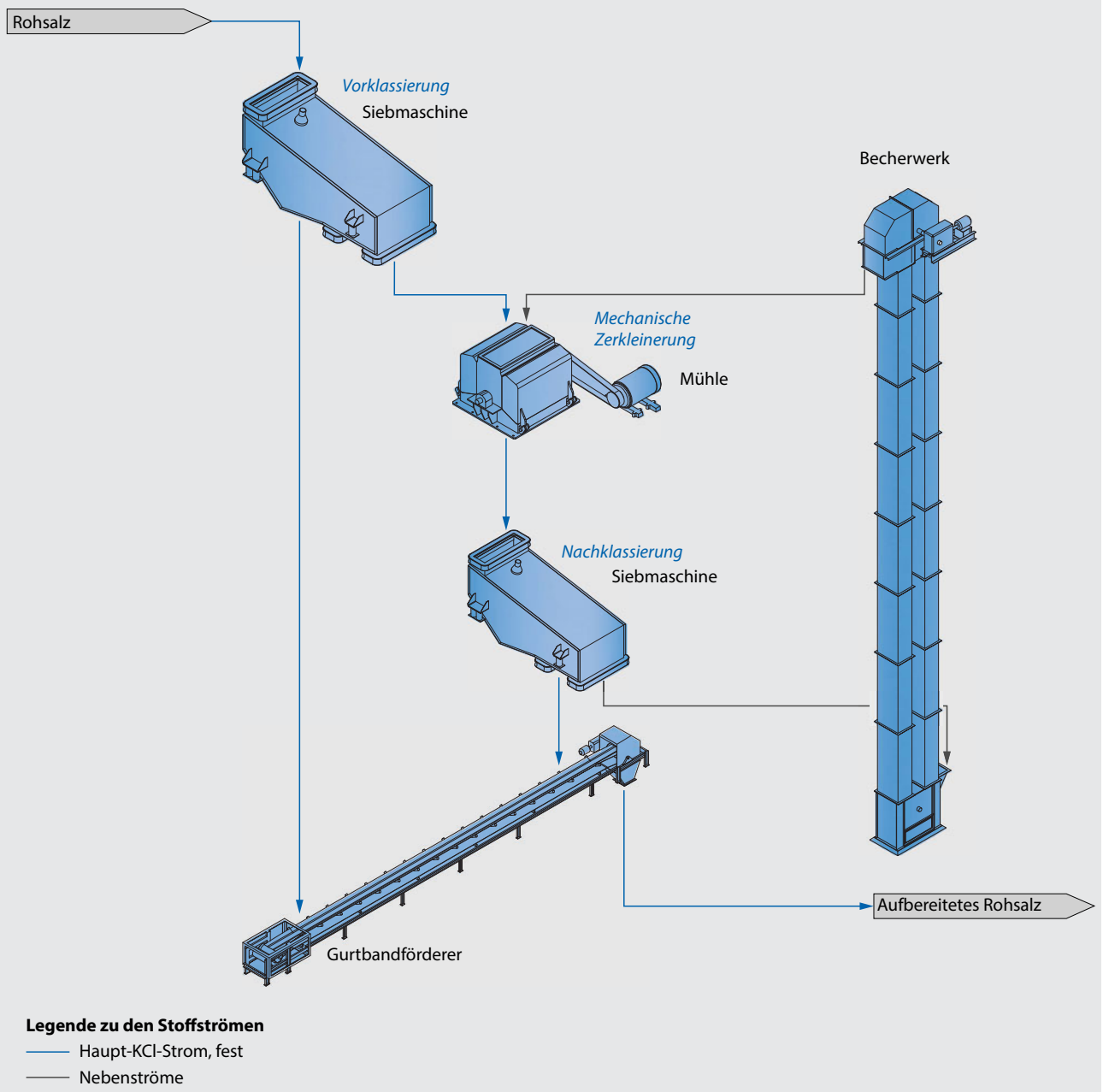


Abbildung 48 Mechanische Zerkleinerung und Klassierung des Rohsalzes im vereinfachten Verfahrens- und Apparateschema

Auf dem Weg vom so vorbereiteten Rohsalz bis zu einem verkaufsfähigen KCl-Produkt finden hinsichtlich des zugrundliegenden Aufbereitungsprinzips unterschiedliche Methoden Anwendung. Die Wahl der jeweiligen Aufbereitungsmethode richtet sich in erster Linie nach der mineralogischen Zusammensetzung und dem Korngefüge des Rohsalzes. Aber auch die standortspezifischen Gegebenheiten, wie zum Beispiel das vorhandene Energie- und Brauchwasserangebot, spielen eine Rolle. In den folgenden Abschnitten werden die chemischen und verfahrenstechnischen Grundlagen erläutert und die Anwendung der Aufbereitungsmethoden beschrieben.

6.1.1 Aufbereitung fester Kalirohsalze durch Flotation

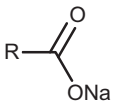
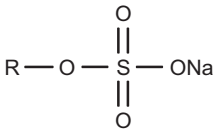
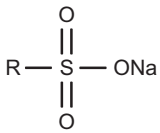
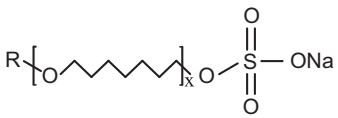
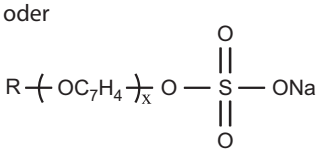
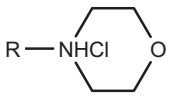
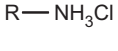
Die Flotation ist ein mechanisches Trennverfahren, welches die unterschiedliche Bindungsfähigkeit der Rohsalzbestandteile an speziellen Konditionierungsmitteln, den sogenannten Sammlern, und ihre daraus resultierende unterschiedliche Oberflächenbenetzbarkeit nutzt. Dabei wird das zuvor gemahlene Rohsalz zunächst mit Flotationsreagenzien konditioniert, so dass die Sammlermoleküle[128] am auszuschwimmenden Material, das heißt am zu flotierenden Substrat, anhaften und auf diese Weise eine hydrophobe Hülle schaffen. Das Sammlermolekül ist also adsorptiv an sein Substrat gebunden. Ob diese Adsorption stattfinden kann oder unterbleibt, wird von der Kongruenz der Ionenradien des Substrates und der Konditionierungsmittels bestimmt. Auf jeden Fall ist der Sammler derart auszuwählen, dass er nur auf einer mineralischen Rohsalzkomponente haftet und dafür sorgt, dass diese keine oder nur eine deutlich geringere Benetzung durch die Flotationslösung erfährt, als die anderen Mineralfragmente. Bei der sehr verbreiteten Sylvinitflotation findet die Adsorption des Sammlers am Sylvin-Gitter statt, während Halit und andere Mineralbestandteile benetzt werden und in der Flotationslösung schweben oder auch gravitativ gesteuert absinken.

Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 49 das Grundprinzip der Sylvinitflotation für die Dimension des Ionengitters, für die mikroskopische Dimension des Einzelkorns und für die makroskopische Dimension in der Flotationszelle schematisch dargestellt. Die mikroskopische Ebene beschreibt die direkte Wechselwirkung zwischen Sylvin-Korn und Sammlerreagenz. Die makroskopische Ebene bezieht sich auf die mechanische Trennung von Sylvin- und Halit-Kristallen in einer Flotationszelle.

Ob eine trennende Wechselwirkung von Sammlerreagenzien erreicht werden kann, beruht letztlich auf ähnlichen beziehungsweise unterschiedlichen Ionenradien (▸ Abbildung 49a). Generell ist ein Sammlerreagenz nötig, um dem ursprünglich hydrophilen Ionenkristall hydrophobe Eigenschaften zu verleihen (▸ Abbildung 49b). Hierzu werden Moleküle mit einem hydrophilen sowie einem hydrophoben Teil verwendet. Der Sammler muss dabei so gewählt werden, dass möglichst selektiv nur eine mineralische Komponente von der Flotationslösung benetzt wird.

Wie in Tabelle 19 dargestellt, richtet sich die Wahl des Sammlers nach dem zu flotierenden Substrat.

Tabelle 19 Sammlerklassen und deren Anwendungsbereiche

Sammler	Strukturformel	Substrat
Carboxylate		Halit
Alkylsulfate		Kieserit
Alkansulfonate		Kieserit
Alkylpolyether-sulfate	 oder 	Ton-minerale
Alkylmorpholin-salze		Halit
N-Alkyl-ammoniumsalze		Sylvin

Das hydrophile Teil des Sammlermoleküls haftet am zu flotierenden Substrat, wodurch der hydrophobe Teil des Sammlermoleküls das benetzte Substratteilchen nach außen hin hydrophobiert. Bei der Flotation haften die hydrophoben Teilchen an mechanisch oder pneumatisch erzeugten Luftblasen geeigneter Größe in der Flotationszelle an, schwimmen auf und können von der Oberfläche der Flotationslösung als Schaum aus der Flotationszelle ausgetragen werden (▸ Abbildung 49c). Abschließend wird dieses Flotationskonzentrat entwässert und der Deckstufe (▸ Abschnitt 6.4) zugeführt. Die hydrophilen Teilchen verbleiben in der Flotationstrübe und werden als Rückstände mit dieser aus der Flotationszelle ausgetragen.

128 Sammlermoleküle sind Reagenzien, die sich spezifisch an Kristalle eines Minerals binden und somit eine selektive Hydrophobie von Mineralen hervorrufen.

Bereits geringe Gehalte an Nebenbestandteilen des Rohsalzes können die Flotierbarkeit erheblich stören. Beispielsweise können Begleitkomponenten wie Anhydrit oder Tone bei einer Sylvinitflotation gleichzeitig mit dem Sylvin im Flotationskonzentrat angereichert werden und somit die Reinheit des Zwischenproduktes deutlich mindern. Durch den Einsatz von Drückern, wie zum Beispiel Stärke oder Polyacrylamid, bleibt die Hydrophilie der Nebenbestandteile bestehen. Durch die Drückerreagenz ist kein Angriff des Sammlers an einzelne Nebenbestandteile möglich, wodurch sich die Trennselektivität verbessert. Sehr feine, unlösliche Nebenbestandteile, sogenannter Feinschlamm, können jedoch trotz des Einsatzes von Drückern während des Flotationsprozesses in den Konzentratschaum gelangen.

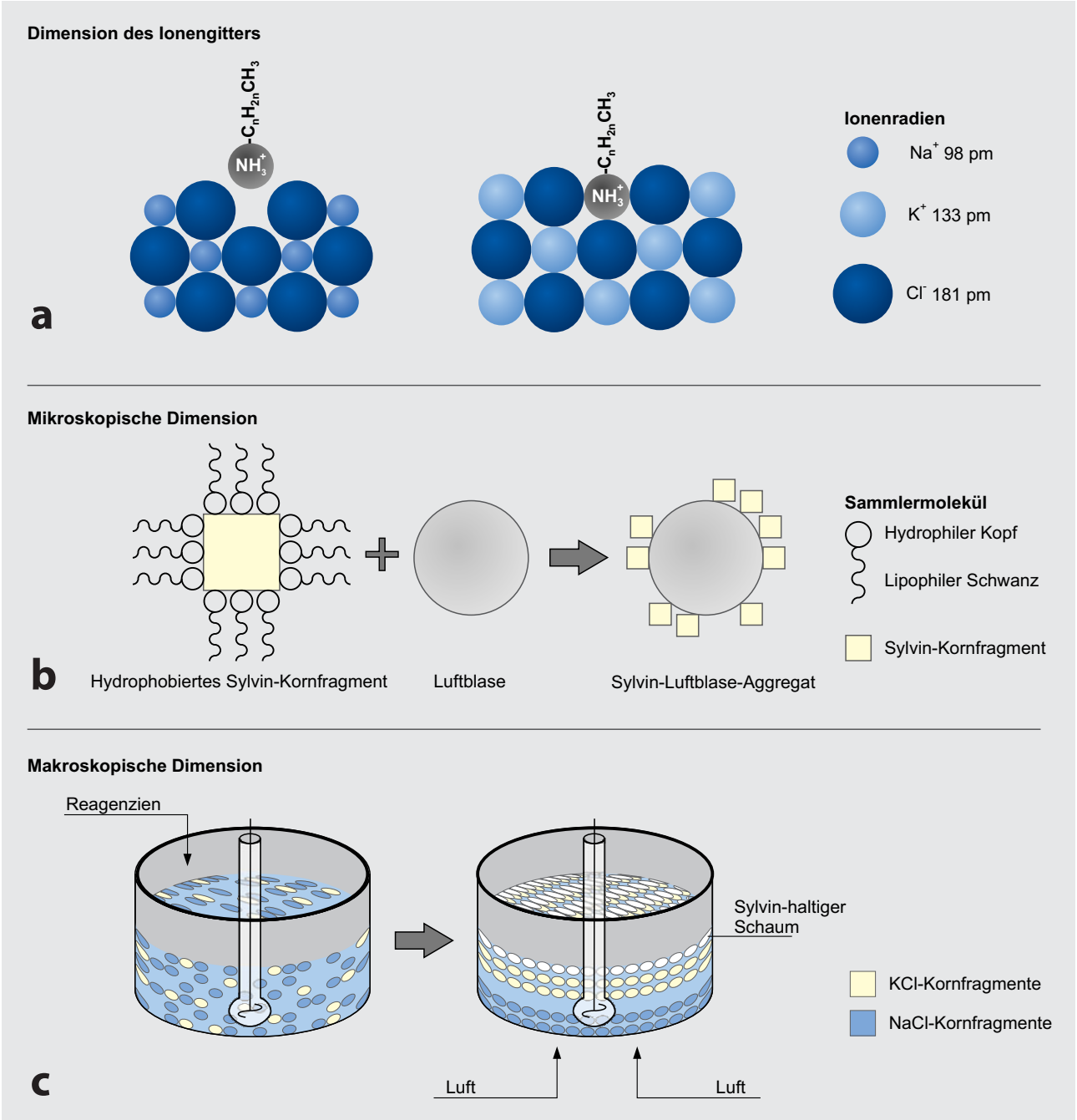


Abbildung 49 Grundprinzip der Sylvinitflotation; a – Ionengitterdimension: Wechselwirkung zwischen Alkylammoniumsammler und Halit- (links) beziehungsweise Sylvin-Ionengitter (rechts); b – Mikroskopische Dimension: Anhaften der hydrophobierten Sylvin-Kornfragmente an den Luftblasen; c – Makroskopische Ebene: Aufsteigen und Sammlung der Sylvin-Kornfragmente im Schaum der Flotationszelle und Absinken der Halit-Kornfragmente

BOX 6.1

Vakuumscheibenfilter zur Fest-Flüssig-Trennung von Salzlösungssuspensionen



Das Bild zeigt einen Vakuumscheibenfilter des Herstellers ANDRITZ AG.

[Foto mit freundlicher Genehmigung von Andritz Separation GmbH, Köln, Deutschland]

Die ANDRITZ AG, ein internationaler Technologiekonzern mit Sitz in Graz, Österreich, beschäftigt an weltweit etwa 250 Standorten knapp 25.000 Mitarbeiter. Die ANDRITZ AG ist einer der führenden Lieferanten von Anlagen und Ausrüstungen zur industriellen Fest-Flüssig-Trennung.

Solche Vakuumscheibenfilter werden bei der Kalidüngemittelproduktion vielfach zur Fest-Flüssig-Trennung von Suspensionen, zum Beispiel bei der Flotation sylvinitischer Rohsalze eingesetzt. Im Zuge der Rotation der horizontal angeordneten Filterscheiben wird ein Vakuum erzeugt, welches die Flüssigkeit zu beiden Seiten der Filterscheibe absaugt. Damit wird eine Restfeuchte der Filtrate zwischen 10 und 15 Prozent erreicht.

Der Feinschlamm sollte vor der Flotation weitestgehend entfernt werden, da er, einmal im Konzentrat angekommen, durch weitere Reinigungsschritte wie zum Beispiel einen einfachen Deckprozess nicht mehr entfernt werden kann. Hierzu haben sich Hydrozyklone, eine Nasssiebung oder eine sogenannte Schlammflotation bewährt. Der abgetrennte Schlamm wird anschließend noch entwässert, um die KCl-Verluste in Form des Wertstoffanteils in der anhaftenden Lösung zu minimieren. Bedingt durch die sehr kleine Korngröße des Feinschlammes, stellt dessen Abtrennung besondere Anforderungen an die verwendeten Methoden und Verfahren sowie an die entsprechende Maschinentechnik. Beispielsweise kann eine Feinschlammabtrennung durch eine mehrstufige Schlammflotation oder eine Kombination der zuvor erwähnten Maßnahmen (Schlammflotation ergänzt durch Hydrozyklone oder Nasssiebung) erforderlich sein, um den gewünschten Trenneffekt zu realisieren.

Ein weiterer bei der Flotation eingesetzter Hilfsstoff ist der sogenannte Schäumer. Dabei handelt es sich meist um Alkohole, wie zum Beispiel 4-Methyl-2-Pentanol oder Polyglykolether. Der Schäumer modifiziert die Eigenschaften des Flotationsschaumes, vor allem Stabilität und Feststofftragfähigkeit, und trägt somit zur Verbesserung des Flotationsausbringens bei.

In der Praxis der Aufbereitung der Kalirohsalze sind mehrere Flotationsstufen notwendig (▸ Abbildung 50a), um einen möglichst hohen KCl-Gehalt im Zwischenprodukt zu erreichen und um die Wertstoffverluste gering zu halten. Dies sind in der Regel mindestens folgende Flotationsstufen:

- Die Vorflotation ist der erste Flotationsschritt, wobei meist das resultierende Konzentrat noch einen unzureichenden und der Rückstand einen noch relativ hohen Wertstoffgehalt aufweist.
- Die in der Regel mehrstufige Reinigungsflotation des Vorflotationskonzentrates dient der weiteren Erhöhung des KCl-Wertstoffgehaltes, wobei Teilströme gewöhnlich durch Nachzerkleinerung einer weiteren Liberation zugänglich gemacht und danach in die Reinigungsflotation rückgeführt werden (▸ Abbildung 50b).
- Die Nachflotation der Rückstände aus den Flotationsstufen kann zur weiteren Minimierung der Wertstoffgehalte im Rückstand, das heißt Wertstoffverluste, erforderlich sein oder dient der Gewinnung von Nebenbestandteilen, zum Beispiel Kieserit.

Abbildung 51 zeigt ein vereinfachtes Verfahrens- und Apparateschema zur Aufbereitung eines sylvinitischen Rohsalzes mittels Flotation:

Das vorgemahlene Rohsalz wird in einem Bunker zwischengespeichert. Anschließend wird es mit der Anmaischlösung in einem Mischer zusammengeführt. Dieser Stoffstrom wird auf eine Vorabsiebung gegeben. Das Überkorn wird in einer Stabrohrmühle nass gemahlen. Über einen Sammelbehälter und eine Pumpe wird es zur Kontrolle einer zweiten Siebung zugeführt. Das Unterkorn aus beiden Siebungen wird in einem Behälter gesammelt und über eine Pumpe in die Vorflotation gegeben. Der Rückstand aus der Vorflotation wird in einem Behälter gesammelt und über eine Pumpe zur Voreindickung in einen Hydrozyklon gefördert. Der Unterlauf des Hydrozyklons wird mittels Zentrifuge entwässert und über einen Gurtbandförderer abgeführt. Das anfallende Fugat fließt im freien Gefälle in einen Eindicker. Auch der Oberlauf des Hydrozyklons fließt in diesen Eindicker. Der Unterlauf des Eindickers wird in einem Behälter gesammelt und zur Entwässerung über eine Pumpe der Zentrifuge zugeführt. Der geklärte Oberlauf des Eindickers wird in einem Behälter gesammelt und über eine Pumpe abgeführt.





Abbildung 50 Flotation sylvinitischer Rohsalze im Kaliwerk Berezniki 3 von URALKALI, Obere Kama in der Region Perm, Russland; a – Blick in die vierstufige Flotationsanlage; b – Blick in eine Flotationszelle [Fotos mit freundlicher Genehmigung von PAO Uralkali, Berezniki, Russland]

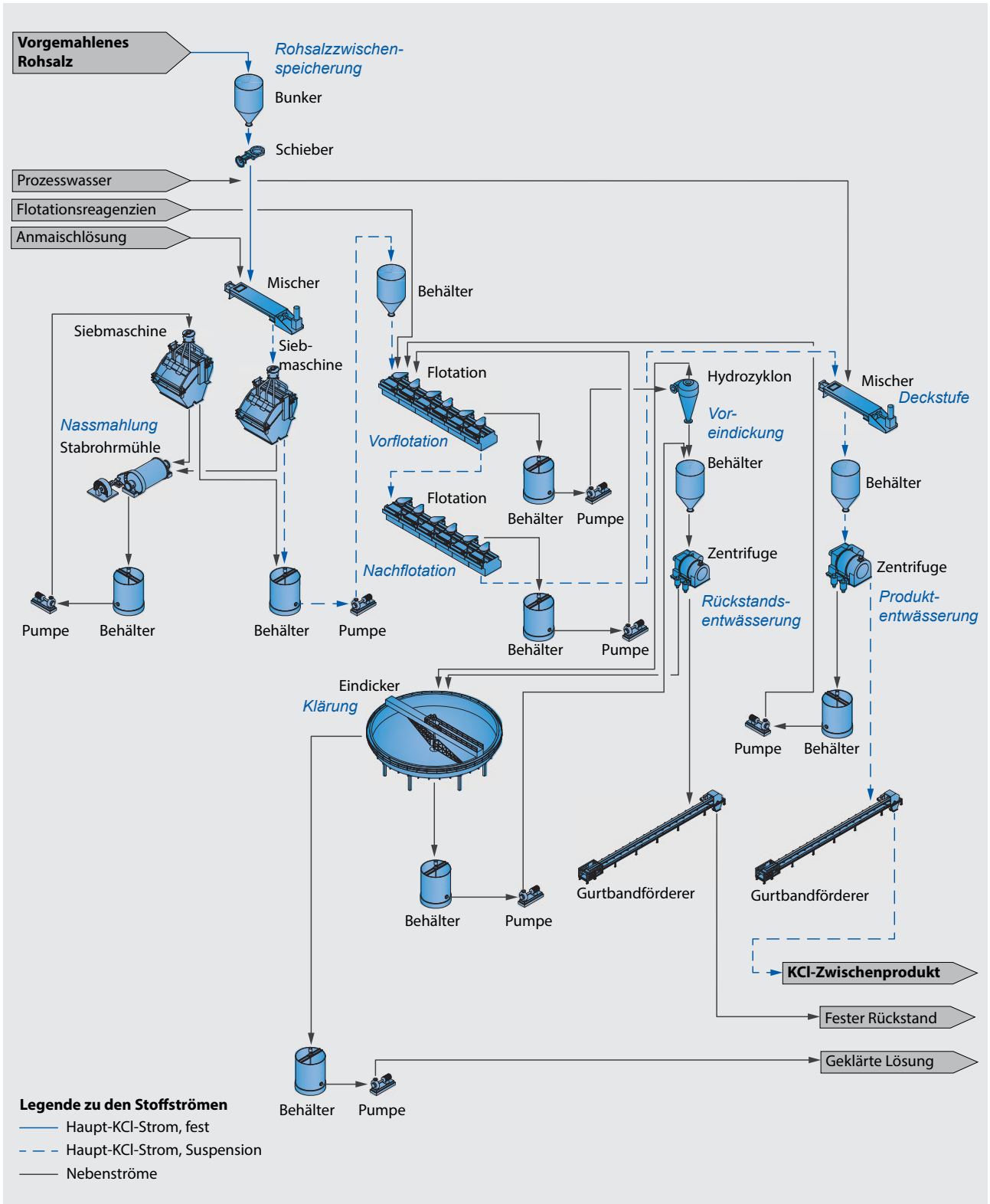


Abbildung 51 Aufbereitung eines sylvinitischen Rohsalzes mittels Flotation im vereinfachten Verfahrens- und Apparateschema

Der KCl-Strom aus der Vorflotation fließt in die Nachflotation. Der Rückstand der Nachflotation wird in einem Behälter gesammelt und über eine Pumpe in die Vorflotation zurückgegeben. Der KCl-Strom aus der Nachflotation fließt in einen Mischer. Unter Zugabe von Prozesswasser erfolgt hier eine Deckstufe des KCl. Das Produkt wird anschließend in einer Zentrifuge entwässert und über einen Gurtbandförderer abgeführt. Das Fugat wird in einem Behälter gesammelt und über eine Pumpe in die Vorflotation gefördert.

Das Flotationsprodukt muss anschließend noch einer oder mehreren Deckstufe(n) unterworfen werden, um die nötige Reinheit des Wertstoffes zu erreichen. Anhaftende Flotationsreagenzien werden durch die erhöhten Temperaturen während der Trocknung entfernt (▸ Abschnitt 6.4).

Die in Abbildung 51 gezeigte einfache Flotationsanlage besteht aus 2 Grundstufen, der Vor- und der Nachflotation. Grundsätzlich können weitere Schritte notwendig sein. Zusätzlich können die Rückstände der Vorflotation erneut flotiert werden, die zu flotierenden Rückstände und Konzentrate können vor der erneuten Flotation einer zusätzlichen Mahlung unterzogen werden.

Ein in der Literatur (Rüsberg 1955, /866/; Arsentiev & Leja 1977, /28/; Beier 1996, /474/; Ciernioch 1997, /156/; Perucca & Cormode 1999, /174/; Russel 2011, /475/) vielfach gepriesener Vorteil der Flotation gegenüber der Heißverlösung (▸ Abschnitt 6.1.2) liegt im geringeren Energieverbrauch, da bei der Flotation selbst keine Energie zur Lösungsaufwärmung erforderlich ist. Im Einzelfall ist diese pauschale Feststellung mit Blick auf den Energieeinsatz im gesamten Aufbereitungsprozess zu überprüfen. Der Nachteil der Flotation liegt häufig im erforderlichen feinen Aufmahlen und damit verbundenen Klassieren des Rohsalzes, so dass monomineralische Fragmente für eine effektive Flotation freigesetzt sind. Diese Mahl- und Siebstufen erfordern mitunter einen erheblichen Elektroenergieeinsatz. Die effektive Leistung (Stromverbrauch) einer flotativen Aufbereitung von der Rohsalzzufuhr bis zur Produktentwässerung liegt zwischen 80 und 120 Kilowattstunden pro Tonne Fertigprodukt. Dieser relativ breite Bereich des spezifischen Energiebedarfes für die Flotation beruht auf der Qualität des Rohsalzes. Bei der flotativen Aufbereitung von Rohmaterial mit relativ geringem KCl-Gehalt kann sich der Einsatz mehrerer zusätzlicher Flotationsstufen, bei erheblichen Anteilen unlöslicher Bestandteile einer sogenannten Schlammflotation als nötig erweisen. Des Weiteren muss mit sinkendem KCl-Gehalt des Rohsalzes auch mehr Rohsalz der Flotation zugeführt werden. Beides resultiert in größerem maschinentechnischem Aufwand und in erhöhtem Energiebedarf dieses Aufbereitungsabschnittes. Ebenso wichtig ist die Effizienz der einzelnen Flotationsstufen: So führen beispielsweise ein $MgCl_2$-Gehalt oberhalb etwa 50 Gramm pro Liter sowie eine Temperatur der Traglösung über 35° C zu einer deutlichen Verschlechterung des Flotationsergebnisses, was zusätzliche Flotationsstufen erfordern kann und die benötigte Menge an elektrischer Energie ansteigen lässt.

Abbildung 52 stellt vergleichend die mineralogische Zusammensetzung von Rohsalzen verschiedener Kaliwerke dar. Außerdem sind darin die K_2O-Bilanzen dargestellt, wie sie bei Anwendung des Flotationsverfahrens nach Stand der Technik erreicht werden können (ERCOSPLAN 2015, /255/; PCS 2011a, /736/; K+S 2012g, /1101/). In Abbildung 52 ist jeweils links die mineralogische Zusammensetzung des Rohsalzes mit prozentualen Anteilen der Kalium-haltigen Komponenten sowie aller wesentlichen Nebenbestandteile aufgeführt. Wie für andere feste Kalirohsalze auch, ist das Mineral Halit in diesen Referenzfällen als nicht Kalium-haltige Nebenkomponente mit dem größten Anteil am Rohsalz vertreten. Rechts im Bild ist die K_2O-Bilanz grafisch veranschaulicht, die zeigen soll, wieviel aus dem im Rohsalz insgesamt verfügbaren Wertstoff K_2O tatsächlich in das oder die Fertigprodukte gelangt und wo entsprechende Verlustquellen auftreten. Diese Angaben sind als Anteile in Prozent der insgesamt verfügbaren Wertstoffmenge im Rohsalz wiedergegeben. Wie bei anderen Aufbereitungsverfahren auch, ist ein wesentlicher Teil der Wertstoffverluste bei der Flotation an die festen und flüssigen Rückstände gebunden. Den größten Anteil an den KCl-Verlusten haben bei den Flotationsverfahren die festen Rückstände und, soweit sie gesondert anfallen, die feinstkörnigen Schlämme.

In den vergangenen etwa 4 Jahrzehnten wurden große Fortschritte bei der Adaption des Flotationsverfahrens an die spezifischen Belange von Kalirohsalzen erreicht (Rüsberg 1955, /866/; Wilson 1969, /1120/; Alexandrovich 1973, /18/; Wilson & McKee 1973, /1122/; Banks 1976, /59/; 1979, /60/; Arsentiev & Leja 1977, /28/; Bischofberger & Schubert 1978, /105/; Strathdee et al. 1982, /988/; Hrynewhich 1983, /417/; McKercher 1983, /628/; Achorn & Balay 1985, /10/; Cormode 1985, /171/; Beier 1996, /85/; Titkov et al. 1997, /1014/; Perucca & Cormode 1999, /748/; Perucca 2003, /747/; Titkov 2004, /1013/; Werdelmann 2004, /1112/; Dittmeyer et al. 2005, /200/; Moloshtanova & Vishnyakov 2010, /678/; Russel 2011, /867/; Vishnyak, Pozdeev & Turko 2011, /1069/; Vishnyak et al. 2014, /1068/), so dass heute mit dieser Methode der weitaus größte Teil der MOP-Produktion erzeugt wird. Trotz dieser großen Verbesserungen der Flotationsverfahren ist die flotative Aufbereitung feinkörniger und/oder polysulfatischer Rohsalze und solcher mit hohen Gehalten an Unlöslichem nicht oder nur mit erheblichen Ausbringensverlusten möglich und aus Gründen einer nachhaltigen Rohstoffnutzung daher abzulehnen. Insofern haben die – im folgenden Abschnitt 6.1.2 näher zu erläuternden – Löseverfahren heute und auch in der Zukunft ebenfalls eine große Bedeutung.

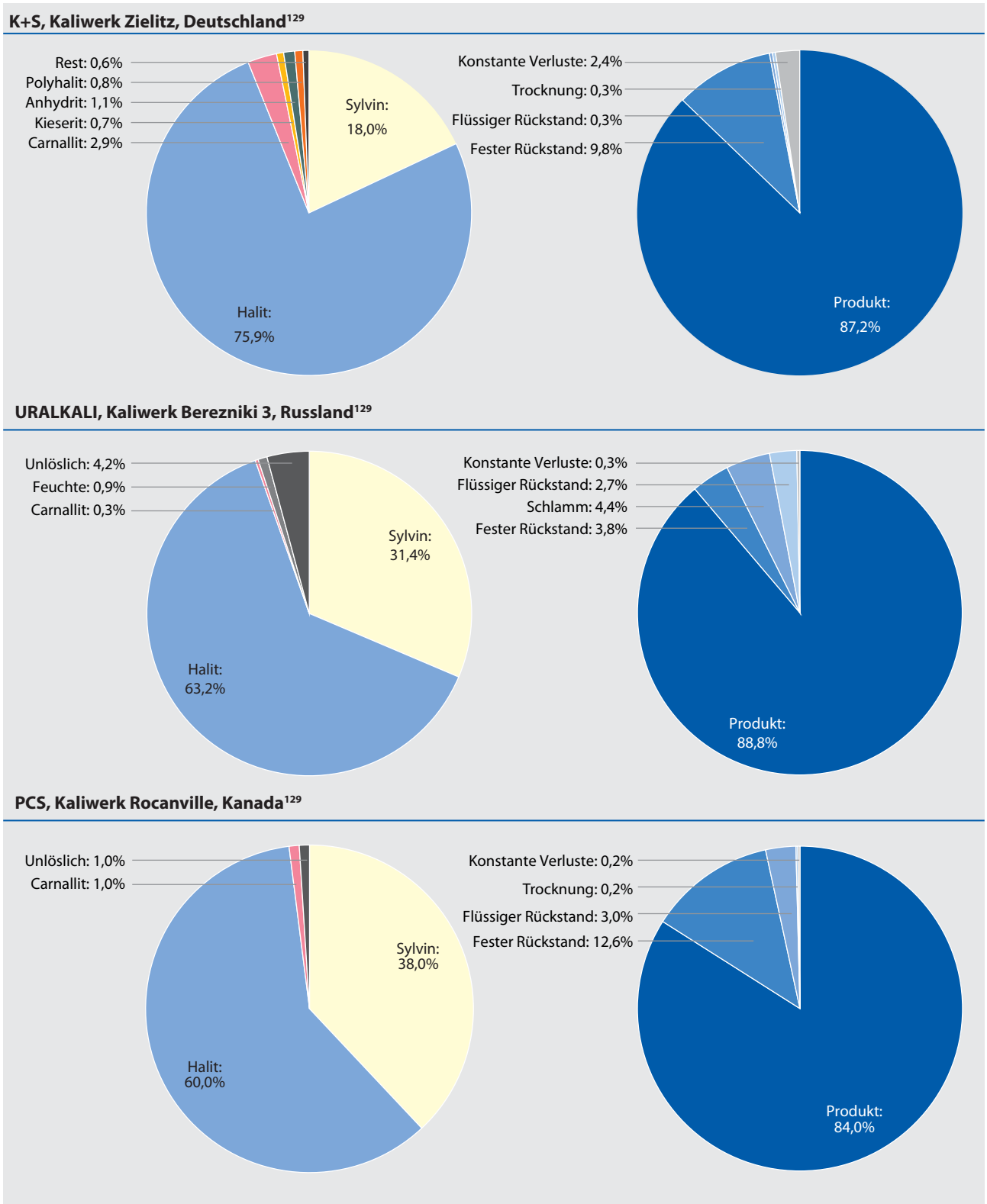


Abbildung 52 Übersicht zur mineralogischen Rohsalzzusammensetzung (links) sowie zur K_2O-Bilanz (rechts) bei der flotativen Aufbereitung für ausgewählte Kalidüngemittelproduzenten

129 Unter den in der K_2O-Bilanz aufgeführten konstanten Verlusten versteht man KCl-Verluste, die bei jedem Aufbereitungsprozess anfallen. Hierzu zählen beispielsweise Staubverluste bei der Produkttrocknung und -lagerung.

6.1.2 Aufbereitung fester Kalirohsalze durch Heißverlösung und anschließende Kühlkristallisation

Die Aufbereitungsmethode des Heißverlösens mit anschließender Kühlkristallisation stellt ein thermisches Trennverfahren dar, welches die unterschiedliche Löslichkeit der einzelnen Rohsalzkomponenten ausnutzt. Dieses Verfahren ist die älteste Aufbereitungsmethode für feste Kalirohsalze überhaupt (Schultz et al. 2000, /904/; 2003, /903/). Die wesentlichen Vorteile liegen in der Möglichkeit zur Aufbereitung stark verwachsener Rohsalze, auch solcher, die neben Halit und Sylvin noch andere, langsam lösliche Salzminerale enthalten (Stahl et al. 2005, /973/), wie dies zum Beispiel oft in sulfatischen Lagerstätten der Fall ist (▸ Abschnitt 4.1). Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass mit Hilfe der Heißverlösung hochreine Produkte mit homogener Korngröße erzeugt werden können.

In den vergangenen Jahrzehnten hat diese Methode umfangreiche Modifizierungen (Autenrieth 1969b, /36/; Wilson 1969, /1120/; 1970, /1121/; Neitzel 1971, /703/; Wilson & McKee 1973, /1122/; Pel'š 1973/75, /741/; Michailov et al. 1979, /647/; Pavlovic-Zuvic et al. 1983, /731/; Pel'š & Holldorf 1983, /742/; Peuschel 1986, /754/; Nancy 2012, /700/) und insbesondere Verbesserungen im thermischen Wirkungsgrad (Kühnel 1953, /569/; Bachmann 1955, /54/; Strathdee et al. 1982, /988/; Titkov, Solov'ev & Mamedov 1982, /1015/; Wolf 1983, /1127/; Achorn & Balay 1985, /10/; Amira et al. 1992, /20/; Strathdee 1992, /986/; 1994, /987/; Schmidt & Hirsch 2012, /889/) und hinsichtlich des Wertstoffausbringens (Autenrieth 1970, /37/; Schultz et al. 2003, /903/; Lozowski 2012, /605/) erfahren, wobei die Lösungs- und Kristallisationsprozesse stets auf die mineralogischen, klimatischen und sonstigen Randbedingungen angepasst wurden.

Die Heißverlösung/Kühlkristallisation nutzt die sich stark verändernde Löslichkeit der Kalisalze bei Aufheizung/Abkühlung einer Lösung im Vergleich zur Löslichkeit der anderen Komponenten. Da die Löslichkeit der einzelnen Salze abhängig von den Konzentrationen der anderen gelösten Bestandteile ist, ist eine Betrachtung als binäre Mischungen (Salz – H_2O) nicht ausreichend. Es braucht somit höhere Systeme, wie zum Beispiel das ternäre System KCl – NaCl – H_2O beziehungsweise das quaternäre System KCl – NaCl – $MgCl_2$ – H_2O, um die Löslichkeit der Salze zu untersuchen. Abbildung 53 zeigt solche höheren Systeme, im unteren Bild die binären Systeme NaCl – H_2O und KCl – H_2O sowie das ternäre System KCl – NaCl – H_2O und im oberen Bild das quaternäre System KCl – NaCl – $MgCl_2$ – H_2O in der Polythermendarstellung (D'Ans 1933, /178/; 1952, /179/; Pel'š 1973/1975, /741/; Usdowski & Dietzel 1998, /1052/).

Folgende, für das Grundverständnis der Löseverfahren wesentliche Sachverhalte sind zunächst dem in Abbildung 53b dargestellten Diagramm zu entnehmen:

- Im binären System KCl – H_2O steigt die KCl-Löslichkeit mit zunehmender Temperatur deutlich an, wohingegen im binären System NaCl – H_2O die NaCl-Löslichkeit mit zunehmender Temperatur nur schwach ansteigt.
- Für das ternäre System KCl – NaCl – H_2O ist die maximale Löslichkeit von KCl beziehungsweise NaCl immer jeweils bei Sättigung der anderen Salzkomponente angegeben.
- Im ternären System KCl – NaCl – H_2O nimmt die KCl-Löslichkeit mit steigender Temperatur deutlich zu, die des NaCl hingegen nimmt schwach ab.
- Die absolut auflösbaren Salzmengen an KCl beziehungsweise NaCl sind bei gleicher Lösungstemperatur im ternären System KCl – NaCl – H_2O geringer als in den jeweiligen binären Systemen.

Daraus ist ersichtlich, dass durch Erhitzen einer KCl-NaCl-gesättigten Lösung KCl-Feststoff aufgelöst werden kann, dagegen NaCl-Feststoff nicht. Andererseits kristallisiert beim Abkühlen aus heißen NaCl- und KCl-gesättigten Lösungen das KCl aus, was letztlich bei der Heißverlösung mit anschließender Kühlkristallisation zur Trennung beider chemischer Komponenten ausneutzt wird. Die KCl-Sättigung einer Lösung sollte demzufolge nach dem Heißlösen so hoch wie möglich sein, um beim Abkühlvorgang die maximale Menge Kristallisat in der bestmöglichen Qualität zu erhalten und auch, um die thermische Energie optimal zu nutzen. Der Sättigungsgrad der heißen Lösung hängt im Wesentlichen von der Temperatur und der Lösezeit ab. Ferner spielt auch der Aufschlussgrad des Rohsalzes eine Rolle, da er das Angebot an kollektiver Lösefläche des zu lösenden Rohsalzes bestimmt. In der Praxis hat sich für die Heißverlösung von Sylvinit eine Korngröße von etwa 4 Millimeter bewährt.

In vielen Lagerstätten sind in einem vorwiegend sylvinitischen Rohsalz meist auch Anteile von Carnallit enthalten und damit nach seiner Zersetzung beim Löseprozess auch geringe Mengen an $MgCl_2$ in der Lösung. Deshalb muss für die Auslegung der Heißverlösungsanlage das quaternäre System KCl – NaCl – $MgCl_2$ – H_2O betrachtet werden:

- Die Isothermen dieses Systems sind unter Annahme steter NaCl-Sättigung in Abbildung 53a dargestellt. Diese ermöglichen wichtige Vorausberechnungen für den jeweiligen Prozess.
- Wie aus Abbildung 53a ersichtlich, sinkt die Löslichkeit von KCl mit steigendem $MgCl_2$-Gehalt, was den Nachteil eines höheren Lösemittelvolumens mit sich bringt und letztlich auch zu höhere spezifischen Anteile an flüssigen Aufbereitungsrückständen führt.

BOX 6.2

Verdampfungskristallisator zur KCl-Kristallisation



Das Bild zeigt einen Zwangsumwälzverdampfer des Herstellers EBNER GMBH & CO. KG.

[Foto mit freundlicher Genehmigung von Ebner GmbH & Co. KG, Eiterfeld, Deutschland]

Die EBNER GMBH & CO. KG, ein familiengeführtes mittelständisches Unternehmen mit Sitz in Eiterfeld, Hessen, Deutschland, fertigt Apparate und Anlagen zur Vergasung, zur Kristallisation und zur Eindampfung beziehungsweise Verdampfung von technischen Lösungen.

Derartige Zwangsumwälzverdampfer werden bei der Kalidüngemittelproduktion zum Beispiel für die Eindampfung von Lösungen nach der Hartsalzverlösung eingesetzt.

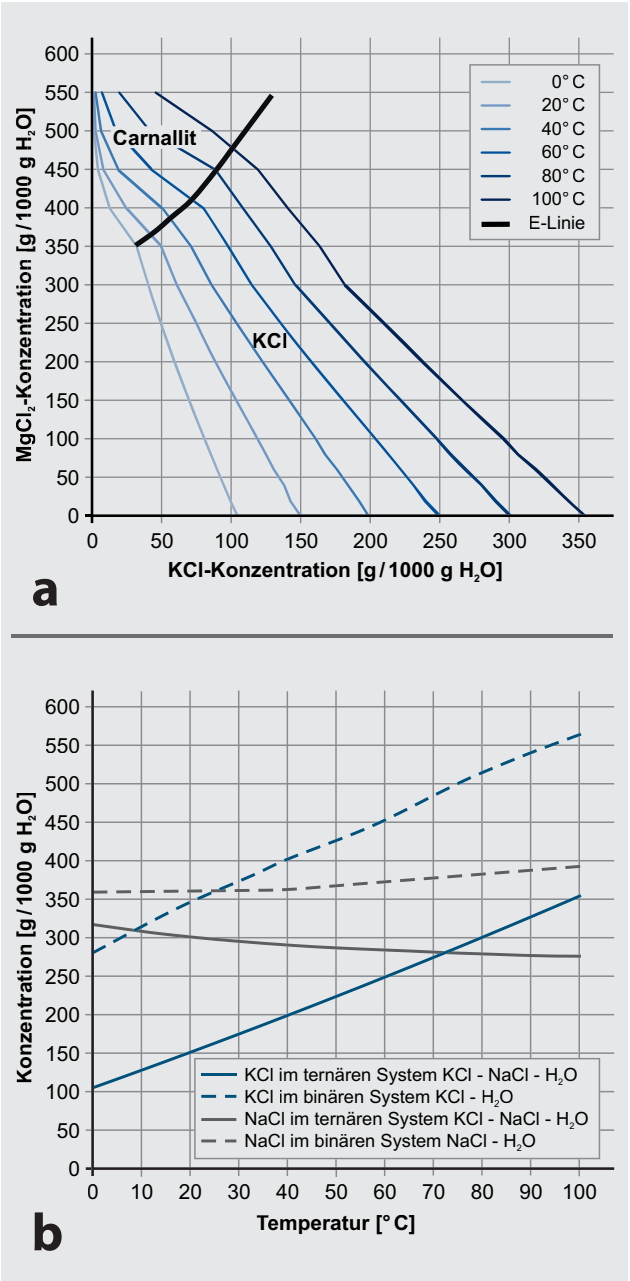


Abbildung 53 Temperaturabhängigkeit der Löslichkeiten von KCl und NaCl: a – Isothermendarstellung des quaternären Systems KCl – NaCl – $MgCl_2$ – H_2O mit Polythermen zwischen 0° C und 100° C (NaCl-Sättigung des Systems vorausgesetzt); b – Temperaturabhängige Löslichkeiten von KCl und NaCl in den jeweiligen binären Systemen KCl – H_2O und NaCl – H_2O sowie im ternären System KCl – NaCl – H_2O

- Auch die NaCl-Löslichkeit verringert sich mit steigendem $MgCl_2$-Gehalt. Gleichfalls aber verschiebt sich auch das Verhältnis der Sättigungskonzentrationen der Alkalichloride NaCl und KCl zugunsten von des letzteren.
- Beim Abkühlen heißer Salzlösungen mit einem hohen $MgCl_2$-Gehalt kommt es ab einem bestimmten $MgCl_2$-Gehalt zur meist unerwünschten Ausscheidung von Carnallit. Dies ist der Fall, wenn die Zusammensetzung der Mischung oberhalb der E-Linie liegt. Demnach ist der $MgCl_2$-Gehalt in der Löselösung neben der Temperatur und der KCl- beziehungsweise NaCl-Sättigung ein wichtiger, bei der Verfahrensauslegung ein zu berücksichtigender und auch im laufenden Betrieb zu steuernder Parameter.

Die Heißverlösung ist sowohl für sylvinitische und carnallitische Rohsalze als auch für Hartsalze anwendbar. Obwohl eine mit NaCl gesättigte Lösung nach dem Erhitzen eine erhebliche Menge an KCl auflösen kann, werden zusätzliches NaCl oder $CaSO_4$ kaum aufgelöst. Diese Bestandteile können mit Filtern und Zentrifugen abgetrennt werden. Während des Abkühlens einer heißen Lösung aus der Heißverlösung wird das gelöste KCl kristallisiert und abgetrennt. Die verbleibende abgekühlte Lösung wird erneut erhitzt und dem Kreislauf als Löselösung in der Heißverlösung wieder zugeführt.

Um den Energieeinsatz möglichst gering zu halten, wird die anfangs zugeführte Wärme beim Abkühlen der heißen gesättigten Lösung in Vakuumkühlanlagen durch Einsatz von Wärmetauschern zur Vorwärmung der Löselösung verwendet. Zudem ist eine effiziente Wärmeisolierung der Apparate nötig. Technisch wird die Heißverlösung entweder im Gegenstrom- oder im Gleichstromverfahren durchgeführt, wobei unabhängig davon meist 2 bis 3 Löseapparate hintereinander geschaltet sind (▸ Abbildung 54).

In der Abbildung 55 ist ein vereinfachtes Verfahrens- und Apparateschema einer Aufbereitung von Kalisalzen mittels Heißverlösung, zunächst für den ersten Schritt der Auflösung der KCl-Anteile des Rohsalzes dargestellt:

Die in der KCl-Kristallisation auf etwa 70° C vorgewärmte Lösung wird in einem Annahmebehälter zwischengestapelt. Anschließend wird diese Lösung zur Erlangung der maximalen Lösespanne in weiteren dampfbeheizten Wärmeübertragern auf maximal 116 – 119° C erhitzt. Die heiße Lösung wird weiter in eine dreistufige Heißverlösung zur Auflösung des Wertstoffes gepumpt, wobei die in Abbildung 55 gezeigte 3-stufige Heißverlösung im Gegenstrom betrieben wird. Die an KCl untersättigte und an NaCl gesättigte Lösung löst KCl aus dem Rohsalz bis zum Erreichen einer etwa 98prozentigen KCl-Sättigung.

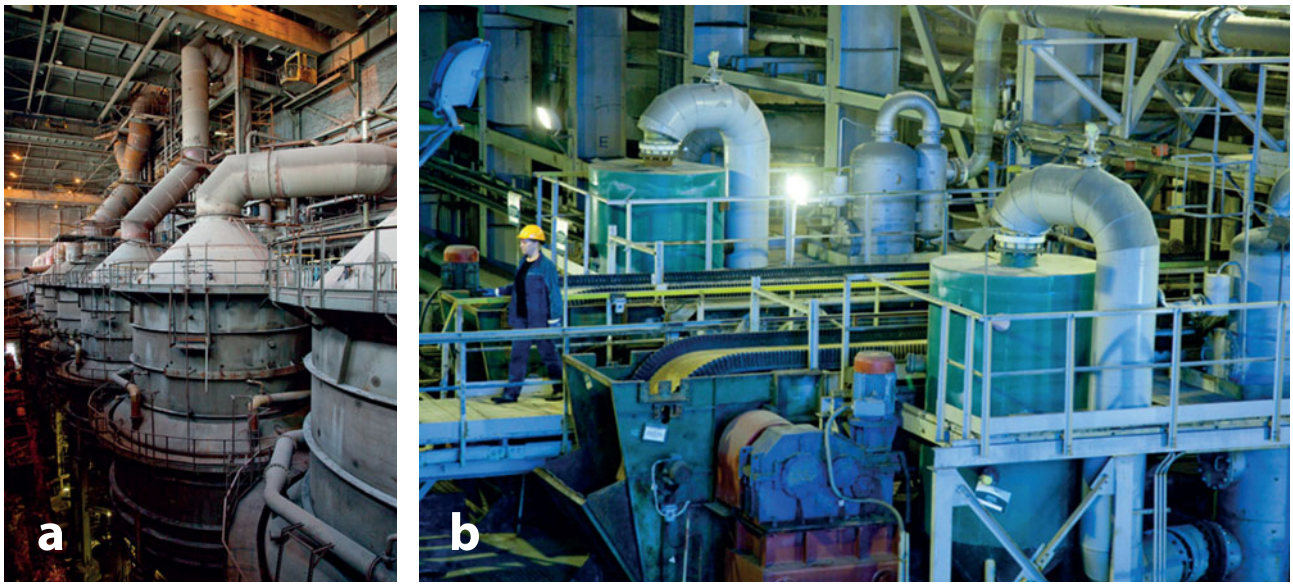


Abbildung 54 Heißverlösung sylvinitischer Rohsalze im Kaliwerk Berezniki 4 von URALKALI, Kalilagerstätte Obere Kama in der Region Perm, Russland; a – Mehrstufige Vakuumkristallisationsanlage; b – Vakuumbandfilter zur Filtration/Entwässerung der Aufbereitungsrückstände [Fotos mit freundlicher Genehmigung von PAO Uralkali, Berezniki, Russland]

Die gesättigte Lösung fließt im freien Gefälle in eine nachgeschaltete Heißklärung. Die Feststoffe, bestehend aus NaCl, ungelöstem KCl und Nebenbestandteilen, werden über das Entwässerungsbecherwerk 1 entwässert und der Maische 2 zugeführt. Hier werden die Feststoffe im Gleichstrom mit der heißen Lösung gemischt. Dadurch werden die KCl-Bestandteile vollständig gelöst. Diese Lösung fließt im freien Gefälle der Maische 1 zu. Der Feststoff – nun Rückstand –, bestehend aus NaCl und nicht nutzbaren Nebenstoffen, wird über das Entwässerungsbecherwerk 2 entwässert und der Wärmeübertragermaische 3 zugegeben. Innerhalb dieses Apparates erfolgt keine weitere Verlösung. In diesem Apparat wird die Wärmeenergie des Rückstandes zur Erwärmung des Filtratstroms genutzt, welcher im freien Gefälle der Maische 2 zufließt. Der Rückstand der Wärmeübertragermaische 3 wird durch das Entwässerungsbecherwerk 3 entwässert und über nachgeschaltete Vakuumbandfilter auf eine Restfeuchte von maximal 8 Prozent reduziert. Der entwässerte Rückstand wird über Gurtbandförderer zur Aufhaldung transportiert. Das Filtrat der Vakuumbandfilter wird über die Wärmeübertragermaische 3 zurück in den Prozesskreislauf gepumpt.

Die an KCl gesättigte Lösung der Maische 1 fließt im freien Gefälle einer Heißklärung zu. Der Klärerunterlauf, bestehend aus unlöslichen Bestandteilen und NaCl, wird auf einem Vakuumbandfilter entwässert und über Förderer zur Aufhaldung transportiert.

Durch eine (Schlamm-)Waschung kann die Effektivität der Verlösung verbessert werden. Der Klärerüberlauf fließt in den nächsten Abschnitt der Vakuumkühlkristallisation.

Nachteile der Heißverlösung liegen im hohen Aufwand an Wärmeenergie und dem im Vergleich mit anderen Aufbereitungsmethoden höheren Wasserverbrauch. Die effektive Leistung (Stromverbrauch) einer Heißverlösung, bestehend aus Vorwärmung der Prozesslösung, Rohsalzzufuhr, Verlösung, Grobschlammabtrennung sowie Rückstandsentwässerung liegt zwischen 17 und 25 Kilowattstunden pro Tonne Fertigprodukt.

Ähnlich wie bei der Heißverlösung wird auch bei der Vakuumkühlkristallisation die unterschiedliche Temperaturabhängigkeit der Löslichkeit von KCl und NaCl ausgenutzt (▸ Abbildung 53b). Ein vereinfachtes Verfahrens- und Apparateschema einer Kühlkristallisation ist in Abbildung 56 aufgezeigt:

Die Lösung des Klärerüberlaufes wird kontinuierlich in den ersten Vakuumkristallisator gepumpt. Eine im Kristallisator integrierte, innenliegende Propellerumwälzpumpe fördert die Lösung durch ein inneres Leitrohr in den oberen Teil des Kristallisators. Durch das im oberen Bereich anstehende Vakuum entspannt sich die Lösung auf den in diesem Bereich vorhandenen Dampfdruck, wodurch ein Teil der Wasserbestandteile ausdampft. Die Verdampfungsenergie wird der Umlauflösung entnommen, infolgedessen eine Abkühlung erfolgt und damit einhergehend eine geringe Übersättigung an KCl im metastabilen Bereich erzeugt wird.

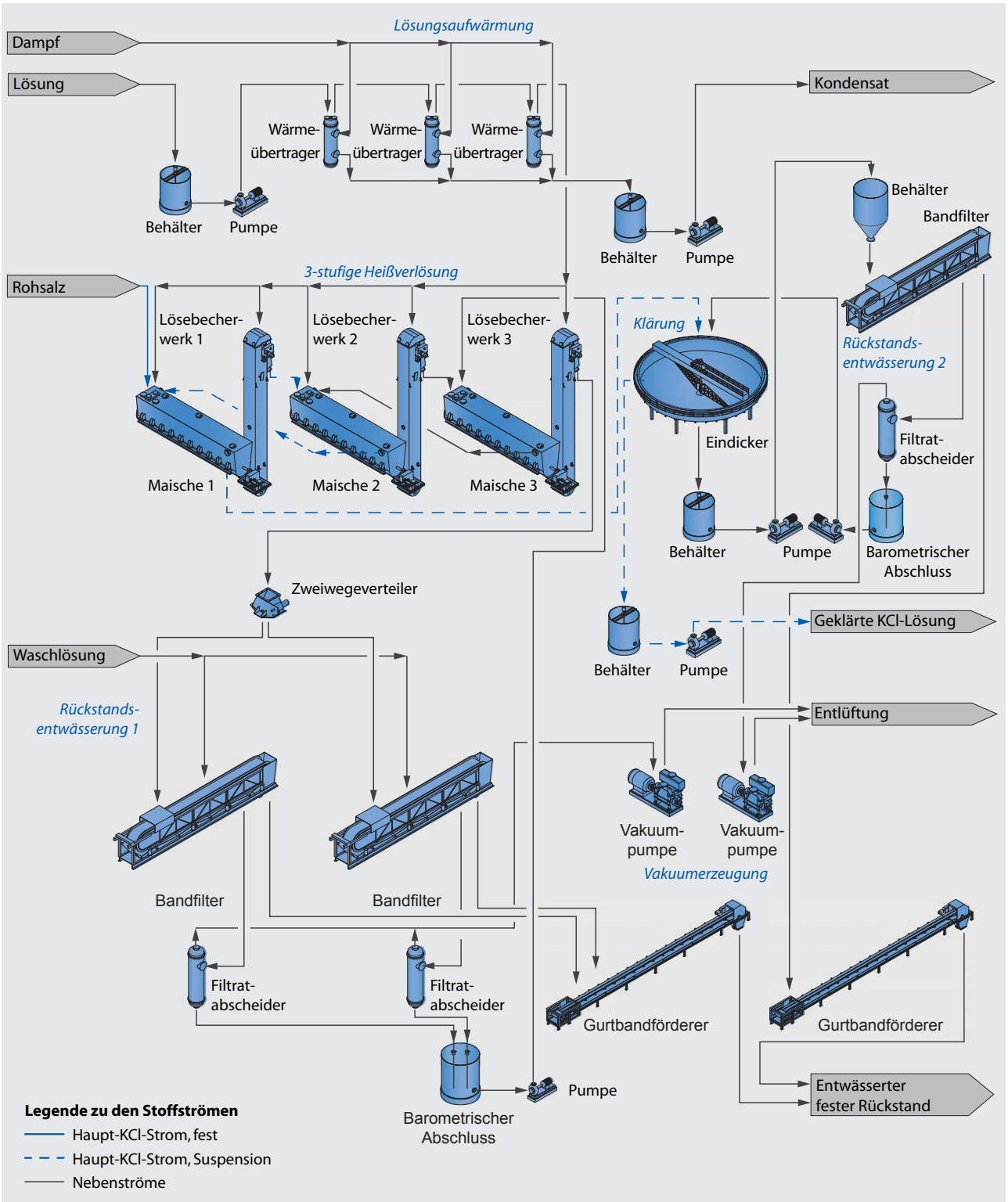


Abbildung 55 Aufbereitung von Kalisalzen mittels Heißverlösung und Eindampf-/Kühlkristallisation im vereinfachten Verfahrens- und Apparateschema, Schritt 1: Auflösung

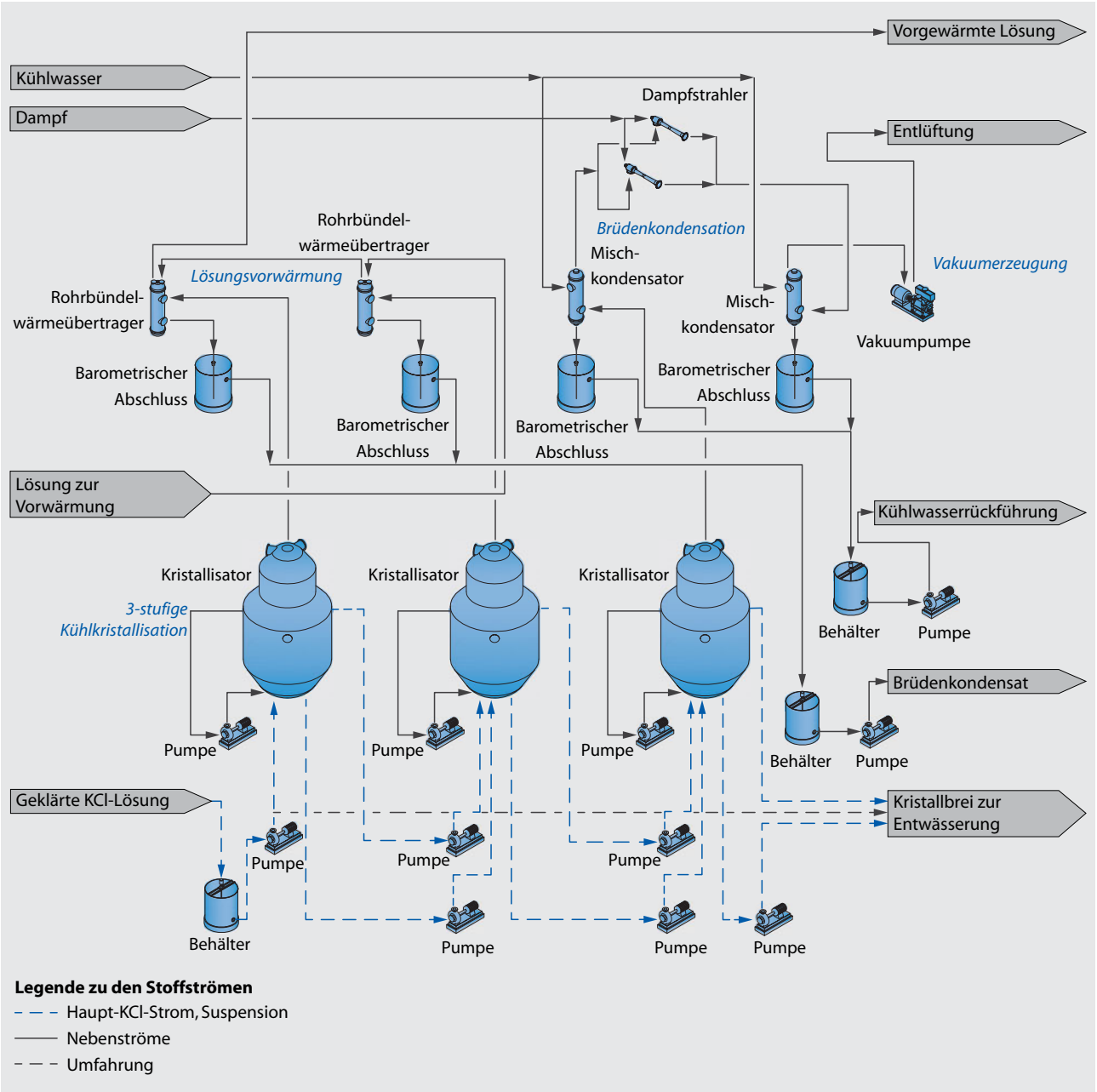


Abbildung 56 Aufbereitung von Kalisalzen mittels Heißverlösung und Eindampf-/Kühlkristallisation im vereinfachten Verfahrens- und Apparateschema, Schritt 2: Kristallisation

Somit beginnt die gewünschte KCl-Kristallisation. Zur Vermeidung einer größeren Übersättigung in der Lösung wird in jedem Kristallisator durch die interne Zirkulation ein Mehrfaches der den Kristallisator durchströmenden Lösung umgewälzt. Die niedrige Drehzahl und die Bauart der Propeller ermöglichen eine schonende Behandlung der mit der Lösung umgewälzten Kristalle. Auf Grund des Dichteunterschiedes der Kristalle zur eingehenden Lösung und der Sogwirkung der Propellerpumpe gelangen die KCl-Kristalle in den unteren Bereich des Verdampfers – den Kristallbereich. Der Kristallbreiabzug aus diesem Bereich erfolgt dichtegeregelt. Um ein Aufwachsen der KCl-Kristalle auf die gewünschte Korngröße zu ermöglichen, wird der Kristallbrei in die nächste Kristallisationsstufe gefördert.

Aus einem weiteren Bereich des Kristallisators – der Klärzone – verlässt die feststofffreie Lösung über den Überlauf die Stufe 1 und wird über eine Pumpe in die nächste Stufe gefördert.

Da aufgrund der Löslichkeitsverhältnisse für KCl und NaCl allein durch die Wasserverdampfung eine NaCl-Sättigung und damit NaCl-Ausfall erreicht werden würde, wird in jedem Kristallisator kontinuierlich ein Teil der verdampften Wassermenge durch direkte Wasserzugabe ersetzt, um eine NaCl-Untersättigung von mindestens 5 Gramm pro Liter zu erreichen. Die Wasserzugabe erfolgt in Abhängigkeit von der verarbeiteten Lösungsmenge und der entsprechenden Temperaturdifferenz der Abkühlung in jedem Kristallisator. Die Zuführung des Wassers erfolgt dabei in einem separaten kleinen äußeren Lösungskreislauf, welcher an jedem Kristallisator vorhanden ist. Durch die stärkere KCl-Untersättigung der kleinen Lösungsmenge in diesem Kreislauf werden die vorhandenen feinen Kristalle und Keime aufgelöst, wodurch eine Vergröberung des Kristallisates erreicht wird.

In diesem sowie in den nächsten nachgeschalteten Kristallisatoren erfolgt eine stufenweise Abkühlung der Lösung auf die Endtemperatur von etwa 35° C. Das Temperaturniveau der Brüden[130] der Kristallisationsstufen 1 und 2 eignet sich zum Einsatz einer rekuperativen Wärmerückgewinnung. Dies geschieht mittels Oberflächenkondensatoren, in welchen der Brüden seine Kondensationswärme an eine sekundär zufließende Lösung abgibt. Der Brüden kondensiert, das Kondensat fließt barometrisch in einen Sammelbehälter und wird mittels einer Pumpe wieder kontrolliert den einzelnen Kristallisationsstufen zur Vermeidung einer NaCl-Übersättigung zugeführt.

Die in der Kristallisationsstufe 3 anfallenden Brüden können wegen der niedrigeren Temperatur nicht mehr für die Lösungsvorwärmung eingesetzt werden. Sie strömen den Mischkondensatoren zu und werden hier mit Rückkühlwasser direkt kondensiert.

Hauptbestandteil des Vakuumsystems ist die Vakuumpumpe, welche die eingeströmte Falschluft und nichtkondensierbare Inertgase sowie anteiligen Brüden aus dem System absaugt und die Druckverhältnisse innerhalb der Kristallisatoren auf dem sich einstellenden Niveau hält. Die Absaugung der Gase erfolgt hierbei jeweils über Dampfstrahlluftsauger an den einzelnen Brüdenkondensationsstufen. In einem Mischkondensator werden die Dampfbestandteile von den nichtkondensierbaren Gasbestandteilen mittels Kühlwasser durch Kondensation abgetrennt. Die gesammelten Dampfkondensate fließen zur Rückkühlung in einen Kühlturm und werden wieder in den Kühlwasserkreislauf eingespeist.

Generell kann umso mehr KCl kristallisieren und damit der Prozessschritt effektiver gestaltet werden, je größer die Abkühlung der Lösung vom Eintritt bis zum Austritt der Kristallisationsapparatur ist. Allerdings ist je nach klimatischen Bedingungen meist nur eine Abkühlung auf 30 bis 40° C sinnvoll, da ansonsten eine aktive Kühlung erforderlich wäre, was zu erhöhtem Energieverbrauch und zu erhöhten Kosten führen würde.

In vielen Werken, insbesondere in Kanada, wo die Flotation dominiert, werden zusätzlich kleinere Heißlöseeinheiten betrieben, um staubförmiges Produkt (< 0,2 mm) oder auch Flotationsrückstände zu verlösen und somit in den Wertstoffkreislauf zurückzuführen.

Eine effiziente Energieausnutzung wird in einem Kristallisationsprozess dadurch realisiert, dass in den ersten Stufen der Kristallisation der ausgedampfte Brüden zur Vorwärmung von Löselösung genutzt wird (Ausnutzung der erhöhten Temperatur und Kondensationswärme des Brüdens). Der Großteil der Kondensate und des bei der Kristallisation verwendeten Kühlwassers kann zwar zurückgewonnen und als Kühl- oder Prozesswasser wiederverwendet werden, beim Kühlwasser ist ein bestimmter Prozentsatz an Verlust jedoch unvermeidbar. Die effektive Leistung (Stromverbrauch) einer Vakuumkühlkristallisation, bestehend aus Lösungsvorwärmung, Kühlkristallisation, Mutterlösungsstapelung sowie Produktentwässerung liegt zwischen 13 und 19 Kilowattstunden pro Tonne Fertigprodukt.

130 Unter Brüden versteht man den bei der Vakuumkristallisation entweichenden Wasserdampf.

BOX 6.3

Spezialpumpen für Salzlösungen mit Feststoffanteilen



Das Bild zeigt eine Pumpenanlage für Salzlösungen mit Feststoffanteilen, deren Kernstück die Kanalrad-Kreiselpumpe vom Typ *KWP* des Herstelles KSB AG ist.

[Foto mit freundlicher Genehmigung von KSB AG, Frankenthal, Deutschland]

Die KSB AG ist ein weltweit operierendes Unternehmen mit Hauptsitz in Frankenthal, Rheinland-Pfalz, Deutschland, und beschäftigt auf allen Kontinenten mit eigenen Vertriebsgesellschaften, Fertigungsstätten und Servicebetrieben mehr als 16.000 Mitarbeiter. Die KSB AG beliefert insbesondere Bergbau-, Energie- und Chemieunternehmen mit Spezialpumpen und Armaturen zum Transport von Flüssigkeits-Feststoff-Gemischen.

Solche oder ähnliche Pumpen sind bei der Kalidüngemittelproduktion in großer Anzahl im Einsatz, unter anderem bei der Flotation oder der Heißverlösung, wo oftmals heiße und gesättigte Salzlösungen mit hohem Feststoffanteil kontinuierlich zu transportieren sind.

Die Vorteile der Heißverlösung liegen in der Erzeugung eines sehr reinen Produktes, wie KCl98 oder KCl99. Außerdem hat die Heißverlösung gegenüber der Flotation (▸ Abschnitt 6.1.1) den Vorzug, dass bei Mischsalzen neben den KCl-Anteilen des Sylvin auch die des Carnallit genutzt werden können.

Gegenüber der Flotation ist die Kalidüngemittelproduktion auf Grundlage der Heißverlösung und anschließenden Kühlkristallisation durch einen meist höheren Wasserverbrauch und größeren Energiebedarf gekennzeichnet, dem jedoch ein oftmals deutlich höheres Ausbringen als Vorteil gegenübersteht.

Bei der Aufbereitung der Kalirohsalze durch Heißverlösung und Kristallisation resultieren die Unterschiede im spezifischen Elektroenergiebedarf vor allem aus der Zusammensetzung des jeweiligen Rohsalzes. Entscheidend ist der Gehalt solcher Bestandteile, welche die Lösespanne des KCl senken. Dies ist im Wesentlichen $MgCl_2$ (▸ Abbildung 53a), aber auch $MgSO_4$ sowie gegebenenfalls im Rohsalz auftretende Anteile von $CaCl_2$. Eine Verminderung der KCl-Löslichkeit erfordert eine größere Menge Löselösung sowie einen erhöhten Eintrag dieser Lösung in den KCl-Kristallisationsprozess. Folglich zirkuliert im gesamten Aufbereitungsabschnitt ein größeres Lösungsvolumen, so dass auch die Leistungen der entsprechenden Pumpen, Rührwerke sowie Zentrifugen beziehungsweise Filtrationseinrichtungen angepasst werden müssen.

Abbildung 57 stellt vergleichend die mineralogische Zusammensetzung von Rohsalzen zweier Kaliwerke dar. Außerdem sind darin die K_2O-Bilanzen abgebildet, wie sie bei Anwendung der Heißverlösung nach dem jeweiligen Stand

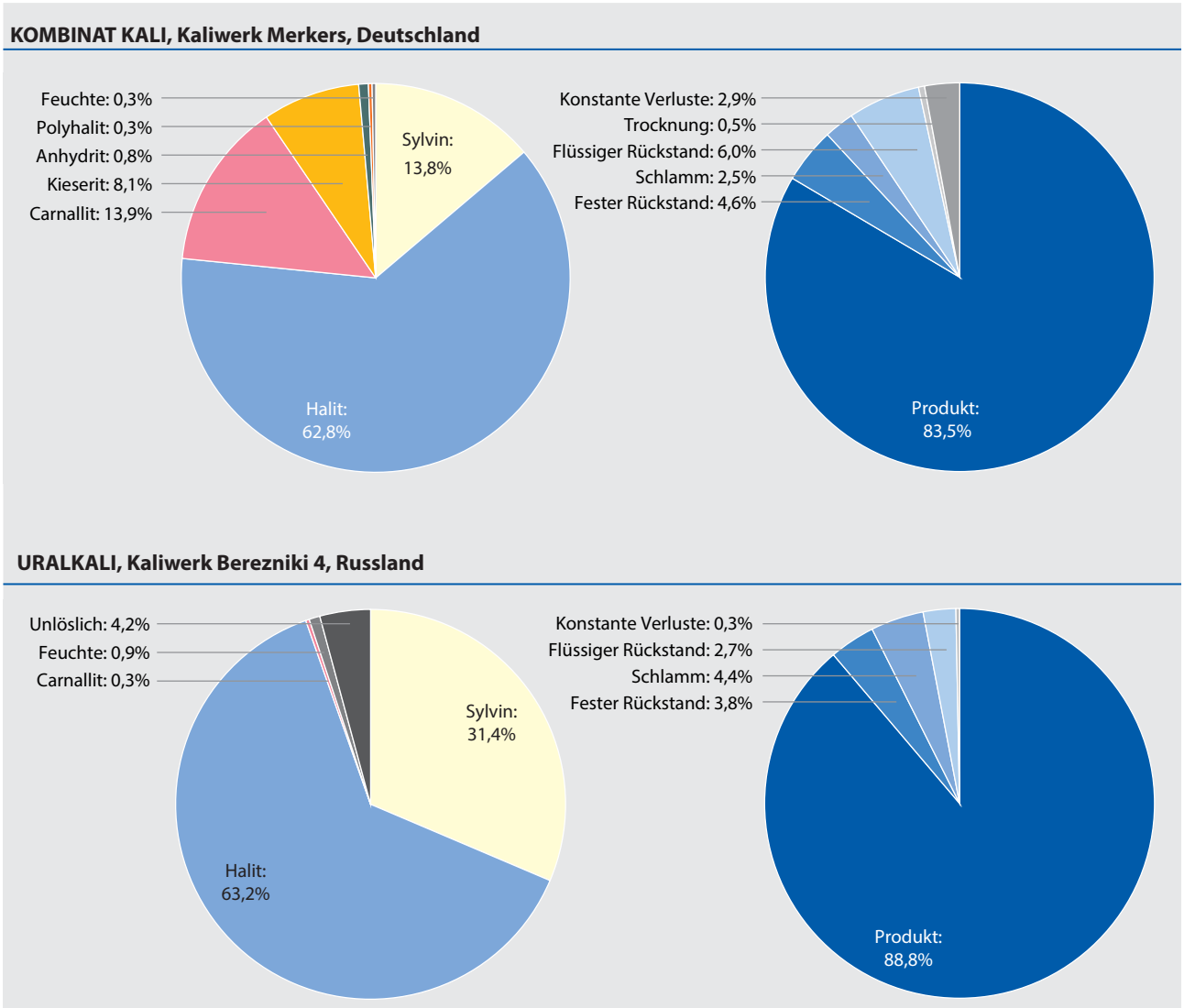


Abbildung 57 Übersicht zur mineralogischen Rohsalzzusammensetzung (links) sowie zur K_2O-Bilanz (rechts) bei der Aufbereitung mittels Heißverlösung am Beispiel des ehemaligen Kaliwerkes Merkers und des Kaliwerkes Berezniki 4 von URALKALI

der Technik früher in den 1980er Jahren erreicht werden konnten beziehungsweise heute im industriellen Routinebetrieb machbar sind (KK 1983a, /526/; ERCOSPLAN 2015, /255/). In Abbildung 57 ist jeweils links die mineralogische Zusammensetzung des Rohsalzes mit prozentualen Anteilen der Kalium-haltigen Komponenten sowie aller wesentlichen Nebenbestandteile aufgeführt. Wie für andere feste Kalirohsalze auch, ist das Mineral Halit in beiden Referenzfällen als nicht Kalium-haltige Nebenkomponente mit dem größten Anteil am Rohsalz vertreten. Rechts im Bild ist die K_2O-Bilanz grafisch veranschaulicht, die zeigen soll, wieviel aus dem im Rohsalz insgesamt verfügbaren Wertstoff K_2O tatsächlich in das oder die Fertigprodukte gelangt und wo entsprechende Verlustquellen auftreten. Diese Angaben sind als Anteile in Prozent der insgesamt verfügbaren Wertstoffmenge im Rohsalz wiedergegeben. Wie bei dem Flotationsverfahren auch, ist ein wesentlicher Teil der Wertstoffverluste bei der Heißverlösung an die festen und flüssigen Rückstände gebunden. Den größten Anteil an den KCl-Verlusten haben bei den Verfahren der Heißverlösung in der Regel die Schlammrückstände.

Tabelle 20 zeigt einen Vergleich zwischen Heißverlösung und Flotation. Es sind dabei die hauptsächlich verarbeiteten Rohsalze, die erzielbaren Produktqualitäten sowie übliche Bereiche für das KCl-Ausbringen und den Energiebedarf für die Aufbereitung gegenübergestellt.

Tabelle 20 Vergleich zwischen Flotation und Heißverlösung

	Heißverlösung	Flotation
Rohsalz	Sylvinit, Carnallitit, Hartsalz, Mischrohsalze	Sylvinit, Carnallitit[131]
Produkte	MOP, KCl98, KCl99	MOP
KCl-Ausbringen [%]	83–89	80–87
Energiebedarf[132] [kWh/$t_{Produkt}$]	650–700	140–230

6.1.3 Aufbereitung fester Kalirohsalze durch elektrostatische Sortierung

Das elektrostatische Trennverfahren ist ein unter dem Namen ESTA®-Verfahren patentiertes Aufbereitungsverfahren zur trockenen Trennung von Mineralsalzen (Autenrieth 1957, /33/; 1969b, /36/; Northcott & Le Baron 1958, /715/; Singewald & Fricke 1966, /939/; 1981, /943/; Singewald 1980a, /933/; 1990b, /937/; Bock 1981, /108/; Dutta 1983, /218/; Larmour 1983, /585/; Ernst 1986, /256/; Fricke 1986, /292/; Brands, Beier & Stahl 2003, /124/). Bei diesem Trennverfahren fallen keine flüssigen Aufbereitungsrückstände an. Abbildung 58 zeigt das Prinzip der elektrostatischen Trennung des Rohsalzes schematisch:

Zunächst ist auch für dieses Verfahren ein Aufschluss des Rohsalzes erforderlich, wobei das Rohsalz soweit aufgemahlen wird, bis die unterschiedlichen Salzminerale weitestgehend getrennt voneinander, das heißt als monomineralische Fragmente vorliegen. Das gemahlene Rohsalz wird anschließend mit speziellen Reagenzien konditioniert, die wiederum die einzelnen Minerale in unterschiedlichem Maße benetzen. Als Folge der intensiven Reibung der Partikel aneinander und verstärkt durch die verschiedenartigen Benetzungsgrade kommt es im Mischapparat zur elektrostatischen Aufladung des Partikelgemenges.

Dieser aufgeladene Partikelstrom wird einem Freifallscheider zugeführt, an dem ein elektrisches Hochspannungsfeld anliegt. Beim freien Fall werden die unterschiedlich stark aufgeladenen Mineralpartikel auch unterschiedlich stark abgelenkt, was eine Sortierung nach Mineralphasen bewirkt. Die Mineralkonzentrate werden am unteren Ende des Freifallscheiders getrennt voneinander aufgefangen. Die Trennschärfe dieses Verfahrens lässt sich durch mehrmaligen Durchsatz der aufgefangenen Mischfraktion durch den Freifallscheider erhöhen.

Die elektrostatische Trennung findet im industriellen Maßstab bislang für die Aufbereitung von Hartsalzen Anwendung, wobei 3 verschiedenartige Trennabläufe erfolgreich waren (Singewald 1991, /938/; Beier 1996, /85/; Stahl et al. 2005, /973/):

ESTA®-Sortierung 1 – Abtrennung von Sylvin in einem ersten und Trennung von Kieserit und Halit im zweiten Durchlauf (Autenrieth 1957, /33/; Le Baron & Knopf 1958, /586/; Singewald & Fricke 1966, /939/).

ESTA®-Sortierung 2 – Abtrennung von Kieserit im ersten und Trennung von Sylvin und Halit im zweiten Durchlauf (Singewald & Fricke 1967, /940/).
Diese Sortierung findet Anwendung zur Herstellung verkaufsfähiger Kieserit-Produkte.

131 hier meist aus solarer Evaporation

132 inklusive Energie für Trocknung und Heizdampf

ESTA®-Sortierung 3 – Abtrennung von Halit im ersten und Trennung von Kieserit und Sylvin im zweiten Durchlauf (Autenrieth & Wirries 1967, /38/; Singewald & Fricke 1968, /941/; 1969, /942/).
Diese Sortierung findet Anwendung zur trockenen Herstellung von Steinsalz-Rückständen und von Kieserit- beziehungsweise Kalisalzkonzentraten.

Der Nachteil des elektrostatischen Verfahrens liegt in seiner Empfindlichkeit gegenüber der Rohsalzzusammensetzung, welche die Trennschärfe im elektrostatischen Feld bereits bei leichten Schwankungen reduzieren kann. Die Rohsalzzusammensetzung sollte daher möglichst konstant sein, beziehungsweise muss bei Veränderungen im Rohsalz das Trennverfahren an die jeweilige Rohsalzzusammensetzung entsprechend angepasst werden. Eine reduzierte Trennschärfe kann erhöhte Wertstoffverluste durch erhöhte Gehalte an Wertstoff im Rückstand zur Folge haben oder auch zu erhöhten Gehalten an Nebenkomponenten in der Wertstofffraktion führen.

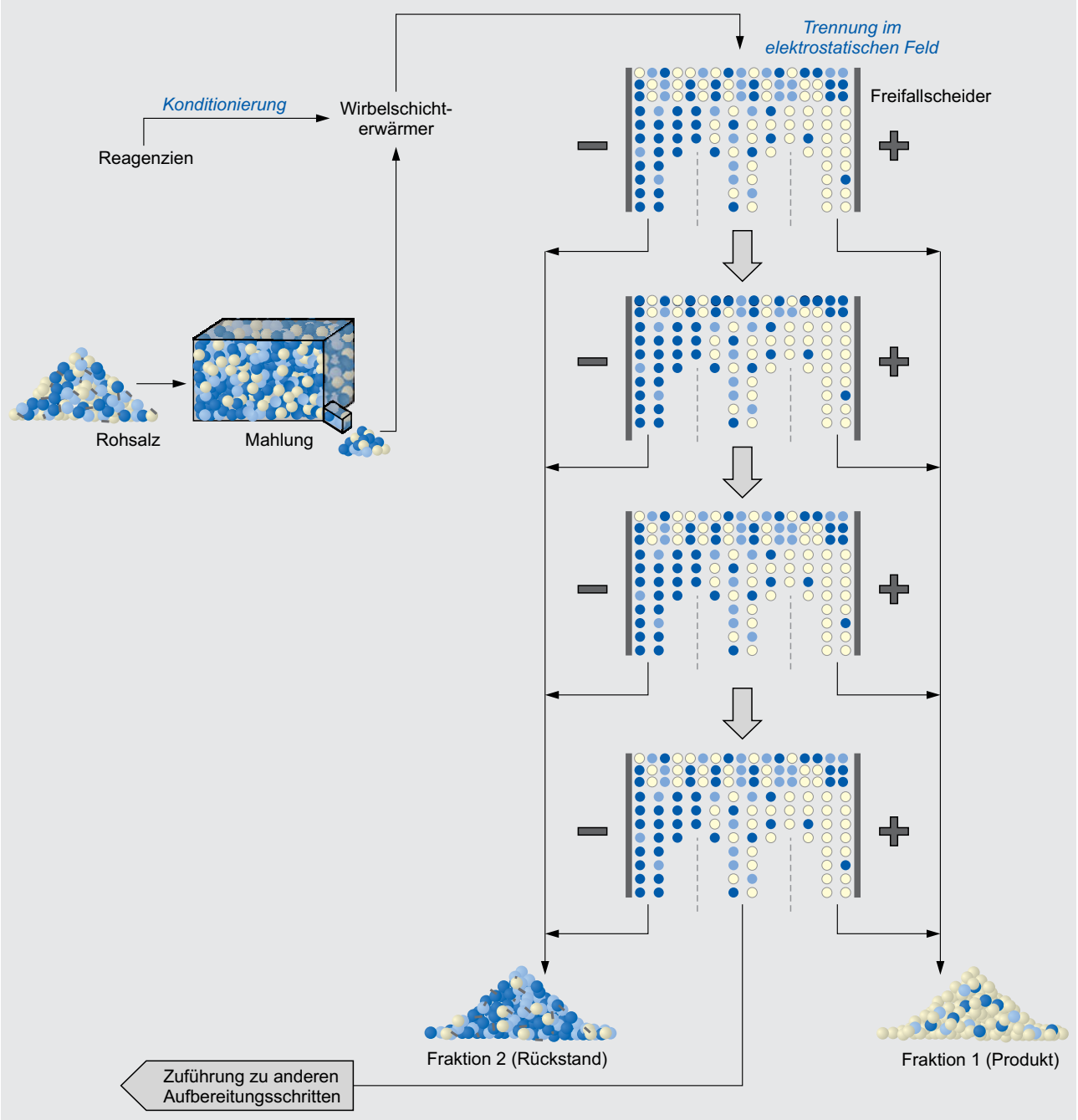


Abbildung 58 Aufbereitung fester Kalirohsalze mittels elektrostatischer Sortierung

6.1.4 Aufbereitung fester Kalirohsalze durch Schweretrennung

Das in der Aufbereitung anderer Rohstoffe weit verbreitete Verfahren der Schweretrennung findet in der Kaliindustrie nur sehr wenig Anwendung. Bezogen auf die Tonnage der damit aufbereiteten Rohsalze ist der Einsatz der Schweretrennung ausgesprochen gering und liegt unter 2 Prozent. Der Grund hierfür ist in der nur geringen Dichtedifferenz (0,18 g/cm³) der üblicherweise aus einem Rohsalz zu trennenden Minerale Sylvin (Dichte: 1,99 g/cm³) und Halit (Dichte: 2,17 g/cm³) zu sehen. Genetisch verursacht, bilden beide Minerale vielfach intensive Ver- und Überwachsungen, so dass auch Kornfragmente mit Korngrößen kleiner 1 Millimeter vielfach Mischdichten aufweisen, was eine Trennung nach der Schwere behindert. Um eine Schweretrennung ein Rohsalz mit monomineralischem Fragmenten zuzuführen, müsste es in den meisten Fällen derart fein aufgemahlen werden, dass die Fragmentgröße unterhalb der für ein Fertigprodukt üblichen liegt.

Lediglich der Kalidüngemittelproduzent MOSAIC betreibt im Kaliwerk Esterhazy K2, Saskatchewan, Kanada eine Anlage, wo sehr feinkörnige Kornfraktionen von Halit und Sylvin getrennt werden. Dieses Verfahren erfolgt in konzentrierten NaCl-KCl-Lösungen, deren Dichtestabilisierung durch Zusatz von Magnetit (Fe_3O_4) erreicht wird.

Langbeinit (2,83 g/cm³) hingegen weist eine größere Dichtedifferenz zu seinen Gefügegenossen Halit und Sylvin auf. Der Struktur seines Kristallgitters geschuldet, sind epitaktische Auf- und Überwachsungen zwischen dem Doppelsulfat Langbeinit und Sylvin beziehungsweise Halit höchst selten. Beides begünstigt seine Eignung für eine Separierung im Schweretrennprozess. Diese Methode wird von MOSAIC in seinem Kaliwerk Carlsbad, New Mexico, USA, erfolgreich angewendet.

6.1.5 Vergleich der Aufbereitungsverfahren für feste Rohsalze

Die beiden wichtigsten Aufbereitungsverfahren für feste Kalirohsalze aus der Bergmännischen Gewinnung, die Flotation und die Heißverlösung, sind mit ihren wesentlichsten Verfahrensschritten in Abbildung 59 gegenübergestellt. Hauptkriterium für die Auswahl einer bestimmten Methode zur Aufbereitung fester Kalisalze ist die natürliche Rohsalzbeschaffenheit, vor allem der verfügbare Wertstoffgehalt sowie die Verteilungsgesetzmäßigkeiten des Wertstoffes und der anderen Bestandteile im polymineralischen Korngefüge. Gemeinsam mit den vom Markt vorgegebenen Anforderungen an die Fertigprodukte diktieren diese lagerstättengeologischen Eingangsgrößen und die für den konkreten Standort zutreffenden klimatischen, infrastrukturellen und logistischen Randbedingungen die Auswahl der Methoden, Verfahren und Anlagen für die Rohsalzaufbereitung sowie auch für die mögliche Produktion von Nebenprodukten.

Für ein sylvinitisches Rohsalz mit relativ geringem $MgCl_2$-Gehalt empfiehlt sich in aller Regel ein flotatives Aufbereitungsverfahren, da der Energieaufwand, verglichen mit einer Heißverlösung des Rohsalzes und einer anschließenden Kühlkristallisation des KCl, deutlich geringer ist. Dies kann recht gut an der Gegenüberstellung der Energiebilanzen der ehemaligen Kaliwerke Roßleben (Sylvinitflotation) und Merkers (Heißverlösung eines gemischten Rohsalzes bestehend aus Sylvinit und Carnallitit) verdeutlicht werden. Ist der Bedarf an Elektroenergie in beiden Werken mit 72,5 Kilowattstunden pro Tonne Fertigprodukt gleich, so lag der Bedarf an Heizdampf im Kaliwerk Merkers mit 8,2 Tonnen pro Tonne Fertigprodukt (KK 1983a, /526/) deutlich über demjenigen des Werkes in Roßleben mit 1,6 Tonnen pro Tonne Fertigprodukt (KK 1985, /529/). Jedoch kann eine komplexere Zusammensetzung des sylvinitischen Rohsalzes den recht einfach anmutenden Flotationsvorgang deutlich erschweren. Sind größere Mengen Anhydrit oder tonhaltige Bestandteile enthalten, können diese bei einer Flotation in den KCl-haltigen Flotationsschaum gelangen und somit die Produktqualität negativ beeinflussen. Sie müssen vor der Flotation entfernt werden, da dies aufgrund ihres un- beziehungsweise schwerlöslichen Charakters durch spätere Deckprozesse nicht mehr möglich ist. Hierbei haben sich Mahl- und Siebvorgänge sowie eine vorgeschaltete sogenannte Schlammflotation etabliert. Unter Umständen kann in solchen Fällen auch die Heißverlösung der Flotation vorgezogen werden. Die unlöslichen Bestandteile des Rohsalzes, wie Anhydrit und Tonminerale, können in dem Fall weitgehend, aber nicht vollständig durch Klärung der heißen Lösung entfernt werden.

Ein weiterer Vorteil der Heißverlösung gegenüber der Flotation kommt bei der Aufbereitung von gemischten Rohsalzen zum Tragen. Während bei der Heißverlösung sowohl sylvinitische als auch carnallitische Bestandteile gleichzeitig erfasst werden, sind mittels Flotation lediglich die sylvinitischen Komponenten für die Aufbereitungsmethode zugänglich. Eine flotative Aufbereitung von Sylvinit beziehungsweise Carnallitit erfolgt grundsätzlich unterschiedlich. Eine Aufbereitung von Carnallitit mittels Flotation und anschließendem Deckprozess ist meist mit einem geringeren Ausbringen verbunden. Folglich werden rein carnallitische Rohsalze oft mittels Heißverlösung und Kristallisation aufbereitet.

Soll hingegen ein Mg-reiches Sylvinitrohsalz flotativ verarbeitet werden, sollte der $MgCl_2$-Gehalt der umlaufenden Betriebslösung relativ konstant auf niedrigem Niveau gehalten werden (etwa 50 g/l $MgCl_2$), um das Flotationsresultat nicht negativ zu beeinflussen. Überschüssiges $MgCl_2$ wird durch kontinuierlichen Abstoß von Lösungsteilen aus dem Aufbereitungsprozess entfernt.

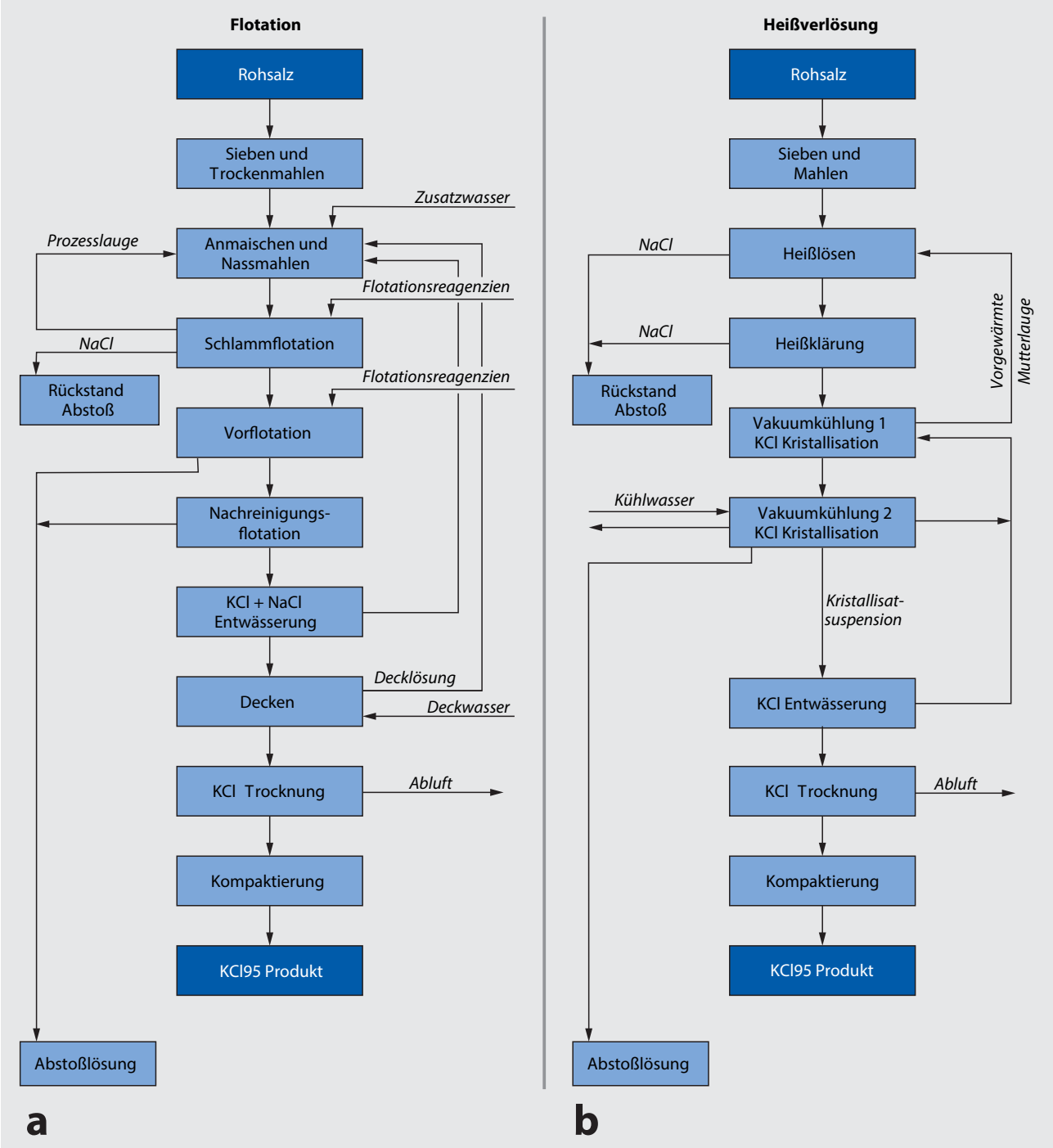


Abbildung 59 Gegenüberstellung der wesentlichsten Verfahrensschritte für die beiden wichtigsten Aufbereitungsmethoden fester Kalirohsalze: (a) Flotation und (b) Heißverlösung

Hieraus ergeben sich mehrere Nachteile: Einerseits geht vermehrt KCl verloren, da die umlaufende Prozesslösung, die sogenannte Mutterlauge, an KCl gesättigt ist, was sich natürlich nachteilig auf das Wertstoffausbringen dieser Aufbereitungsmethode auswirkt. Andererseits müssen diese aus dem Lösungsumlauf abgezogenen Teile der Prozesslösung beseitigt werden, was letztlich den maßgeblichen Nachteil darstellt. Darüber hinaus muss für folgende Lösungsumläufe die so abgestoßene Lösungsmenge durch frisches Prozesswasser ersetzt werden.

Weiterhin ist auch die Heißverlösung gegenüber hohen $MgCl_2$-Gehalten des Rohsalzes sensibel: Ein erhöhter $MgCl_2$-Gehalt der Umlauflösung hat zur Folge, dass diese weniger KCl lösen kann. Somit wird auch hier eine größere Wassermenge zur Aufbereitung benötigt, welche im weiteren Verlauf auch beseitigt werden muss. Um die zu entsorgende Menge an Abstoßlösung zu reduzieren, kann diese thermisch oder standortgegeben solar eingedampft/evaporiert werden. Bei der thermischen Eindampfung hat man jedoch wiederum einen zusätzlichen, nicht geringen Energiebedarf zu berücksichtigen.

Die angestrebte Produktqualität hat ebenfalls Einfluss auf die Verfahrensauswahl. Ein Standard-KCl-Produkt mit 60 Prozent K_2O kann sowohl flotativ als auch durch Heißverlösung produziert werden. KCl in einer höheren Reinheitsstufe (KCl98 oder KCl99), wie es zum Beispiel zur Synthese von Kalium-haltigen Feinchemikalien benötigt wird, kann durch Lösekristallisationsverfahren hergestellt werden, wie zum Beispiel im Kaliwerk Berezniki 4, Obere Kama, Region Perm, Russland.

Wie im Abschnitt 6.1.3 sowie Abschnitt 6.1.4 erläutert wurde, sind die Methoden der elektrostatischen Trennung und der Schweretrennung nicht derart universell einsetzbar wie die Flotations- und Löseverfahren, weshalb sie nicht in die vergleichende Betrachtung einbezogen wurden.

6.2 Aufbereitung von technischen Lösungen aus der Soltechnischen Gewinnung von festen Kalirohsalzen

Von den weltweit insgesamt 69 Aufbereitungsanlagen, die im Jahr 2014 im planmäßigen industriellen Betrieb zur Kalidüngemittelproduktion genutzt wurden, verarbeiten 5 Standorte technische Lösungen aus der Soltechnischen Gewinnung fester Rohsalze aus dem geologischen Untergrund (▸ Tabelle 21). In 3 dieser Aufbereitungsanlagen werden die Produktionslösungen einer technischen Eindampf-/Kühlkristallisation unterzogen. Für die an 2 Standorten im sogenannten *secondary mining* soltechnisch gewonnenen KCl-konzentrierten Produktionslösungen kommt eine natürliche Kühlkristallisation zum Einsatz. In einem Fall erfolgt die Aufbereitung der technischen Lösungen durch eine Kombination aus solarer Eindampfung und Flotation. Um verkaufsfähige Kalidüngemittelprodukte zu erzeugen, sind auch in all diesen Fällen weitere Hilfsprozesse erforderlich.

Die Methode der Soltechnischen Gewinnung von festen Kalirohsalzen aus dem geologischen Untergrund wurde im Abschnitt 5.1.2 ausführlich beschrieben. Im Ergebnis des Solprozesses werden technische Lösungen, die sogenannten Produktionslösungen über Tiefbohrungen nach über Tage gepumpt und der weiteren Aufbereitung zu verkaufsfähigen Fertigprodukten zugeführt. Diese technischen Lösungen aus der Soltechnischen Gewinnung sylvinitischer oder carnallitischer Rohsalze können durch Evaporation und anschließende Kristallisation (▸ Abschnitt 6.1.2) verarbeitet werden. Die dabei erforderlichen Verfahrensschritte sollen hier im Überblick vorgestellt werden.

In gewisser Weise ist die Soltechnische Gewinnung fester Rohsalze mit den Prozessabläufen bei einer Heißverlösung fester bergmännisch gewonnener Rohsalze vergleichbar (▸ Abschnitt 6.1.2), wobei hier jedoch der Lösevorgang selbst unter Ausnutzung der Lagerstättentemperatur bereits im Abbauhorizont stattfindet (▸ Abbildung 60). Als nächster Schritt muss die Salzlösung bis zur KCl-Sättigung eingedampft werden. Hierzu gibt es 2 Varianten:

Zum einen kann dies mittels einer technischen Methode unter Verwendung von Vakuumverdampfern erfolgen (▸ Abbildung 60a). Nachteilig an dieser Methode ist ein erhöhter Energiebedarf zur Aufheizung der Lösung. Alternativ dazu kann dieser Prozess auch durch die solare Evaporation in Lösungsbecken erfolgen, soweit die klimatischen Bedingungen dies an einem konkreten Produktionsstandort erlauben (▸ Abbildung 60b). Zu beachten ist dabei aber auch die sehr hohe Flächeninanspruchnahme für die Evaporationsbecken. Ferner ist der Umstand wichtig, dass die mittels solarer Evaporation verdampfte Wassermenge für ein Recycling im Aufbereitungsprozess nicht zur Verfügung steht, was insbesondere in semiariden und ariden Gebieten, wo die solare Eindampfung an sich besonders effektiv zu nutzen wäre, aufgrund des dort oftmals herrschenden Wasserdefizits, problematisch ist. Demgegenüber steht zweifellos der Vorteil, die Sonne als kostenlose Energiequelle nutzen zu können, weshalb hier auch sehr wertstoffarme Rohstoffe genutzt werden können. Bei einer technischen Eindampfung hingegen ist der Großteil des verdampften Wassers über Kühler rückgewinnbar, was sich positiv auf die Wasser- und in der Regel auch auf die Energiebilanz auswirkt. Um eine ökonomisch sinnvolle Entscheidung bezüglich der Aufbereitungsmethode anhand energie- und wasserrelevanter Aspekte treffen zu können, müssen auch die Verfügbarkeit und die Kosten beider Ressourcen am konkreten Produktionsstandort bedacht werden.

Erfolgt die Aufbereitung der Produktionslösung weitgehend mittels technischer Eindampfung, so schließt sich eine Kühlkristallisation analog dem Verfahren einer Heißverlösung/Kristallisation an (▸ Abbildung 60a).

Die Produktionslösung ist notwendigerweise an KCl untersättigt und kann daher bis zur KCl-Sättigung eingedampft werden. Dabei werden erhebliche Mengen von Wasser entfernt, was zunächst zur Abscheidung von festem NaCl aus dieser Lösung führt. Dieses wird von der heißen Lösung abgetrennt, welche danach der Vakuumkühlkristallisation zugeführt wird. Das in der heißen Lösung gelöste KCl wird dabei auskristallisiert und ergibt nach Abtrennung der Lösung und Trocknung (▸ Abschnitt 6.4) sowie gegebenenfalls einer weiteren Veredlung zur Partikelvergröberung (▸ Abschnitt 6.5) das gewünschte KCl-Produkt.

Tabelle 21 Aufbereitungsanlagen der Kalidüngemittelproduktion weltweit, an denen technische Lösungen aus der Soltechnischen Gewinnung fester Kalirohsalze zu Fertigprodukten verarbeitet werden (▸ Tabelle 1)

Produzent/Standort[5]	Art der Aufbereitung soltechnisch gewonnener technischer Lösungen
PCS	
Patience Lake	Natürliche Kühlkristallisation während der Wintermonate
MOSAIC	
Belle Plaine	Technische Eindampf-/Kühlkristallisation und für einen Teilstrom natürliche Kühlkristallisation
Hersey	Technische Eindampf-/Kühlkristallisation
INTREPID	
Moab	Solare Evaporation und natürliche Kristallisation sowie Flotation
DEUSA	
Kehmstedt/Bleicherode	Technische Eindampf-/Kühlkristallisation

Abbildung 61 zeigt ein vereinfachtes Verfahrens- und Apparateschema zur Aufbereitung von natürlichen oder technischen Lösungen durch thermische Eindampfung:

Wie oben bereits ausgeführt, besteht das Ziel dieser mehrstufigen Eindampfung darin, NaCl in fester Form von der KCl-haltigen Lösung abzutrennen. Dazu ist eine Voreindickung der eingedampften Suspension und darauf folgend die Entwässerung des gewonnenen NaCl-Bestandteils dieses Aufbereitungsabschnitts notwendig. Zwecks effektiver Wärmenutzung wird die einzudampfende Lösung zunächst über Wärmeübertrager durch den Brüden der wärmeren Stufen der Kühlkristallisation beziehungsweise durch den Brüden einer eventuell vorhandenen Entspannungsverdampfung vorgewärmt und anschließend in die kälteste Verdampferstufe gegeben. Die Eindampfstufen werden entweder mit dem Brüden der jeweils nachfolgenden heißeren Stufe oder mit Frischdampf erhitzt. Unter entsprechenden Druckverhältnissen wird damit die Lösung in den Verdampfern zum Sieden gebracht. NaCl kristallisiert dabei aus, da somit der Lösung Wasser entzogen wird. Über mehrere Eindampfstufen wird aus der Eingangslösung schrittweise eine Suspension mit steigendem NaCl-Feststoffgehalt. Die NaCl-Suspension verlässt die Eindampfung aus der heißesten Eindampfstufe und wird in einen Eindicker gepumpt. Im Oberlauf des Eindickers fällt die geklärte heiße Lösung an, welche zur Kristallisation geführt wird. Der Unterlauf des Eindickers wird anschließend zur Produktentwässerung gepumpt und zentrifugiert. Ein Gurtbandförderer transportiert das feste NaCl ab. Die Anzahl der Stufen einer Eindampfung richtet sich im Wesentlichen nach der KCl-Sättigung der Eingangslösung und der Konzentration anderer Komponenten sowie ihrer Temperatur.

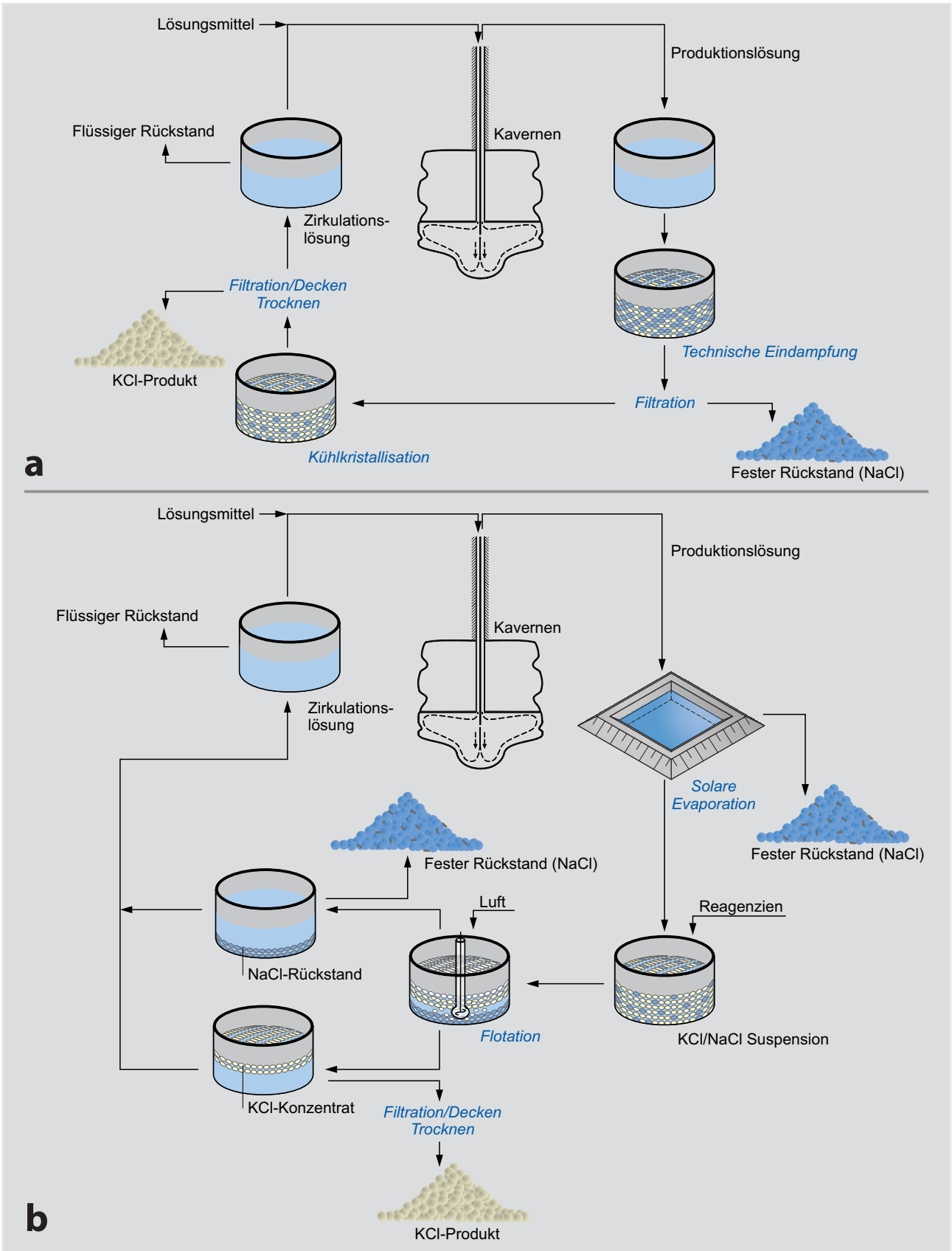


Abbildung 60 Prinzipskizzen zur Aufbereitung technischer Lösungen aus der Soltechnischen Gewinnung fester Kalirohsalze aus dem geologischen Untergrund: a – mittels technischer Eindampf- und Kühlkristallisation; b – durch die Verknüpfung solarer Evaporation und Kristallisation mit der Flotation der Kristallisate

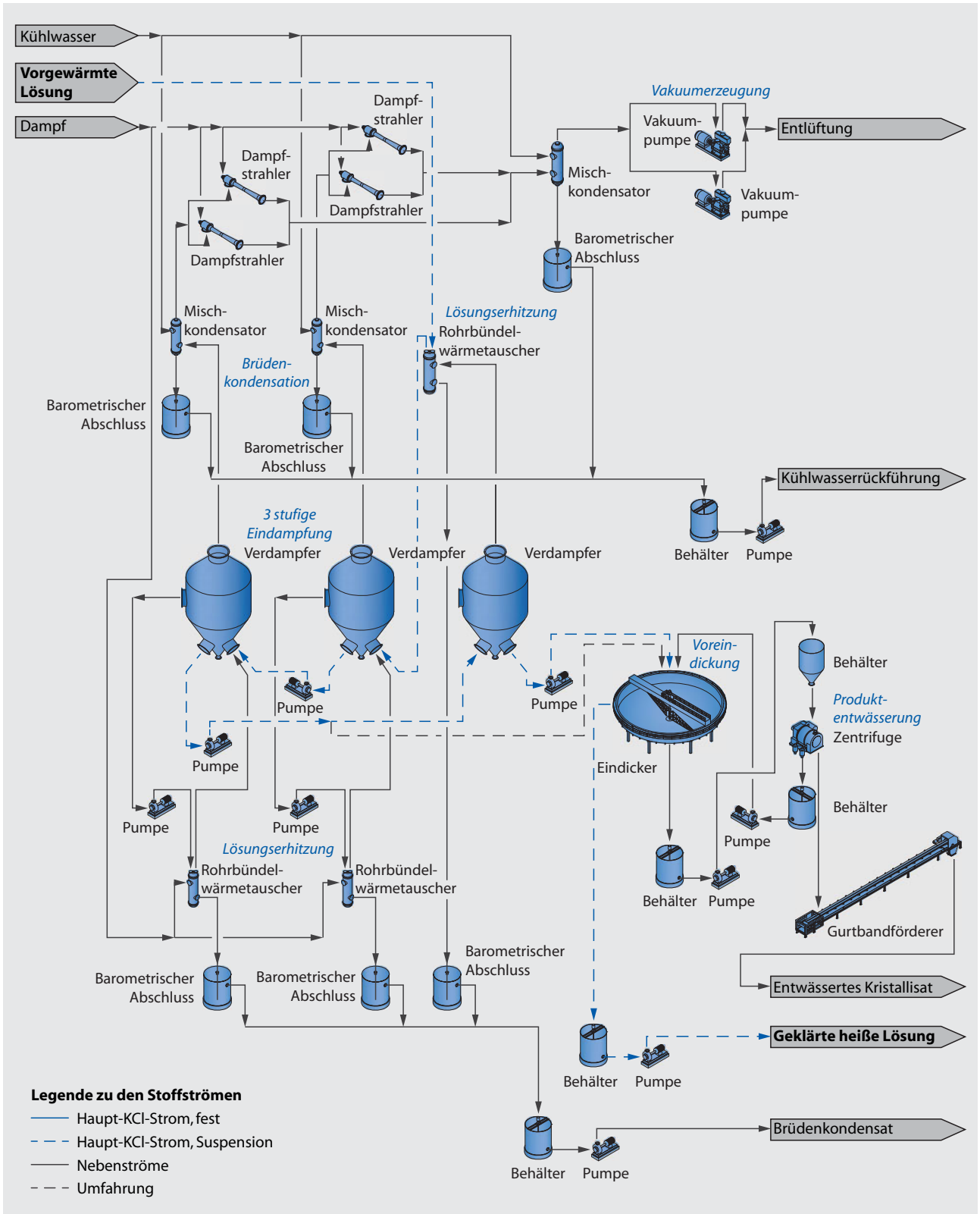


Abbildung 61 Aufbereitung von natürlichen oder technischen Lösungen durch thermische Eindampfung im vereinfachten Verfahrens- und Apparateschema

Alternativ zur technischen Eindampfung kann ein erster Aufbereitungsschritt zur Konzentrationserhöhung der geförderten Produktionslösung auch in einer solaren Evaporation bestehen (▸ Abbildung 60b), falls am Gewinnungsstandort dafür geeignete klimatische Bedingungen vorhanden sind (▸ Abschnitt 4.3). Zum einen kann die solare Evaporation zur Vorabtrennung von NaCl genutzt werden, zum anderen kann eine vollständige Evaporation auf diese Weise erfolgen:

Bei lediglich einer Vorabtrennung von NaCl würde danach die Aufbereitung der verbleibenden Lösung – wie oben beschrieben – durch weitere technische Eindampfung und Kristallisation erfolgen. Wird eine Lösung mit niedrigem Gehalt an $MgCl_2$ zur solaren Eindampfung geführt, dann kann das resultierende Kristallisat durch KCl-Flotation (▸ Abschnitt 6.1.1) aufbereitet werden.

Wird eine $MgCl_2$-reiche Lösung zur solaren Evaporation verwendet, entsteht ab einem bestimmten $MgCl_2$-Gehalt ein Carnallit-haltiges Kristallisat. Dieses kann anders als bei der KCl-Flotation durch ein Drücken des Carnallit und die Flotation des Halit getrennt werden. Das Carnallit-Konzentrat wird anschließend durch Zersetzung zu einem Zersetzungs-KCl-Zwischenprodukt aufbereitet. Das KCl-Zwischenprodukt muss dann über weitere Deck-, Wasch- und Trocknungsprozesse (▸ Abschnitt 6.4) sowie gegebenenfalls einer weiteren Veredlung zur Partikelvergröberung (▸ Abschnitt 6.5) zu einem verkaufsfähigen Fertigprodukt aufbereitet werden.

Die zuvor beschriebenen Verfahren zur Aufbereitung technischer Lösungen finden derzeit an den Standorten Belle Plaine in Saskatchewan, Kanada; in Moab, Utah, USA, und in Hersey, Michigan, USA, sowie in Kehmstedt/Bleicherode, Deutschland, Anwendung. Trotz der prinzipiellen Übereinstimmung wurden jedoch auch gewisse Modifikationen entsprechend der am individuellen Standort bestehenden lagerstättengeologischen (▸ Abschnitt 4.1), klimatischen (▸ Abschnitt 4.3), infrastrukturellen und logistischen Randbedingungen (▸ Abschnitt 4.4) erforderlich.

Diese standortspezifischen Optimierungen der Aufbereitungsverfahren zeigen sich besonders im Hinblick auf die Anpassung an respektive die Ausnutzung der besonderen klimatischen Bedingungen: In Saskatchewan nutzt man die sehr kühlen und trockenen Winter zur natürlichen Kühlkristallisation[133] der (nahezu) an KCl gesättigten Produktionslösungen aus dem sogenannten *secondary mining* (▸ Abschnitt 5.1.2) aus. Diese technischen Lösungen werden in Speicherbecken gelagert, wo während der sehr kalten Wintermonate des Kontinentalklimas beim Abkühlen KCl kristallisiert. Hierbei entsteht aufgrund des Löslichkeitsverhaltens von NaCl und KCl ein sehr reines KCl-Kristallisat, da auf dem Abkühlpfad der Lösung geringe Mengen von NaCl wieder aufgelöst werden.

Im Kaliwerk Moab, Utah, USA, hingegen nutzt man die hohen natürlichen Verdunstungsraten des ariden Klimas zur solaren Evaporation der Produktionslösungen aus. Eine Besonderheit stellt hier der Zusatz von Blaufärbemittel in die Verdunstungsbecken dar, um einen höheren Ausnutzungsgrad der Sonnenenergie zu erreichen.

Wesentliche Voraussetzung für die Anwendbarkeit der solaren Evaporation oder auch der natürlichen Kühlkristallisation sind neben den klimatischen Bedingungen auch die Verfügbarkeit genügend großer Flächen, welche für das Anlegen der Evaporationsbecken[134] benötigt werden.

Der Vorteil beider Verfahren, besonders aber der solaren Evaporation gegenüber der technischen Eindampfung liegt im geringeren Energiebedarf zur Eindampfung der mit KCl-untersättigten Solungslösung. Der Nachteil liegt bei der solaren Evaporation jedoch im hohen Wasserverbrauch, da das verdunstete Wasser nicht zurückgewonnen werden kann.

Tabelle 22 gibt einen Überblick zum K_2O-Gehalt der Kalirohsalze, die soltechnisch gewonnen werden, sowie den an den einzelnen Standorten produzierten Kalidüngemittel- und Nebenproduktmengen (INTREPID 2012a, /437/; 2012b, /438/; PCS 2012, /738/).

133 Wird auch als sogenanntes Ausfrieren des KCl-Gehaltes der technischen Lösungen bezeichnet.

134 Aus dem Englischen entlehnt, oftmals auch als *evaporation ponds* bezeichnet.

Tabelle 22 Überblick über den Wertstoffinhalt der genutzten Ressource und die daraus im Jahr 2013 erzeugten Produkte ausgewählter Kalidüngemittelproduzenten

	Wertstoffgehalt der Lagerstätte [m% K_2O]	Produktionsmenge und Produkte für 2013 [t/a]
Soltechnische Gewinnung		
Kaliwerk Belle Plaine, Saskatchewan, Kanada, MOSAIC	18	2.100.000 MOP
Kaliwerk Hersey, Michigan, USA, MOSAIC	26	100.000 MOP
Kaliwerk Kehmstedt/Bleicherode, Thüringen, Deutschland, DEUSA	11 – 12	80.000 MOP feucht 45.000 Bischofit 29.000 $MgCl_2$-Lösung
Nachnutzung abgesoffener Kalibergwerke durch Soltechnische Gewinnung		
Kaliwerk Patience Lake, Saskatchewan, Kanada, PCS	21	300.000 MOP
Kaliwerk Moab, Utah, USA, INTREPID	12 – 14	112.000 MOP 7.000 NaCl

6.3 Aufbereitung natürlicher wertstoffarmer Lösungen

Die natürlichen Lösungen werden auf verschiedene Weise aus Oberflächengewässern und/oder dem Porenraum oberflächennaher Evaporite extrahiert (▸ Abschnitt 5.2) und in speziell für diese Zwecke angelegte Evaporationsbecken geleitet, wo ihr Wasseranteil unter Einwirkung der Sonneneinstrahlung vollständig verdunstet, mindestens aber eine Aufkonzentration der Lösungen zu deutlich höheren Wertstoffgehalten erfolgt. Anschließend sind weitere Aufbereitungsschritte der geernteten kristallinen Salzgemische und/oder der aufkonzentrierten Lösungen erforderlich, um verkaufsfähige Kalidüngemittel zu erzeugen. Für die geernteten Feststoffe kommen sowohl die Flotation als auch Heißverlösung und technische Kristallisation zum Einsatz. Für die aufkonzentrierten Lösungen sind es unterschiedliche technische Evaporations- und Kristallisationsverfahren oder auch chemische Umwandlungen.

Von den weltweit insgesamt 69 Aufbereitungsanlagen, die im Jahr 2014 im planmäßigen industriellen Betrieb zur Kalidüngemittelproduktion genutzt wurden, verarbeiten 29 Standorte natürliche wertstoffarme Lösungen (▸ Tabelle 23). In allen diesen Aufbereitungsanlagen werden die natürlichen wertstoffarmen Lösungen zunächst einer solaren Evaporation unterzogen, die zur Konzentration der Wertstoffkomponenten führt. In weiteren, sehr individuell auf die natürlichen Rohstoffe, aber auch auf die jeweiligen klimatischen Standortbedingungen abgestimmten Aufbereitungsschritten werden die Kristallisate aus der Flotation und/oder die Restlösungen der Evaporation durch technische Kristallisation weiter verarbeitet. Um verkaufsfähige Kalidüngemittelprodukte zu erzeugen, sind auch an diesen Standorten weitere Hilfsprozesse erforderlich.

Abbildung 62 zeigt schematisch die Aufbereitung der natürlichen Lösungen:

> Die zugeführte Lösung wird hier beispielhaft in 3 Kristallisationsstufen in 3 hintereinander folgenden Evaporationsbecken solar eingedampft. Durch die Verdunstung von Wasser wird die Lösung aufkonzentriert und bei Sättigung einer oder mehrerer Salze kristallisieren diese aus und sinken zum Boden des Evaporationsbeckens. Die überstehende Lösung wird von der ersten zur zweiten und letztlich zur dritten Kristallisationsstufe gepumpt oder fließt dem natürlichen Gefälle folgend frei ab. Die Ernte der feuchten Kristallisate erfolgt maschinell.

Prinzipiell können natürliche wie technische Lösungen auch durch technische Eindampfung verarbeitet werden. Die Vor- und Nachteile beider Verfahren wurden bereits in Abschnitt 6.2 erläutert.

Tabelle 23 Aufbereitungsanlagen der Kalidüngemittelproduktion weltweit, an denen natürliche wertstoffarme Lösungen zu Fertigprodukten verarbeitet werden (▸Tabelle 1)

Produzent/Standort[5]	Art der Aufbereitung natürlicher Lösungen
CHINA	
Mindestens 24 Standorte unterschiedlichster Größe	Solare Evaporation und natürliche Kristallisation, an einzelnen Standorten auch kombiniert mit Flotation und/oder technischer Eindampf-/Kühlkristallisation
DSW	
Dead Sea	Solare Evaporation und natürliche Kristallisation, Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation, Flotation
APC	
Safi	Solare Evaporation und natürliche Kristallisation, Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation, Flotation
SQM	
Salar de Atacama	Solare Evaporation und natürliche Kristallisation sowie Flotation
INTREPID	
Wendover	Solare Evaporation und natürliche Kristallisation sowie Flotation
COMPASS	
Great Salt Lake	Solare Evaporation und natürliche Kristallisation, Flotation sowie technische Eindampf-/Kühlkristallisation

Tabelle 24 gibt Beispiele zur Zusammensetzung der Kristallisate aus natürlichen Lösungen und die daraus gewonnenen Produkte (ERCOSPLAN 2002, /240/; 2015, /255/; APC 2012, /25/). Die STANDORT-STECKBRIEFE in Kapitel 10 zeigen die Produktionskenndaten der diese Methoden nutzenden Kaliwerke von DSW (Kenat 1965, /514/), APC (APC 2012, /25/), SQM (SQM 2011, /967/), INTREPID (INTREPID 2012a, /437/; 2012b, /438/; 2013, /439/; 2014, /440/), COMPASS (Behrens 1980, /84/; CMII 2011, /165/) und den westchinesischen Produzenten (Ziqiang & Zhiqiang 1983, /1158/; Sun & Lock 1990, /992/; Dapeng & Bingxiao 1992, /182/; Shuai 1992, /929/; Liu et al. 2008, /599/; Hao et al. 2014, /369/) nochmals im Detail.

Am Great Salt Lake in Utah, USA, nahe der Stadt Ogden befindet sich ein Produktionsstandort von COMPASS zur Produktion von SOP (▸STANDORT-STECKBRIEFE in Kapitel 10). Die natürlichen Lösungen des Great Salt Lake werden über solare Evaporation aufkonzentriert und Kalium-haltige Salze kristallisiert. Aufgrund der klimatischen Verhältnisse (▸Abschnitt 4.3) ist der Standort sehr gut geeignet für solare Evaporation:

> Die Verdunstungsrate beträgt etwa 1.000 Millimeter und die Niederschläge 110 bis 450 Millimeter pro Jahr. Die Verdunstungsfläche umfasst etwa 200 Quadratkilometer. Die Lösung wird zuerst in Evaporationsbecken aufkonzentriert, wo zunächst lediglich NaCl auskristallisiert. Die verbleibende Lösung durchläuft eine Reihe weiterer Evaporationsbecken in denen Epsomit und die Kalium-haltigen Salze Schönit[135], Kainit und Carnallit kristallisiert werden, wobei Kainit die Hauptmenge liefert. Durch die kristallisierten Salzfeststoffe werden Entwässerungsgräben gezogen und die Hauptmenge der Lösung läuft dabei ab. Die so entwässerten

135 Das K-Mg-Mineral Schönit (K_2SO_4 x $MgSO_4$ x $6H_2O$) enthält 23,4 m% der Wertstoffkomponente K_2O.

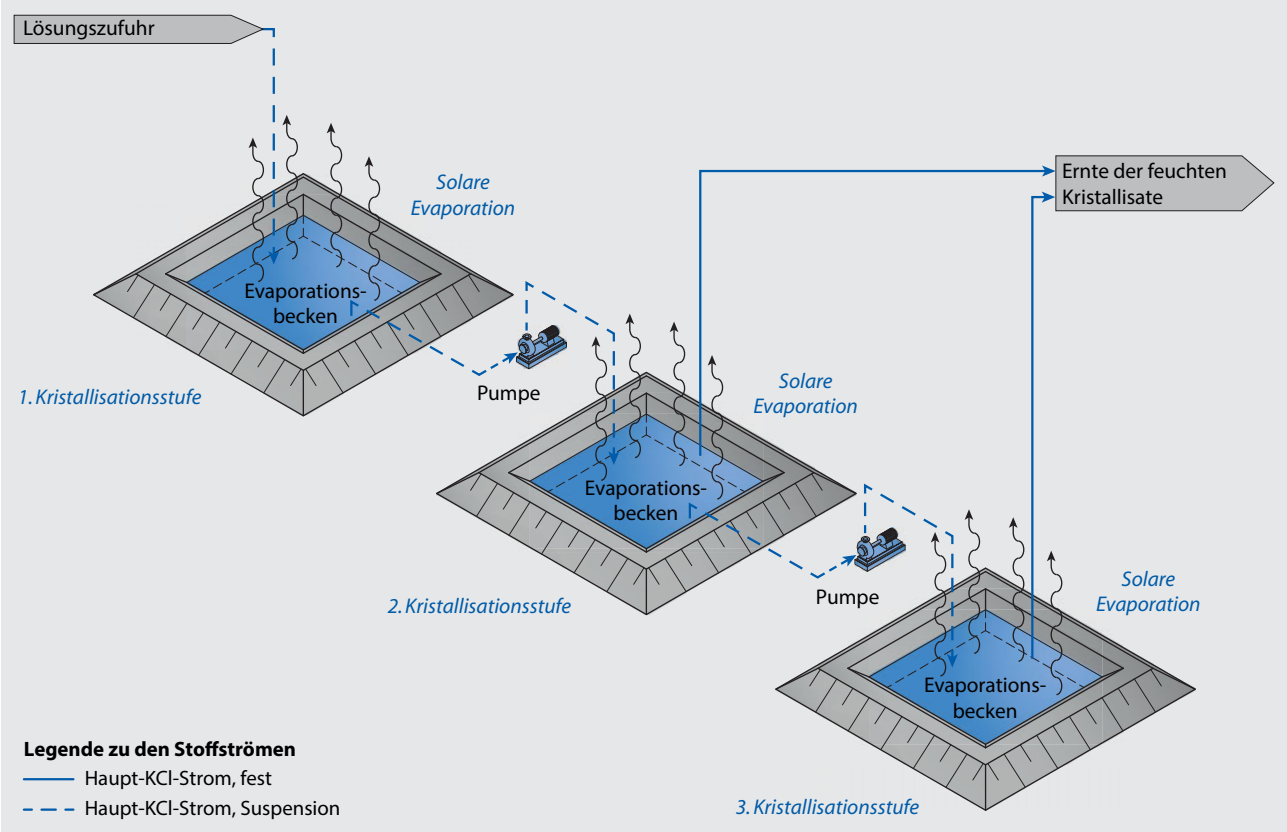


Abbildung 62 Solare Evaporation natürlicher oder technischer Lösungen im vereinfachten Verfahrens- und Apparateschema

Kristallisate werden aufgehäuft und maschinell zur Aufbereitungsanlage transportiert. Dort werden die Kristallisate der Kalium-Minerale in einem ersten Aufbereitungsschritt hauptsächlich zu Schönit umgewandelt. Dieser wird dann per Flotation vom Halit abgetrennt. Schließlich wird das gereinigte Schönit-Konzentrat mit Wasser und Prozesslösung zu SOP umgesetzt. Das verkaufsfähige Fertigprodukt besitzt einen K_2O-Gehalt von mindestens 50 Prozent.

Im nordchilenischen Salar de Atacama betreibt SQM auf der Rohstoffgrundlage natürlicher Lösungen die Herstellung von MOP und SOP sowie KNO_3 (▸STANDORTSTECKBRIEFE in Kapitel 10). Die Atacama-Wüste gehört zu den aridesten Gebieten der Erde und eignet sich somit hervorragend zur Nutzung der solaren Evaporation. Im Mittel etwa 15 Millimeter Niederschlag pro Jahr stehen 3.200 Millimeter potenzieller Verdunstung pro Jahr gegenüber (Weischet 1966, /1106/; Veith 2000, /1066/):

Die Evaporationsbecken sind unterteilt in Halit-, Sylvin-, Sulfat- und Carnallit-Becken. Jährlich werden etwa 15 Millionen Kubikmeter Salzlösung aus Flachbrunnen und Gräben in die Evaporationsbecken eingeleitet.

Tabelle 24 Zusammensetzung der Kristallisate aus natürlichen Lösungen nach solarer Evaporation und die daraus gewonnenen Produkte [ERCOSPLAN 2002, /240/; 2015, /255/; APC 2012, /25/]

	Zusammensetzung [m%]			Produktmenge [Millionen t/a]
	KCl	$MgCl_2$	NaCl	
Kaliwerk Safi, Jordanien	22,5	28,8	16,0	2,20 MOP 0,05 KCl99
Playa Khoor, Iran	22,0			0,05 MOP[136]

Die Salzlösung, welche zur KCl-Herstellung genutzt wird, besitzt einen Kalium-Gehalt von 22 Gramm pro Liter, was einen vergleichsweise hohen Wert für natürliche Salzlösungen darstellt. Zunächst wird die Salzlösung aufkonzentriert und NaCl abgeschieden.

136 Produktionsanlage im Probebetrieb, derzeit noch keine industrielle Kalidüngemittelproduktion

In den unterschiedlichen Becken werden verschiedene Kristallisate mit jeweils unterschiedlichen Kalium-Gehalten gewonnen. Das Sylvin-Kristallisat (ein KCl/NaCl-Gemisch) wird einer Flotation unterzogen und das KCl wird in einem Deckprozess zum Erreichen der Produktqualität gereinigt.

Die Mutterlösung aus dem Eindunstungsprozess ist an Lithium angereichert und wird zur Herstellung von Lithiumkarbonat genutzt. Außerdem nutzt SQM auch weitere, gering konzentrierte Wertstoffinhalte der natürlichen Lösungen zur Herstellung von Jod- und Bor-Nebenprodukten.

Die SOP-Herstellung bei SQM erfolgt ähnlich dem Verfahren bei COMPASS am Great Salt Lake, Utah, USA. Das sulfatische Kristallisat wird einer Umwandlung zu Schönit unterzogen, dieser in einer Flotation gereinigt und anschließend zu K_2SO_4 zersetzt. Die Mutterlösung aus den sulfatischen Evaporationsbecken ist reich an Borat und wird zur Herstellung von Borsäure als Nebenprodukt verwendet.

6.4 Waschen, Decken, Entwässerung der Zwischenprodukte und Trocknung

Abhängig von der vorausgehenden Aufbereitungsmethode, enthalten die feuchten Zwischenprodukte noch unterschiedliche Anteile anhaftender Lösung und/oder NaCl-Beimengungen und weisen somit noch nicht die erforderliche chemische Produktqualität auf. Es sind demzufolge weitere Prozessschritte notwendig, die der Sicherung der chemischen Qualität des Endproduktes dienen.

Sind noch erhöhte Anteile an NaCl im KCl-Zwischenprodukt vorhanden, kann ein Reinigungsschritt, das sogenannte Decken, erforderlich sein:

Beim Decken wird das flotierte oder kristallisierte KCl mit frischem, kaltem Wasser versetzt, wobei vorzugsweise NaCl gelöst wird (▸ Abbildung 53). Ein zweistufiger Deckprozess ist als Verfahrens- und Apparateschema in Abbildung 63 dargestellt. Dabei wird das Zwischenprodukt in die erste Deckstufe und das Wasser in die zweite Deckstufe gegeben. Dadurch wird der NaCl-Anteil im Feststoff auf ein erforderliches Niveau gesenkt. Nach der anschließenden Fest-Flüssig-Trennung wird die Lösung aus der zweiten Stufe in die erste Deckstufe zurückgeführt. Diese Lösung ist an NaCl untersättigt und an KCl übersättigt. Dadurch kann sie in der ersten Deckstufe NaCl auflösen ohne KCl dabei mitzulösen.

Bei der nassen Aufbereitung der Kalirohsalze durch Löse- oder Flotationsverfahren fallen die Zwischenprodukte grundsätzlich als Suspension an. Bei ihrer weiteren Aufbereitung zum verkaufsfähigen trockenen Endprodukt wird die Flüssigkeit vom Feststoff getrennt. Dies geschieht durch mechanische und thermische Flüssigkeitsabtrennung, die sogenannte Trocknung.

Die mechanische Flüssigkeitsabtrennung nutzt dabei folgende Wirkungsweisen:

- Sedimentation infolge der Schwerkraft in Eindickern und Klärern,
- Sedimentation durch Zentrifugalkräfte in Hydrozyklonen und Zentrifugen

oder

- Filtration mittels Band-, Trommel-, Scheiben- oder Tellerfilter.

In Abbildung 64 ist ein vereinfachtes Verfahrens- und Apparateschema für eine typische Entwässerung des KCl-Zwischenproduktes dargestellt:

Die Suspension wird zur Voreindickung in einen Eindicker gepumpt. Da die Dichte der Feststoffteilchen größer als die der Flüssigkeit ist, setzen sich die Feststoffteilchen unter Wirkung der Schwerkraft ab. Der sedimentierte Feststoff wird anschließend im Unterlauf des Eindickers abgezogen und in einen Suspensionsverteiler gepumpt. Der Suspensionsverteiler verteilt die KCl-Suspension auf 2 Bandfilter. Durch Vakuumerzeugung mittels einer Vakuumpumpe entwässern die Bandfilter die KCl-Suspension.

Die Filtrate werden über 2 Filtratabscheider in einem barometrischen Abschlussbehälter gesammelt. Eine Pumpe fördert die Filtrate in den Eindicker. Das entwässerte KCl wird über einen Gurtbandförderer zur Trocknung abgeführt. Die geklärte Lösung am Oberlauf des Eindickers fließt über Überlaufwehre ab und wird anschließend wieder dem Prozess zugeführt.

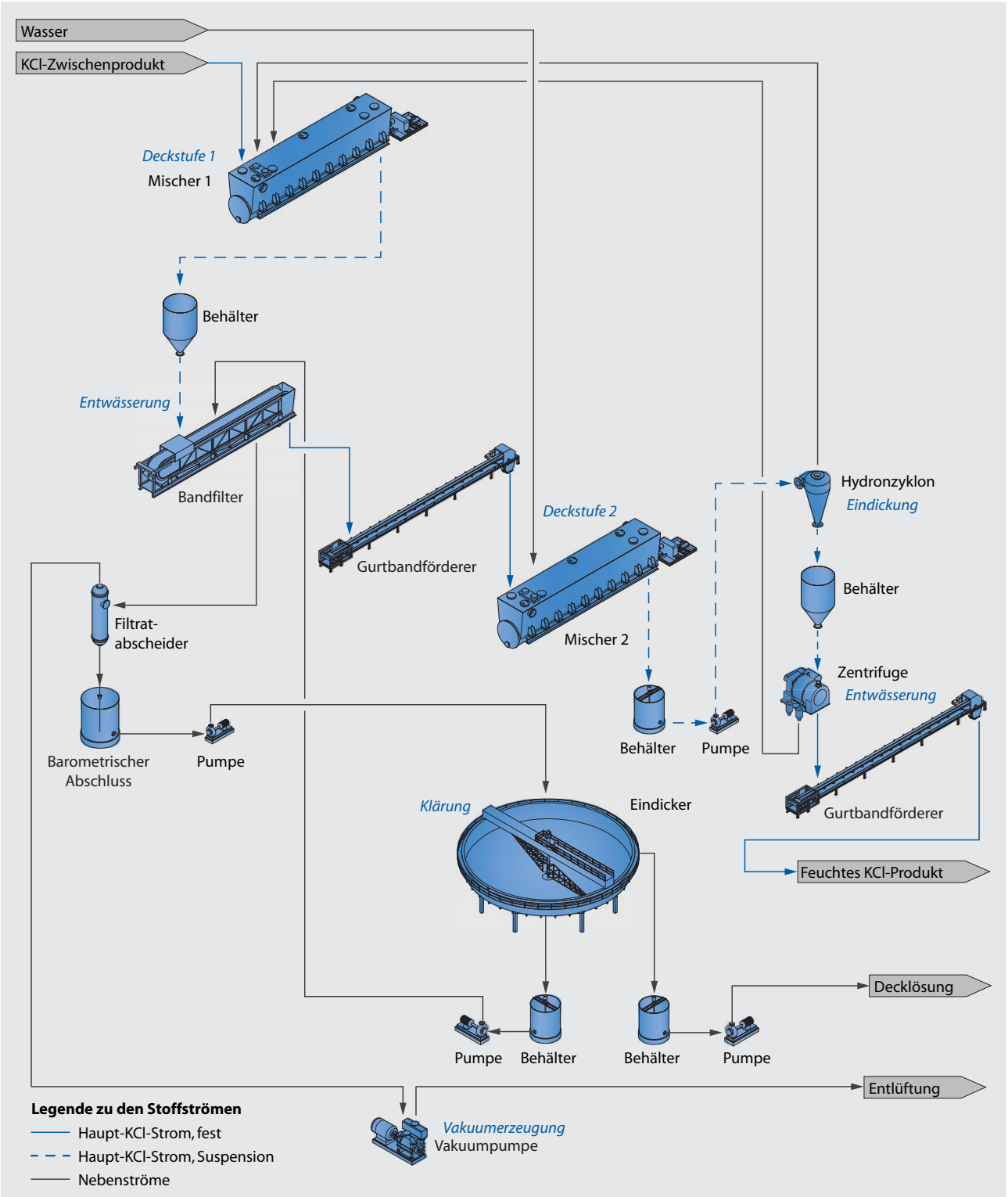


Abbildung 63 Zweistufiger Deckprozess im vereinfachten Verfahrens- und Apparateschema

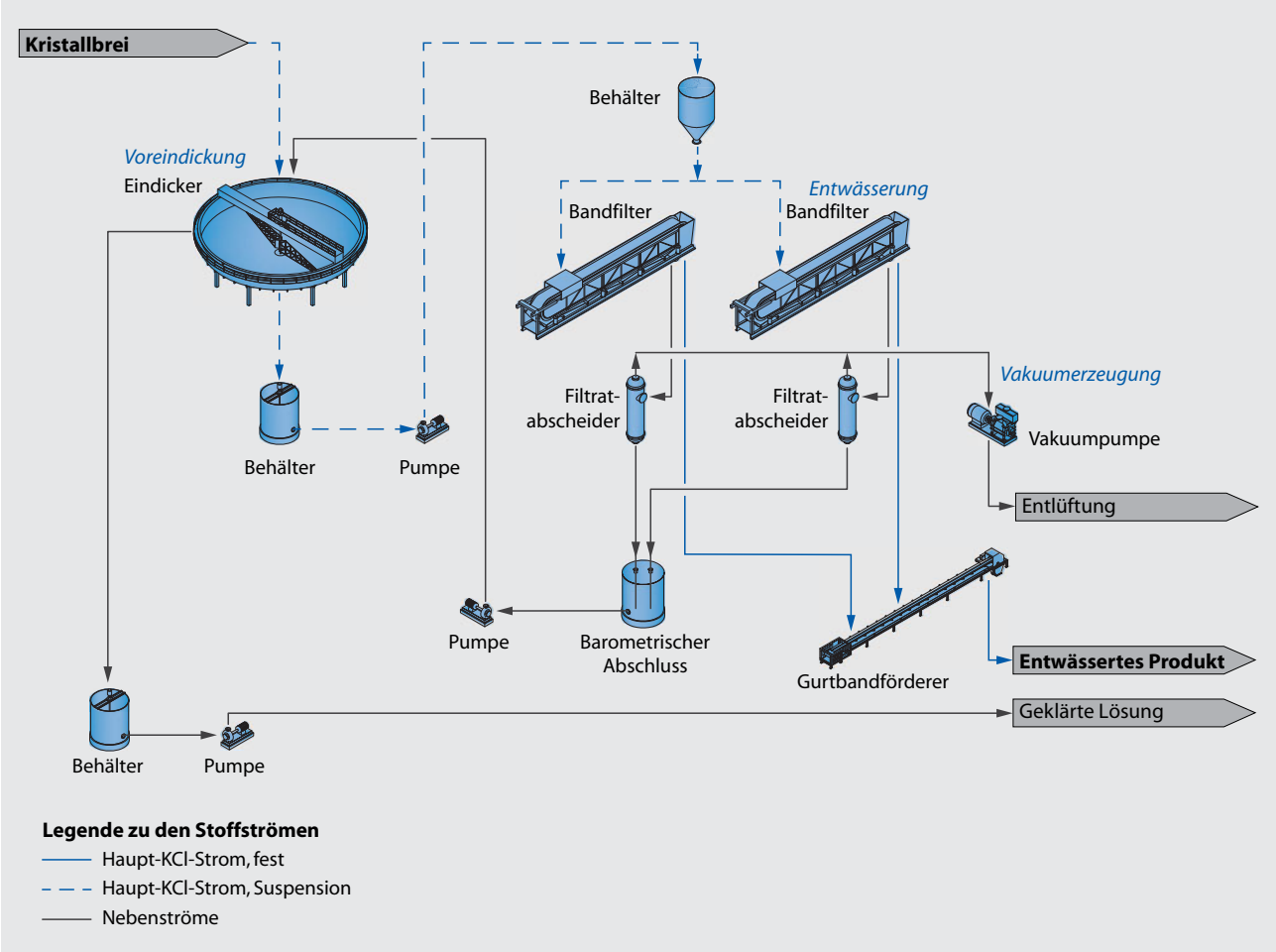


Abbildung 64 Entwässerung des KCl-Zwischenproduktes im vereinfachten Verfahrens- und Apparateschema

Nach Erreichen der gewünschten chemischen Qualität des KCl-Zwischenprodukts wird durch mechanische Entwässerung der Wassergehalt soweit wie möglich reduziert.

Durch den Einsatz von Zentrifugen lassen sich Restwassergehalte von 4 bis 5 Prozent am KCl-Feststoff erreichen. Dieses Feucht-KCl wird dann einer Trocknung unterzogen. Je geringer der Wassergehalt vor der Trocknung ist, umso geringer ist der Energieaufwand für diese thermische Wasserabtrennung. In der Trocknung wird der Wassergehalt des Feststoffs meist auf 0,5 Prozent oder weniger gesenkt. Damit hat das KCl-Produkt seine chemische Endqualität erreicht.

Abbildung 65 zeigt ein vereinfachtes Verfahrens- und Apparateschema für die Produkttrocknung mit anschließender Aufgabe eines Antibackmittels.

Das ankommende, entwässerte Produkt wird zunächst über eine Schwingrinne dem Wirbelschichttrockner zugeführt. Über einen Brenner wird durch Zufuhr von Heizgas oder Diesel sowie Luft Hitze erzeugt, um das entwässerte Produkt im Trockner zu trocknen. Die heißen Abgase werden direkt zur Trocknung des Produktes eingesetzt, das Restwasser am Produkt wird dabei verdampft und mit den heißen Gasen aus dem Trockner ausgetragen. Als Trockner werden unterschiedliche Gerätevarianten eingesetzt; häufig sind dies Trommeltrockner, daneben auch Fließbetttrockner und Wirbelschichttrockner.

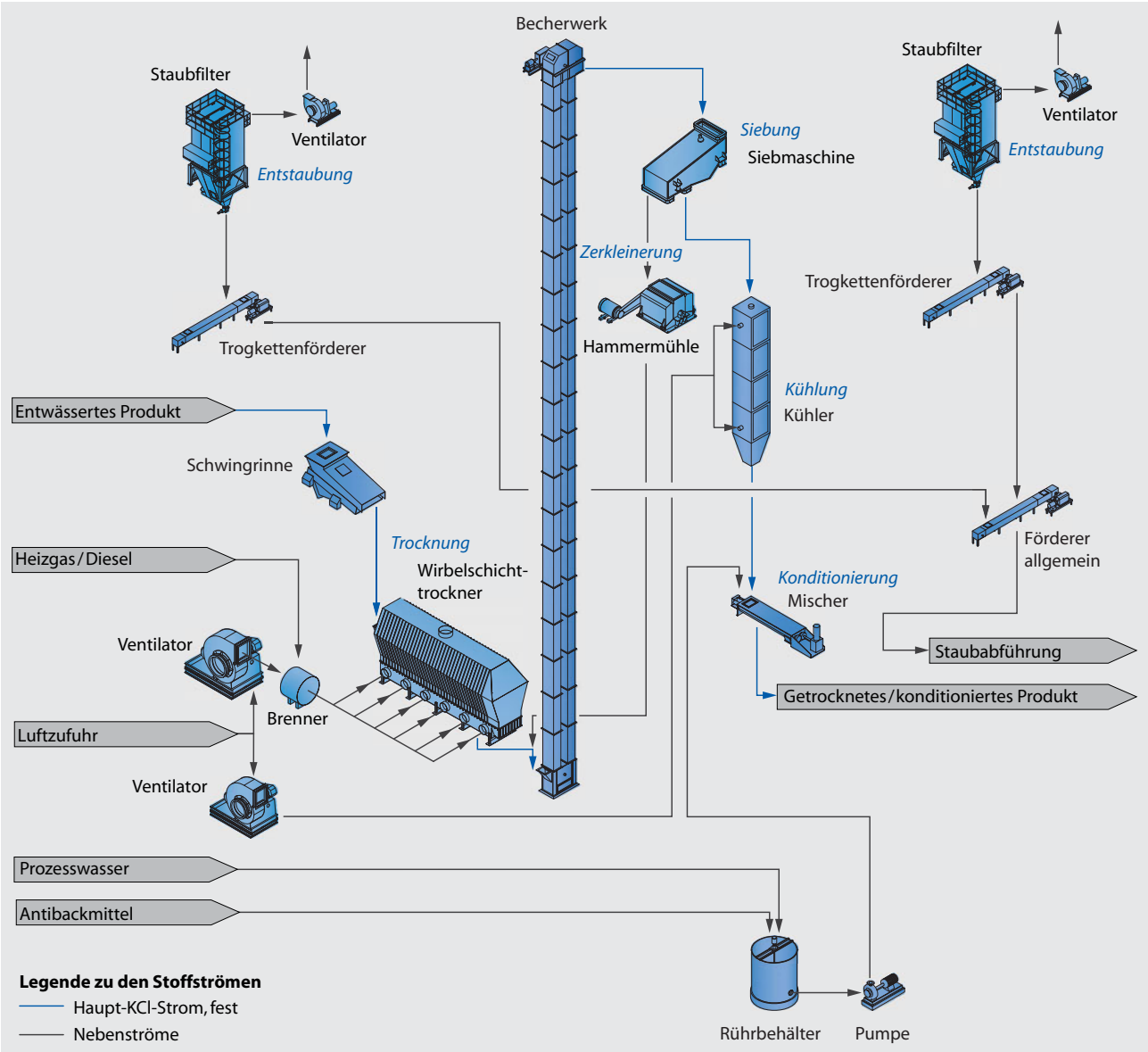


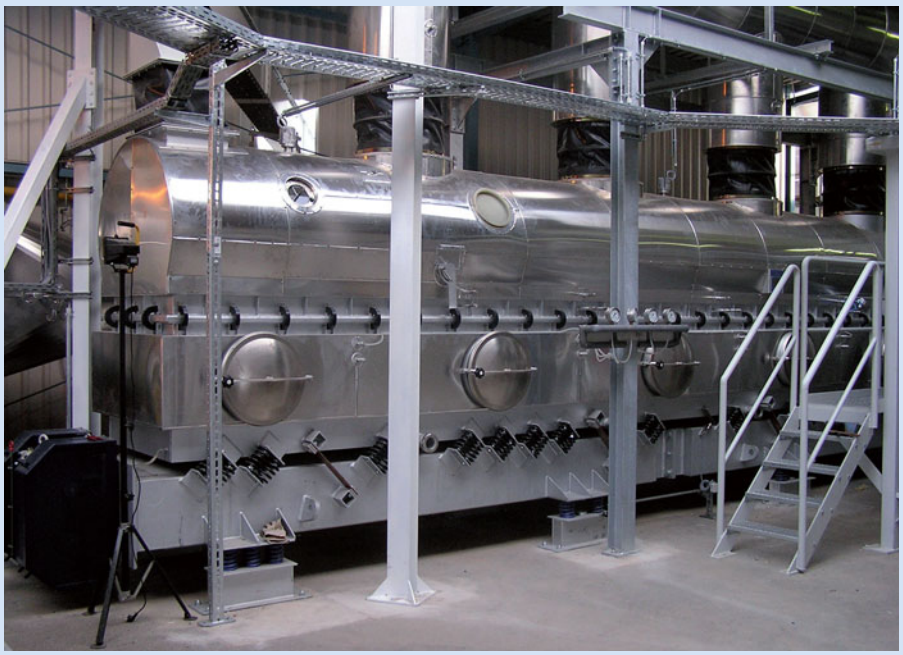
Abbildung 65 Trocknung des KCl-Zwischenproduktes im vereinfachten Verfahrens- und Apparateschema

Das getrocknete Produkt wird über ein Becherwerk auf eine Vorabsiebung gegeben, da es bei der Trocknung zu Verklumpungen des Feststoffes kommen kann. Das Überkorn wird durch eine Hammermühle zerkleinert und wieder dem Becherwerk zugeführt. Das Unterkorn wird in den Kühler gegeben. Hier wird durch Zufuhr von Luft das getrocknete Produkt abgekühlt. Anschließend wird es in einem Mischer mit Antibackmittel konditioniert, welches das Zusammenbacken des getrockneten Produktes während der Lagerung und dem Transport verhindern und seine Freifließbarkeit gewährleisten soll.

In den letzten Jahrzehnten hat sich vorzugsweise Erdgas zur Trocknung durchgesetzt, das mit einem Heizwert von 30 bis 40 Megajoule pro Normkubikmeter eine effiziente Restentwässerung gewährleistet (Diekmann 1991, /198/). Der Gasverbrauch liegt bei der Trocknung eines Kalidüngemittels bei 20 bis 35 Normkubikmeter pro Tonne Trockengut. Die Produkttrocknung stellt mit bis zu 20 Prozent einen erheblichen Beitrag zum Gesamtenergieverbrauch eines Kaliwerkes dar.

BOX 6.4

Wirbelschichttrockner zur Trocknung des KCl-Zwischenproduktes



Das Bild zeigt einen Wirbelschichttrockner vom Typ *WS-V-T/K* des Herstellers ALLGAIER PROCESS TECHNOLOGY GMBH.

[Foto mit freundlicher Genehmigung von Allgaier Process Technology GmbH, Uhingen, Deutschland]

Die ALLGAIER Gruppe, mit Sitz in Uhingen, Baden Württemberg, Deutschland, beschäftigt in den Sparten Automotive und Verfahrenstechnik weltweit etwa 2.000 Mitarbeiter. Die ALLGAIER PROCESS TECHNOLOGY GMBH fertigt und liefert weltweit Anlagen und Systeme zum Waschen, Trocknen, Kühlen, Sieben und Sortieren von Feststoffen.

Derartige Wirbelschichttrockner werden bei der Kalidüngemittelproduktion zur Trocknung des zentrifugenfeuchten KCl-Zwischenproduktes verwendet, wobei die integrierte Kühlstrecke im letzten Drittel des Trocknungsapparates eine niedrige Trockenguttemperatur ermöglicht.

BOX 6.5

Massengut-Siebmaschine zur Klassierung der Fertigprodukte



Das Bild zeigt Massengut-Siebmaschinen vom Typ *Megatex XD* des Herstellers ROTEX EUROPE LTD.

[Foto mit freundlicher Genehmigung von Rotex Europe Ltd., Köln, Deutschland]

Die ROTEX GRUPPE mit Sitz in Cincinnati, Ohio, USA, unterhält über die ROTEX EUROPE LTD. auch eine Niederlassung in Köln, Nordrhein-Westfalen, Deutschland. Die ROTEX EUROPE LTD. liefert weltweit Anlagen zur Förderung, Siebung und Trennung von Produkten verschiedenster Art.

Solche Siebmaschinen vom Typ *Megatex XD* werden bei der Kalidüngemittelproduktion zur Klassierung der Fertigprodukte eingesetzt, wo sie auf kleinstem Raum hohe Siebleistungen bei großen Materialmengen und eine hohe Trennschärfe ermöglichen.

6.5 Kompaktierung und Granulierung

Die zusätzlichen Prozessschritte der Kompaktierung oder Granulierung dienen der Anpassung der physikalischen Qualität des Endproduktes und stellen in gewisser Weise eine Veredlung der Fertigprodukte dar (Hollstein 1979, /409/; Rieschel & Zech 1981, /842/; Dancy 1982, /180/; Middleton, Cormode & Scotten 1983, /654/; Johanson 1996, /459/; Schultz et al. 2000, /904/; Schultz et al. 2003, /903/; Dittmeyer et al. 2005, /200/; Stahl et al. 2005, /973/). Für den Einsatz in der Landwirtschaft werden besonders Produkte mit Partikelgrößen von 1 bis 5 Millimeter nachgefragt (▸ Abschnitt 3.3), die weder bei Flotations- noch bei den Löse- und Kristallisationsverfahren unmittelbar hergestellt werden können. Die meisten Produzenten veredeln deshalb die Zwischenprodukte am Ende des Aufbereitungsprozesses durch eine Partikelvergröberung.

Diese Partikelvergröberung der Zwischenprodukte kann sowohl für MOP als auch für SOP und K-Mg-Produkte verfahrenstechnisch auf 2 verschiedenen Wegen erreicht werden. Es können eine mechanische Kompaktierung[137] oder eine klassische Aufbaugranulierung[138] zum Einsatz kommen, wobei letztere sowohl in rotierenden Trommeln als auch auf rotierenden Tellern ausgeführt werden kann. Beide Methoden dienen dem Zweck, das relativ feinkörnige KCl-Produkt aus Flotation oder Kristallisation in ein gröberes Kornspektrum, das sogenannte Granulat, zu überführen, welches durch eine weitgehend einheitliche Korngröße und Kornform charakterisiert ist.

Für die kubischen KCl-Kristalle der MOP-Produkte eignet sich die Presskompaktierung, da die Gitterebenen des Hauptbestandteils KCl eine kristallplastische Translationsfähigkeit aufweisen. Das Funktionsprinzip der Kompaktierung ist die Verdichtung eines feinkörnigen Feststoffes im Spalt zwischen zwei sich gegensinnig drehenden glatten oder profilierten Walzen (Johanson 1996, /459/). Dabei entsteht zunächst ein brettförmiges Materialband, auch Schülpe[139] genannt, das anschließend wieder zerkleinert und klassiert wird.

Abbildung 66 stellt ein vereinfachtes Verfahrens- und Apparateschema einer Presskompaktierung zur Veredlung der KCl-Zwischenprodukte dar:

Das getrocknete Kaliprodukt wird dabei zunächst über ein Becherwerk einer Vorabsiebung zugeführt. Hier werden grobe Agglomerate abgetrennt und aus dem Press- und Brecherkreislauf herausgenommen. Der Oberlauf des Siebes wird direkt in die Walzenmühle geleitet. Der Unterlauf des Siebes wird über eine Förderschnecke einer Walzenpresse, die das Kernstück der Presskompaktion darstellt, zugeführt (▸Box 6.6). Nach der Vorabsiebung sind in beiden Stoffströmen Permanentmagnetabscheider vorgesehen, um die nachfolgenden Ausrüstungen gegen Metallteile zu schützen. Die Walzenpresse wird von der Förderschnecke kontinuierlich mit Produkt beschickt. Das restliche Fördergut wird über den Endabwurf der Förderschnecke zurück in den Kreislauf gegeben. Die Walzenpresse presst die einzelnen Körner zu Schülpen. Anschließend werden die Schülpen in einem Walzenbrecher (Schülpenbrecher) grob vorzerkleinert. Im nächsten Schritt wird dieser Stoffstrom der Walzenmühle zugeführt. Hier wird er auf die gewünschte Fragmentgröße ("Granulat"-Korngröße) gemahlen. Über ein Becherwerk und einen Breitenverteiler gelangt der Stoffstrom gleichmäßig auf das Produktsieb. Der Unterlauf des Produktsiebes wird zurück in den Press-, Brech- und Mahlkreislauf gegeben. Die mittlere Siebfraktion stellt das granulierte Produkt dar. Es wird über einen Gurtbandförderer dem nächsten Prozessschritt zugeführt. Der Oberlauf des Produktsiebes wird durch eine Hammermühle zerkleinert und anschließend wieder dem Produktsieb zugeführt.

Der größte Teil des Fördergutes muss bei der Presskompaktierung im Kreislauf gefahren werden, bis er die gewünschte Partikelgröße erreicht hat. Die Kompaktierung ist ein energetisch aufwendiger Prozess. Die Kompaktierung – ebenso aber auch die Granulierung – sind energetisch aufwendige Prozesse. Eine Presskompaktierung wie in Abbildung 66 dargestellt, erreicht in einer modernen Auslegung auf den Verbrauch von Elektroenergie bezogene Leistungen zwischen 32 und 38 Kilowattstunden pro Tonne kompaktiertem Fertigprodukt. Die für diesen Veredlungsschritt erforderliche spezifische Energiemenge richtet sich maßgeblich nach dem Korngrößenspektrum des getrockneten, zu kompaktierenden Produktes. Ist das Korngrößenspektrum des ungranulierten Produktes relativ grob, muss weniger feines Material der Kompaktierung zugeführt werden. Dies entlastet den energieintensiven Pressprozess.

137 Im deutschen Sprachraum auch (unzutreffend) als "Pressgranulierung" bezeichnet.

138 Im deutschen Sprachraum zur Unterscheidung von der "Pressgranulierung" auch als "Rollgranulierung" bezeichnet.

139 Schülpe bezeichnet die durch die Presskompaktion verdichtete kohäsive Masse des Produkts

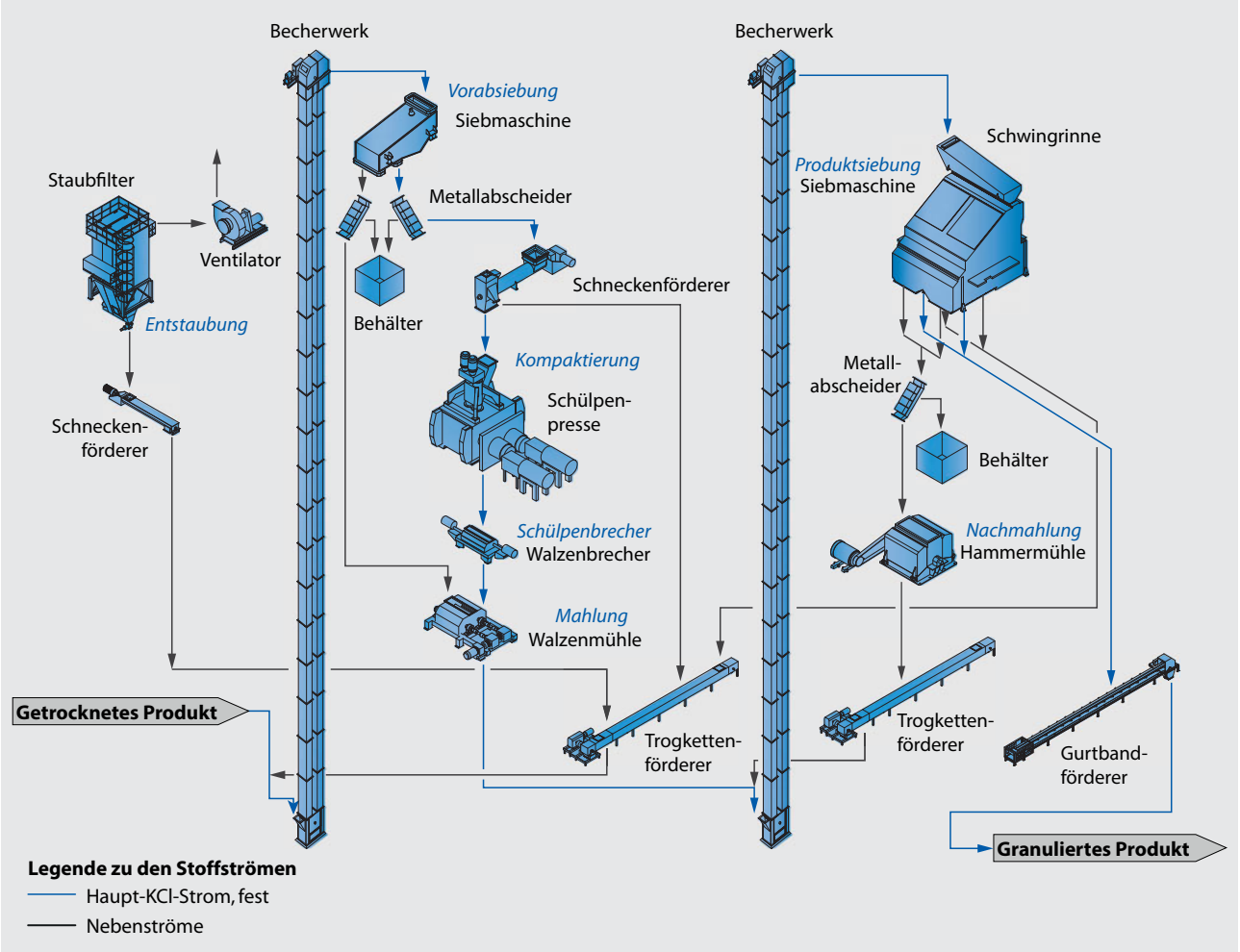


Abbildung 66 Presskompaktierung zur Veredlung des KCl-Zwischenproduktes im vereinfachten Verfahrens- und Apparateschema

Neben der Presskompaktierung findet in der Kaliindustrie auch das Verfahren der Aufbaugranulierung Anwendung, vorwiegend für sulfatische Kalidüngemittel. Bei dem Hauptbestandteil von SOP, dem orthorhombischen Kaliumsulfat, aber mehr noch beim monoklinen Kieserit ist die Translationsfähigkeit der Kristallgitter stark eingeschränkt. Die Kristallbruchstücke der Primärteilchen lassen sich zwar zu hochverdichteten Schülpen kompaktieren, zerplatzen jedoch danach aufgrund elastischer Gittereffekte zu einer staubförmigen und für den Düngemitteleinsatz unbrauchbaren Masse. Daher kommen hier zur Partikelvergröberung Verfahren der Aufbaugranulierung zum Einsatz, wo vor allem Kapillar-, daneben aber auch Scher- und Druckkräfte eine Vergröberung der Feinkornmasse zu mehr oder weniger dichten, kugelförmigen Granalien bewirken. Diese Agglomerationsverfahren werden in einer Rolltrommel, deren Drehachse nur wenig gegen die Horizontale geneigt ist, oder auf einem schräg gestellten Granulierteller durchgeführt.

Abbildung 67 zeigt ein vereinfachtes Verfahrens- und Apparateschema einer Aufbaugranulierung zur Veredlung der KCl-Zwischenprodukte:

Das dosierte Aufgabegemisch, bestehend aus Kalizwischenprodukt, Bindemittel und Trägerlösung, wird in einer Mischtrommel homogenisiert und gelangt in das Zentrum einer Granuliertrommel, bei der das Gut von der rotierenden Fläche erfasst und nach oben bewegt wird. Von hier rollt es gravitativ angetrieben und/oder durch Mithilfe eines Abstreifers von der Innenfläche der Trommel nach unten zum Boden. Dabei ziehen zunächst Primär-Agglomerate andere Primärteilchen, über die sie hinwegrollen, durch Adhäsionskräfte an sich. Die sich abwärts bewegenden und dabei wachsenden Agglomerate laufen quer zu den Kreisbahnen, welche die Punkte der Innenfläche der Trommel beschreiben. Die Drehbewegung der Trommel zwingt so den durch die Schwerkraft abrollenden Aggregaten eine zusätzliche Drehbewegung auf.

Dieser Vorgang wiederholt sich vielmals während der Dauer des Granulierens bis das Gut am Ende der Granuliertrommel angelangt ist. Die Agglomerate nehmen durch das ständige Rollen eine kugelförmige Gestalt an. Die Struktur der kugelförmigen Granalien verdichtet sich hierbei im Idealfall so weit, dass kaum noch Platz zwischen den Primärteilchen verbleibt. Durch diese Verdichtung wird ein Teil der Granulierflüssigkeit aus den Granalien wieder nach außen verdrängt, was in der Aufbereitungspraxis als "Schwitzen" der grünen Granalien bezeichnet und als Signal für den Abschluss des Granuliervorgangs angesehen wird. Gut verdichtete Granalien werden durch Adhäsions- und Kohäsionskräfte so stark zusammengehalten, dass die sogenannte "Grünfeste" zum unbeschadeten Transport zu dem nächsten Prozessschritt ausreicht. Der nächste Prozessschritt ist die Trocknung, bei der die Flüssigkeit an der Oberfläche des granulierten Gutes und in dessen Inneren verdunstet. Die Granulate werden dann zu einer Siebmaschine gefördert, die das Gut separiert in Überkorn, Zielkorn und Feinkorn. Die in einem Brecher behandelte Überkornfraktion gelangt zurück in die Siebmaschine, das Feinkorn zurück in die Granuliertrommel, wo es im Kreislauf wieder neu aufgranuliert wird. Die in der Siebstufe getrennte Zielfraktion gelangt zu einer weiteren Granulationsstufe, bei dem das Gut eine Oberflächenversiegelung erhält und letztlich zum Produktlager transportiert wird.

Sowohl für den Einsatz in der Landwirtschaft, als auch während Lagerung und Transport der Schüttgüter sind die Festigkeit des Korns, eine definierte Korngröße mit vermindertem Staubanteil sowie eine Freifließbarkeit des Feststoffes wesentliche Vorteile eines agglomerierten Produktes. Zusätzlich wird auch ein Zusammenbacken des Feststoffs erheblich reduziert.

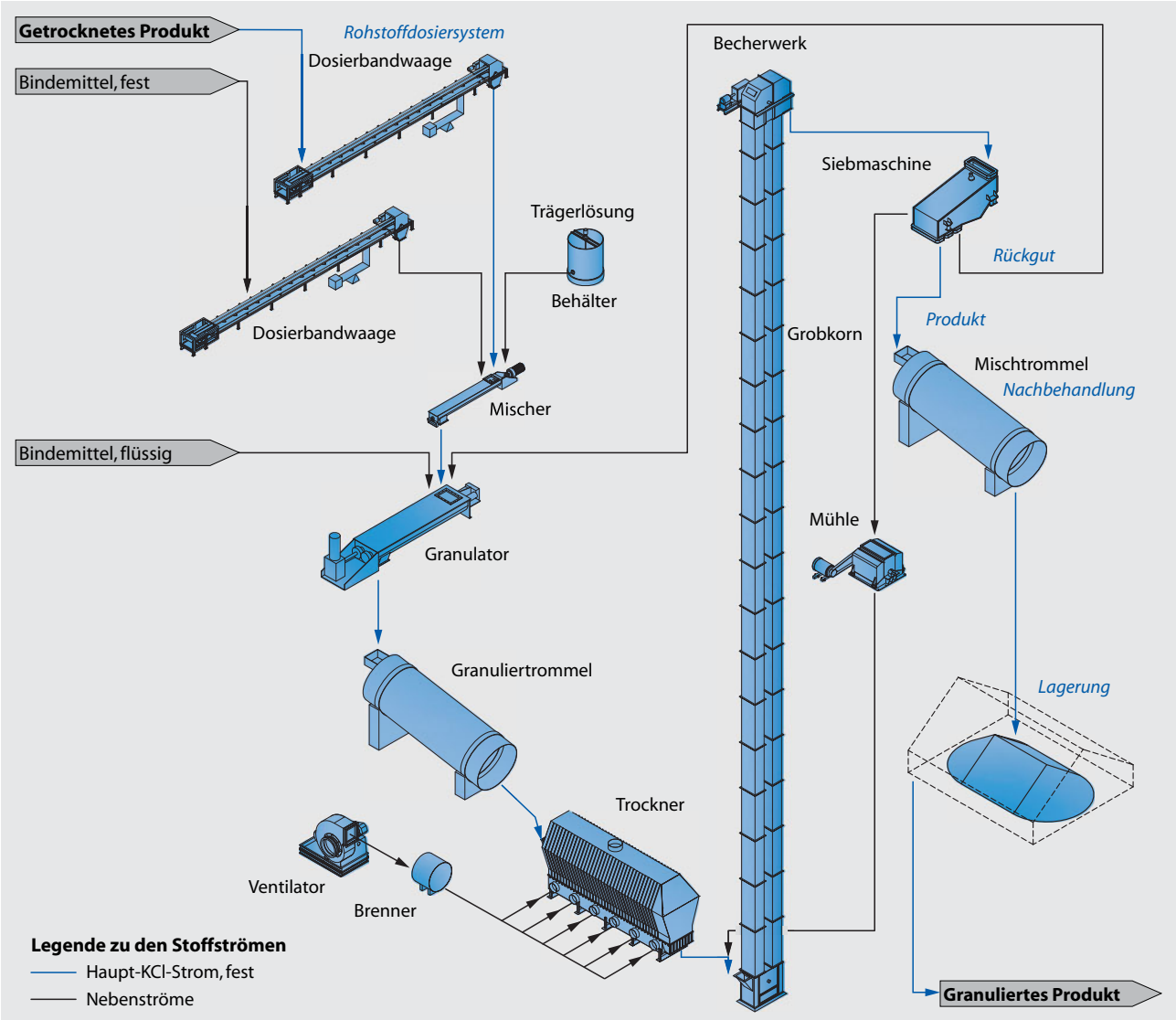


Abbildung 67 Aufbaugranulierung zur Veredlung des KCl-Zwischenproduktes im vereinfachten Verfahrens- und Apparateschema

BOX 6.6

Walzenpresse zur Herstellung von MOP *granular*



Das Bild zeigt eine Walzenpresse inklusive Planetenantriebe, Klapprahmen und Zweifach-Schnecke des Herstellers Maschinenfabrik KÖPPERN GMBH & CO. KG.

[Foto mit freundlicher Genehmigung von Köppern GmbH & Co. KG, Hattingen, Deutschland]

Die KÖPPERN-Gruppe, ein familiengeführtes Hightech-Unternehmen, beschäftigt allein am Stammsitz in Hattingen, Nordrhein-Westfalen, Deutschland, etwa 170 Mitarbeiter.

Die Maschinenfabrik KÖPPERN GMBH & CO. KG fertigt Hochdruckwalzenpressen für verschiedene industrielle Prozesse, darunter solche, die bei der Kalidüngemittelproduktion zur Erzeugung von MOP *granular* eingesetzt werden. Hier gilt die Maschinenfabrik KÖPPERN GMBH & CO. KG als einer der weltweit führenden Spezialisten.

Die abgebildete neue Generation von Walzenpresse, die seit etwa dem Jahr 2000 im Hause KÖPPERN entwickelt wurde, hat sich mittlerweile in der Kalidüngemittelproduktion wegen ihrer ausgezeichneten Leistungskennzahlen etabliert. Mit diesen Walzenpressen und den folgenden Apparaten zur Nachbehandlung werden im industriellen Routinebetrieb Durchsätze bis zu 130 Tonnen Schülpe pro Stunde erreicht. Etwa 70 Prozent der heute weltweit erzeugten Menge an MOP *granular* wird mit Pressen aus dem Hause KÖPPERN erzeugt. Bei den Kalidüngemittelproduzenten sind die Walzenpressen aus dem Hause KÖPPERN nicht allein wegen der hohen Leistungen, sondern auch aufgrund ihrer besonderen Wartungsfreundlichkeit und der relativ geringen Betriebskosten gefragt.

6.6 Speicherung und Transport der Fertigprodukte

Während Kalidüngemittel bei allen Produzenten über das gesamte Produktionsjahr nahezu kontinuierlich hergestellt werden, variiert die Nachfrage und somit der Handel entsprechend der landwirtschaftlichen Saison in den regionalen Märkten durchaus stark (Autenrieth 1958, /34/; Heinz & von der Osten, 1982, /381/; Schultz et al. 2000, /904/; Stahl et al. 2005, /973/). Dieser Umstand macht entsprechend große Lagerkapazitäten an den Produktionsstandorten sowie an den Überseehäfen erforderlich. Zur Produktspeicherung haben sich sowohl runde (vor allem in Nordamerika; ▸ Abbildung 69) als auch rechteckige Lagerschuppen (in Europa; ▸ Abbildung 68) in der Praxis bewährt. Die Dachneigungen der Speicher sind dem natürlichen Schüttwinkel der Kalidüngemittel angepasst.

Diese Speicher werden üblicherweise durch Bänder von oben befüllt, wogegen die Ausspeicherung mit Hilfe von Schaufelladern oder Kratzförderern (▸ Abbildung 68b) erfolgt. Da mit dem Speichervorgang auch ein mechanischer Abrieb der Kornfraktion erfolgt, ist vor der Verladung auf das Transportmittel eine Absiebung und unter Umständen die Zugabe von Staubbindemitteln notwendig (Kahle & Leib 1991, /173/; Skvirski, Chistyakov & Kozel 1991, /950/). Die hierbei abgetrennte Feinfraktion wird in den Aufbereitungsprozess zurückgeführt.

Alle großen Kalidüngemittelproduzenten transportieren den größten Teil ihrer Produktion als Schüttgut, entweder in selbstentladenden Eisenbahnwaggons oder per LKW. Der Transport zu den Exportmärkten erfolgt in der Regel durch Überseeschiffe.

Ein nur geringer Teil der Kalidüngemittel wird als verpackte Ware, davon der größte Teil in Säcken zu 50 Kilogramm, vom Produzenten direkt zum Endverbraucher ausgeliefert.

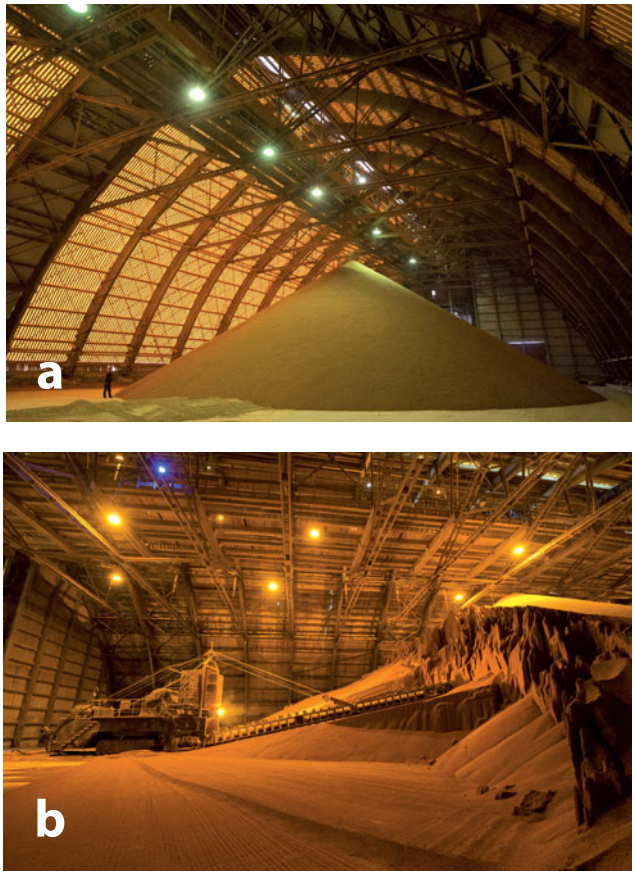


Abbildung 68 Rechteckspeicher zur Lagerung der Fertigprodukte in den Kaliwerken Berezniki 2 (a) und 4 (b), Kalilagerstätte Obere Kama in der Region Perm, Russland, von URALKALI; a – Blick in den Speicher; b – Kratzkettenförderer zur Ausspeicherung der Fertigprodukte [Fotos mit freundlicher Genehmigung von PAO Uralkali, Berezniki, Russland]



Abbildung 69 Rundspeicher zur Lagerung der Fertigprodukte im Kaliwerk Esterhazy K1, Saskatchewan, Kanada, von MOSAIC

7 MASSEN-VOLUMEN-BILANZEN DER KALIDÜNGEMITTELPRODUKTION UND MÖGLICHKEITEN ZUR ERZEUGUNG VERKAUFSFÄHIGER NEBENPRODUKTE

In den natürlichen festen und flüssigen Rohstoffen, die zur Kalidüngemittelproduktion genutzt werden, sind die Wertstoffkomponenten KCl, K_2SO_4, KNO_3 und/oder $MgSO_4$ in unterschiedlichen, stets jedoch nur in untergeordneten Masse- und Volumenanteilen enthalten. Die größten Masse- und Volumenanteile dieser natürlichen Rohstoffe nehmen andere Stoffe ein, für die es unter den heute gegebenen ökonomischen Randbedingungen nur begrenzt die Möglichkeit einer Weiterverwertung gibt. Daher müssen einige dieser Stoffe gänzlich, andere zu ihrem größten Teil einer umweltschonenden und damit ökologisch vertretbaren Beseitigung zugeführt werden.

Es sei hier darauf verwiesen, dass in der Frühzeit der Kaliindustrie vereinzelt hochwertige Kainititrohsalze lediglich aufgemahlen und in dieser Form in der Landwirtschaft als Kalidüngemittel verwendet wurden. Außer Stäuben fiel bei dieser Produktion kein weiterer Aufbereitungsrückstand an. Allerdings war ihr Nährwert als Düngemittel sehr gering, so dass sich diese Produkte langfristig nicht oder nur in ausgesprochenen Marktnischen behaupten konnten, und das Gros der landwirtschaftlichen Kalidüngemittelnachfrage auf das Standarddüngemittel MOP und untergeordnet SOP zielt. Einzelne Kalidüngemittelproduzenten, darunter K+S, bieten auch heute noch dem gemahlenen Kainitit ähnliche Produkte, zum Beispiel zur Weiden- und Wiesendüngung als Magnesia-Kainit® (11 m% K_2O, 5 m% MgO, 20 m% Na und 4 m% S) oder als MONTANAL® (18 m% K_2O, 68 m% NaCl und 3 m% andere Salze) an. Hierbei handelt es sich um eine Verwertung von Teilen ausgewählter Stoffströme aus der MOP- und SOP-Produktion. Eine allein auf die Herstellung solcher Sorten gegründete Kalidüngemittelproduktion ist jedoch aufgrund ihres geringen Marktvolumens und der geringen Erlöse für solche Nebenprodukte wirtschaftlich nicht machbar. Dies war in der Vergangenheit bereits der Fall und ist auch nach dem heute herrschenden fortschrittlichen Stand der Technik zu den Gewinnungs- und Aufbereitungsverfahren für die natürlichen Kalirohstoffe zutreffend. Soweit also durch die Kalidüngemittelproduktion auch zukünftig eine Wertschöpfung erbracht und ein Beitrag zur Ernährung der rasant anwachsenden Weltbevölkerung geleistet werden soll, müssen die Rohstoffe aufbereitet und zum Teil veredelt werden, um den Anforderungen des globalisierten Düngemittelmarktes zu genügen. Dabei fallen heute an allen weltweit 71 Standorten, an denen im Jahr 2014 im planmäßigen industriellen Betrieb Rohstoffe für die Kalidüngemittelproduktion gewonnen und aufbereitet wurden, unvermeidbar sowohl Gewinnungs- wie auch Aufbereitungsrückstände an, die entweder verwertet oder aber beseitigt werden müssen.

H. Rauche, *Die Kaliindustrie im 21. Jahrhundert,*
DOI 10.1007/978-3-662-46834-0_7, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

Wie für die Wahl der Gewinnungs- und Aufbereitungsmethoden und -verfahren auch, üben die an einem Standort natürlich gegebenen oder auch vom Menschen geschaffenen Randbedingungen wesentlichen Einfluss auf die Entsorgungsmöglichkeiten von festen und flüssigen Rückständen, also ihrer Verwertung oder aber ihrer Beseitigung, aus. Während Art und Menge der Aufbereitungsrückstände in der industriellen Praxis nahezu ausschließlich von der Zusammensetzung der natürlichen Rohstoffe abhängen, entscheiden die klimatischen, die infrastrukturellen und logistischen Randbedingungen, aber auch die Verfügbarkeit kostengünstiger Primärenergieträger, oftmals auch in komplexer Wechselwirkung miteinander, über die Machbarkeit von Verwertungsoptionen (▸ Box 7.1).

Die Kalirohsalze, die in fester oder auch in gelöster Form der Aufbereitungsanlage zur Herstellung von verkaufsfähigen Kalidüngemitteln zugeführt werden, weisen in der Regel einen KCl-Gehalt zwischen 15 und 40 Prozent auf (▸ Abschnitt 4.1 sowie Kapitel 5 und 6). Der größte Nebenbestandteil der heute weltweit in fester Form genutzten Kalirohsalze oder auch der natürlichen Lösungen[140] ist ausnahmslos Halit. In den Kalibergwerken in Saskatchewan und New Brunswick, Kanada, an der Oberen Kama, Russland und auch im Minskaja Woblasz, Belarus, enthält das geförderte Rohsalz außer Sylvin und Halit nur sehr geringe (< 5%) Anteile von Carnallit als zweitem Kalium-Träger, daneben seltener auch Anhydrit sowie unlösliche Bestandteile (i.W. Tonminerale), die allerdings einen Anteil von bis zu 10 Prozent ausmachen können.

Heute werden nur in Deutschland neben den sylvinitischen Rohsalzen, respektive Hartsalzen, auch nennenswerte Anteile carnallitischer Rohsalze gewonnen und zur Kalidüngemittelproduktion genutzt. Mittlere Masseanteile von 50 bis 60 Prozent Carnallit im Rohsalz repräsentieren relativ geringe KCl-Gehalte zwischen 14 und 16 Prozent. Anteile von Sylvin können den Wertstoffgehalt des Carnallitits steigern. Generell ist die Aufbereitung von Carnallitit aber zwangsläufig mit einem höheren energetischen Aufwand verbunden, da aufgrund des geringeren KCl-Gehaltes in jedem Falle eine höhere Rohsalzmenge pro Tonne Produkt eingesetzt und verarbeitet werden muss. Gerade deshalb macht es das Gebot der nachhaltigen Lagerstättennutzung (BBergG, §§ 1 und 48[141]) hier notwendig, die gering wertstoffhaltigen carnallitischen Rohsalze derart mit den höher wertstoffhaltigen Hartsalzen und Sylviniten zu verschneiden, dass ein hinsichtlich der Produktausbeute wie auch der Rückstandsreduzierung optimierter Aufbereitungsprozess solcher Mischsalze[142] möglich wird. Hinzu kommt die Tatsache, dass die meisten der deutschen Lagerstätten dem sogenannten Sulfattyp angehören und neben dem Wertstoff KCl auch noch die Wertstoffkomponente $MgSO_4$, respektive Kieserit, und untergeordnet auch andere K-Mg-Doppelsalze enthalten. Mit Blick auf die bereits eingangs erläuterte Einmaligkeit der auf den meisten K+S-Standorten praktizierten kombinierten Produktion von chloridischen (MOP) und sulfatischen (SOP) beziehungsweise K-Mg-Spezialdüngemitteln (▸ Kapitel 1 sowie ▸ Abschnitte 3.3, 4.1 und 6.1), ist besonders der optimale Einsatz der $MgSO_4$-Wertstoffkomponente für die nachhaltige Lagerstättennutzung wie auch für die Wertschöpfung bedeutsam. Dies erfordert sowohl die nach beiden Wertstoffen optimierte Gewinnung und das Verschneiden der aus verschiedenen Feldesteilen geförderten Rohsalzströme als auch sehr spezifische Modifikationen der klassischen Aufbereitungsmethoden in der Rohsalzaufbereitung. Solche, im Einzelnen technisch sehr aufwendigen Prozessabläufe, werden zum Beispiel im Verbundwerk Werra von K+S seit vielen Jahren erfolgreich praktiziert und laufend an die im Detail veränderlichen lagerstättengeologischen Verhältnisse wie auch an die technischen Neuerungen angepasst.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass die Aufbereitungsverfahren von kieseritischen oder auch polysulfatischen Hartsalzen und Mischsalzen deutlich komplexer sind, als jene für Sylvinit (▸ Abschnitt 6.1), da mehr und erhöhte Anteile an Nebenbestandteilen zusätzliche Prozessschritte erforderlich machen. Es liegt daher auf der Hand, dass demgegenüber eine Aufbereitung von Sylvinit mit hohen KCl-Gehalten und wenigen Nebenbestandteilen – wie er zum Beispiel in den Kalibergwerken in Saskatchewan, Kanada, an der Oberen Kama in Russland oder in Belarus gewonnen wird – Vorteile bietet. Die Aufbereitung ist wesentlich unkomplizierter, das heißt es muss weniger Aufwand während der Aufbereitung betrieben werden, was gleichbedeutend mit geringerem Energie- und Ressourceneinsatz ist.

140 In technischen und natürlichen Lösungen ist der Hauptbestandteil selbstverständlich das Lösungsmittel Wasser selbst, was hier nicht berücksichtigt wurde.

141 Mit dem Bundesberggesetz, vor allem §§ 1 und 48, aber auch §§ 7, 8, 11, 12 und 32 (BBergG 1980, /79/), ist dieses Gebot für alle in der Bundesrepublik Deutschland Bergbau treibenden Unternehmen verpflichtend verordnet. Solche Nachhaltigkeitsgebote gibt es auf nationaler Ebene auch in anderen Ländern mit Kalibergbau, so in Kanada und USA. Darüber hinaus bestehen aber auch internationale, verpflichtende Standards, Richtlinien und Erklärungen: WTO 1994a, /1138/; 1994b, /1139/; 2005, /1140/; FIDIC 2004, /272/; EC 2001, /221/; EU 2009, /257/; UN 2011, /1040/; 2012, /1041/; EC 2012a, /227/; 2012b, /228/.

142 Unter Mischsalz wird in der Kaliindustrie ein Rohsalz verstanden, dessen Kalium-Wertstoffträger zum einen der Sylvin aus dem Hartsalz und/oder dem Sylvinit und zum anderen der Carnallit aus dem Carnallitit sind. Daneben enthalten diese Rohsalze in der Regel auch sulfatische Wertstoffkomponenten, wie zum Beispiel den Kieserit.

BOX 7.1

Entsorgungspraxis im Kaliwerk New Brunswick, Kanada: Ein auf andere Standorte übertragbares Vorbild?

Komplexe Interaktion standortspezifischer Randbedingungen

Welche oftmals äußerst komplexen Wechselwirkungen einzelner Randbedingungen auch auf die Möglichkeiten und Grenzen des Rückstandsmanagements einwirken, soll vor der eingehenden Diskussion von Methoden, Verfahren und Anlagen zur Entsorgung der festen und flüssigen Aufbereitungsrückstände und der bei der Aufhaldung der festen Aufbereitungsrückstände anfallenden Salzlösungen am Beispiel des Kaliwerkes Penobsquis, New Brunswick, Kanada, der sogenannten *New Brunswick Division* der PCS, erläutert werden. Dieses Fallbeispiel wurde auch deshalb gewählt, da es dem Betreiber PCS unter den dort herrschenden Randbedingungen gelingt, alle festen Gewinnungs- und Aufbereitungsrückstände in ausgesalzene Abbauhohlräume unter Tage zu versetzen und gleichfalls auch den Anfall von flüssigen Aufbereitungsrückständen erheblich zu reduzieren. Das Kaliwerk Penobsquis wird daher, und nicht zuletzt aufgrund von Fachpublikationen – die älteste davon, eine Kurzfassung zu einem Vortrag anlässlich einer Geologentagung in Long Beach, Kalifornien, USA, mit dem, ganz im Sinne Herrmann Hesses, hoffnungsvollen Titel *"Canada's zero effluent potash mine"*[143] (Roulston 1995, /852/) –, in der Öffentlichen Diskussion mitunter als Referenz für eine rückstandsfreie Kalidüngemittelproduktion angeführt. Aus diesem Grund sollen die im Kaliwerk Penobsquis praktizierten Methoden und Verfahren zur Entsorgung der festen und flüssigen Aufbereitungsrückstände hier eine eingehende Diskussion erfahren.

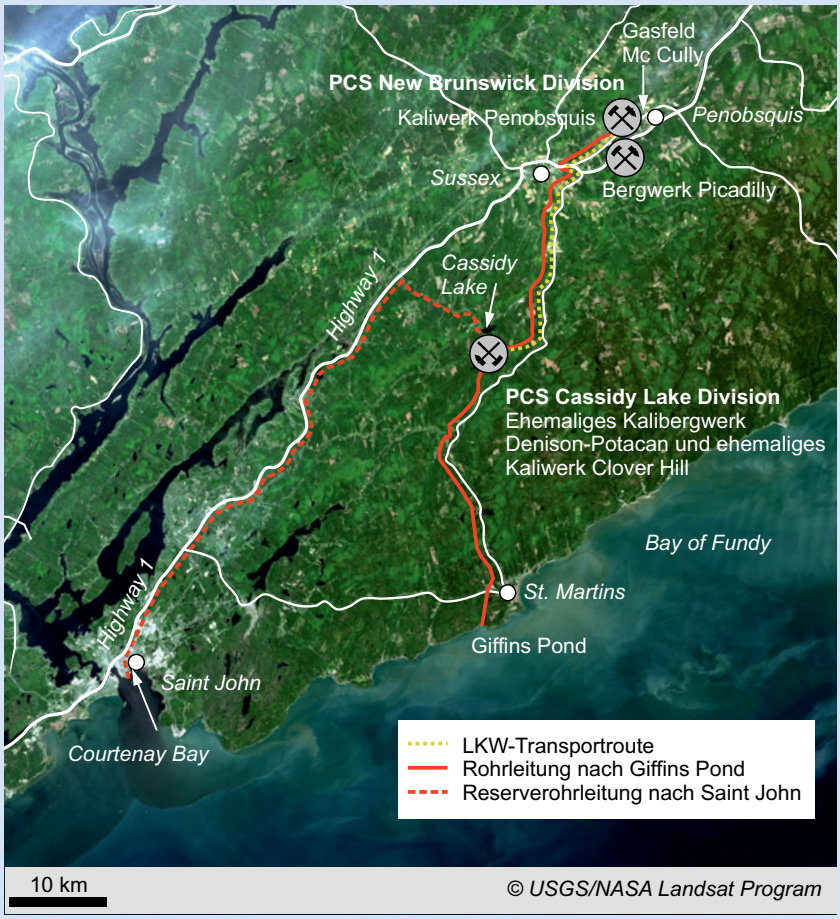
***zero effluent*: Ein konzeptioneller Ansatz im Planungsstadium**

Bevor diese Diskussion erfolgt, werden zunächst die in den Fachpublikationen dargelegten Informationen sowie die Veranlassung für deren Veröffentlichung erörtert: Die öffentlich zugänglichen Informationsquellen, in denen der Wunsch nach *"zero effluent"* für das Werk Penobsquis erwähnt wird, sind Roulston (1995, /852/) sowie Webb (2009, /1101/; 2010, /1102/):

> Die erstgenannte Quelle, Roulston (1995, /852/), ist ein *extended abstract* eines Vortrages im Rahmen einer bereits vom 25. bis 30. April 1993 in Long Beach, Kalifornien, USA, veranstalteten Tagung von Geowissenschaftlern, die unter dem Titel "*29th Forum on the Geology of Industrial Minerals*" stand, demnach weniger verfahrenstechnische oder Umweltaspekte, sondern vielmehr die Geologie, Mineralogie und Geochemie von Lagerstätten der verschiedenartigsten Industrieminerale zum Schwerpunkt hatte. Der 2 Jahre später publizierte Tagungsband belegt beides, diese Schwerpunktsetzung und auch die geowissenschaftliche Themenvielfalt. Der Beitrag von Brian Roulston ist der einzige Vortrag zum Thema Kalibergbau in dem insgesamt 27 Vorträgen enthaltenden Tagungsband. In seinem Beitrag behandelt der Autor explizit Aspekte des Rückstandsmanagement bei der Kalidüngemittelproduktion des Kaliwerkes Penobsquis, wie es im Titel auch schon zum Ausdruck kommt. Brian Roulston, der *Engineering Superintendent* vom Kaliwerk Penobsquis, beschreibt das damals unter seiner Leitung gerade begonnene Vorhaben, im Bergwerk Penobsquis eine Anlage für hydraulischen Versatz in Betrieb zu nehmen, und gibt in diesem Zusammenhang auch einen Ausblick auf die Möglichkeit einer Eindampfung der rückgeführten Transportlösungen aus dem Versatz. Vorgestellt wird allein ein Konzept; es handelt sich nicht etwa um einen Erfahrungsbericht aus dem Betrieb einer industriellen Produktionsanlage.

143 auf Deutsch: *"Kanadas abwasserfreies Kalibergwerk"*

Entsorgungspraxis im Kaliwerk New Brunswick, Kanada: Ein auf andere Standorte übertragbares Vorbild?



Geografische Lage des Kaliwerkes New Brunswick, Kanada, PCS, sowie der benachbarten Infrastruktureinrichtungen, die für die Kalidüngemittelproduktion sowie für die Beseitigung der dabei anfallenden festen und flüssigen Rückstände bedeutsam sind

In den Formulierungen von Brian Roulston kommt dieser Planungsstand, zum Beispiel bei der Beschreibung der Randbedingungen für die Planung der neuen Versatzanlage: *"The mine is situated in an environmentally sensitive area, noted for its dairy farming and salmon angling. In such an area it was recognized that the storage of waste on surface would be unacceptable, and the mine was designed around this principle."*[144] (Roulston 1995, /852/: S. 261) oder auch bei der Notwendigkeit einer Rückführung der festen Aufbereitungsrückstände in den Gewinnungsablauf: *"Recognizing that surface disposal of mine wastes would be environmentally unacceptable in an area of rolling hills, dairy farms and salmon streams, and with a maritime climate, the mine was designed to integrate the waste streams into the mining cycle."*[145] (Roulston 1995, /852/: S. 264) klar zum Ausdruck. Das von Brian Roulston im Jahre 1993 vorgestellte Gesamtkonzept ist in dieser Form auch niemals realisiert worden, einzelne Teile davon aber schon, worauf nachfolgend noch näher eingegangen werden soll.

144 auf Deutsch: *"Das Bergwerk liegt in einem ökologisch empfindlichen Gebiet, welches durch Milchwirtschaft und Lachsfischerei geprägt ist. Da die Deponierung von Abfällen über Tage somit inakzeptabel wäre, wurde das Bergwerk entsprechend konzipiert."*

145 auf Deutsch: *"Da die übertägige Entsorgung von Bergbauabfällen in einem Gebiet mit sanften Hügeln, Milchviehbetrieben, Lachsbächen und einem maritimen Klima ökologisch untragbar wäre, wurde das Bergwerk so konzipiert, dass die Abfallströme im Abbauzyklus integriert wurden."*

Der Autor der zweiten und dritten Quelle, Tim Webb, ein langjähriger und erfahrener Mitarbeiter des – nach deutschen Verständnis – Geologischen Landesdienstes von New Brunswick, zielte zunächst in seinem 2009 publizierten Review (Webb 2009, /1101/) auf die Beschreibung der Kalirohstoffpotenziale im Osten Kanadas und der historischen Entwicklung ihrer Nutzung. In einer Übersicht zu einem ehemaligen[146] und dem im Betrieb befindlichen Kaliwerk Penobsquis wird mit Verweis auf die oben bereits diskutierte Quelle Roulston (1995, /852/) der hoffnungsvolle Ansatz von "*zero effluent*" repetiert.

Die dritte Quelle, Webb (2010, /1102/), stellt einen Geologischen Exkursionsführer – *New Brunswick Field Guidebook No. 6* – dar, in dem Tim Webb eine geologische und bergtechnische Einführung zur Befahrung des Kalibergwerkes Penobsquis liefert. Im Hinblick auf die festen und flüssigen Aufbereitungsrückstände zitiert Tim Webb auch hier wiederum das frühere, in der Publikation von Roulston (1995, /852/) dargelegte Grundprinzip, ohne detailliert auf die Entsorgungspraxis einzugehen. Insofern geben diese beiden Quellen, Webb (2009, /1101/; 2010, /1102/), keine Primärinformationen wieder. In diesen beiden Quellen verweist Tim Webb jedoch auf die durch den Salzlösungszufluss im Bergwerk Penobsquis seit 1998 geänderte Situation und darauf, dass neben den flüssigen Rückständen aus dem Flotationsprozess nunmehr auch Zuflusslösungen zur Beseitigung anfallen.

Keine dieser 3 Quellen liefert eine belastbare Massen-Volumen-Bilanz einzelner Stoffströme, noch etwa des gesamten Prozesses von der Rohsalzgewinnung über die -aufbereitung bis hin zur Entsorgung der Rückstände im Bergwerk unter Tage beziehungsweise in die benachbarten Meeresarme der Bay of Fundy. Der Ansatz von *"zero effluent"* wird in den Skizzen und Schemata zwar unterstellt, kann aber anhand der in den Quellen dargelegten Informationen keineswegs quantitativ nachvollzogen werden.

Industrielle Wirklichkeit im praktischen Betrieb

Der praktische Betrieb im Kaliwerk Penobsquis stellt sich im Unterschied zu dem seinerzeit von Roulston (1995, /852/) angekündigten Konzept heute vielmehr wie folgt dar (Stand 2011):

Auf der nördlichen Flanke des Salzrückens Penobsquis-Plumweseep wird ein mit durchschnittlich 38 Prozent KCl[147] sehr hochwertiges sylvinitisches Rohsalz mittels Schneidender Gewinnung in Steiler Lagerung abgebaut. Im Zentrum des Salzrückens erfolgt außerdem eine Steinsalzgewinnung in horizontalen, aber trogartig aufgefahrenen Abbauen (▸ Abschnitt 5.1.1.3 und Abbildung 40). Die Kaliabbaue werden im Anschluss an die Gewinnung im quasi kontinuierlichen Versatzbetrieb mit trockenen Rückständen aus der Gewinnung und Aufbereitung von Steinsalz und aus der Kalirohsalzaufbereitung versetzt. In die trogartigen Steinsalzabbaue werden vor allem die feinkörnigen Rückstände aus der Schlammflotation der Kalirohsalze mittels Spülversatzverfahren eingebracht.

Der größte Teil der Produktmenge wird mittels einer mehrstufigen Flotation des Sylvinits erzeugt, wobei jedoch noch keine verkaufsfähige Produktqualität K60 – also noch keine Reinheit von 95 Prozent KCl im Flotationsgut – erreicht wird. Ein *upgrade* dieser flotativ erzeugten Zwischenprodukte wird erst durch Zumischung von KCl-Kristallisaten vorgenommen. Wie in jedem anderen Flotationsprozess müssen auch hier gewisse Mengen des Lösungsumlaufes aus dem Flotationsprozess abgeführt werden.

▶

146 Hier handelt es sich um das ehemals im Besitz von POTASH COMPANY OF CANADA, einem *Joint Venture* der KALI UND SALZ BETEILIGUNGS AG und der französischen ENTREPRISE MINIÈRE ET CHIMIQUE (EMC) befindliche, abgesoffene Bergwerk Denison-Potacan und seine Aufbereitungsanlage Clover Hill, beides zusammen heute im Besitz von PCS und als *Cassidy Lake Division* bezeichnet.

147 Webb (2010, /1102/) gibt die durchschnittliche Zusammensetzung des Förderrohsalzes mit 38 m% KCl, 60 m% NaCl und 2 m% Unlöslichem an.

Entsorgungspraxis im Kaliwerk New Brunswick, Kanada: Ein auf andere Standorte übertragbares Vorbild?

Im Kaliwerk Penobsquis werden solche Rückstandslösungen zunächst für den hydraulischen Transport eines spezifischen Versatzmaterials, der bei der Schlammflotation abgetrennten feinkörnigen Schlämme (i.W. Unlösliches, dem aber noch KCl anhaftet), genutzt. Diese werden, wie oben bereits erläutert, in den eigens dazu aufgefahrenen, trogartigen Steinsalzabbauen versetzt.

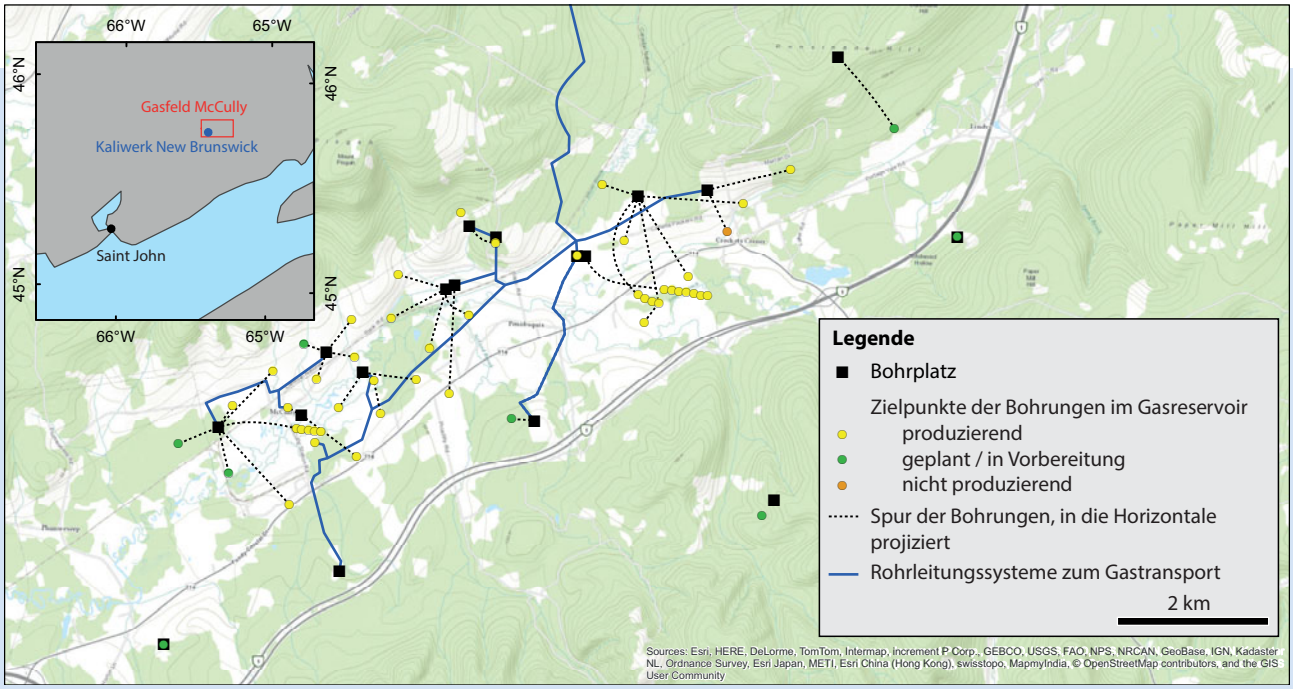
Das abgebaute Steinsalz wird aufbereitet und vor allem als Auftausalz vermarktet, wobei bestimmten Sortimenten für den Einsatz im Straßenwinterdienst auch geringe Anteile flüssiger Rückstandslösungen beigemischt und diese dadurch verwertet werden können. Auch im NaCl-Geschäft der *New Brunswick Division* von PCS wirken sich wiederum spezifische klimatische und infrastrukturelle Randbedingungen dieses Standortes besonders günstig aus: Klimatisch bedingt, herrscht in den Atlantik-Provinzen Kanadas eine besonders hohe Nachfrage nach Auftausalz. Da die maritimen Wintertemperaturen vielfach um den Gefrierpunkt schwanken, erfolgt die Eisbildung auf den Straßen nicht einmalig oder selten – so wie es in den vom kontinentalen Klima beherrschten Teilen des Landes der Fall ist – sondern tritt periodisch, nicht selten im Tagesrhythmus wiederkehrend, auf. Entsprechend hoch ist der zur Sicherung des Straßenverkehrs erforderliche Einsatz von Auftausalzen. Außerdem ermöglicht es die unmittelbare Nähe zum ganzjährig eisfreien Überseehafen Saint John der *New Brunswick Division* von PCS, mittels Schiffstransport das Massengut Auftausalz entlang der Atlantikküste Nordamerikas kostengünstig auch zu entfernten Märkten in Kanada und den USA zu transportieren und in den dortigen urbanen Ballungsgebieten den hohen saisonalen Bedarf an NaCl-Sortimenten für den Straßenwinterdienst zu bedienen.

Zusammen mit der lagerstättengeologischen Randbedingung einer Steilen Lagerung erlauben es diese beiden standortspezifischen klimatischen und infrastrukturellen Randbedingungen, hinsichtlich der Entsorgung der festen Aufbereitungsrückstände der Kalidüngemittelproduktion im Werk Penobsquis andere Wege zu gehen: Erst die Steinsalzabbaue schaffen den räumlich geeigneten und quantitativ hinreichenden Versatzhohlraum, so dass die festen Flotationsrückstände und Schlämme sowie die Rückstände aus der NaCl-Gewinnung und -aufbereitung vollständig unter Tage versetzt werden können.

Die bei der Entwässerung des Versatzmaterials aus diesen Schlämmen austretenden Lösungen enthalten – unter den am Standort Penobsquis herrschenden Randbedingungen – wirtschaftlich interessante KCl-Mengen, weshalb diese gesammelt, nach über Tage gepumpt und dort einer Eindampfkristallisation zugeführt werden. Die dabei gewonnenen reinen KCl-Kristallisate werden dem erzeugten Zwischenprodukt aus der Flotation zugemischt, um ein verkaufsfähiges MOP-Produkt mit einem KCl-Gehalt größer 95 Prozent zu erreichen.

Verfügbarkeit erschlossener Gasvorkommen in unmittelbarer Nachbarschaft

Die einmalige und für die Reduzierung der flüssigen Aufbereitungsrückstände der Kalidüngemittelproduktion alles entscheidende Randbedingung für den Standort Penobsquis ist jedoch in der ausgesprochen kostengünstigen Bereitstellung von Primärenergie für die *New Brunswick Division* der PCS zu sehen: Die Eindampfung der rückgeführten und gering wertstoffhaltigen Versatzlösungen ist am Standort Penobsquis wirtschaftlich vertretbar, da Erdgas aus der unmittelbar benachbarten Lagerstätte Mc Cully, an der PCS 50 Prozent der Nutzungsrechte hält, auf dem sehr kurzem Wege von weniger als 5 Kilometer zugeführt und für den Betrieb der Eindampfanlage genutzt werden kann. Diese Gaslagerstätte wurde im Jahr 2000 durch das Unternehmen CORRIDOR RESOURCES INC. (CRI), mit Sitz in Halifax, New Brunswick, Kanada, erkundet (CRI 2012, /173/).



Geografische Lage des Gasfeldes McCully mit den Erdgasförderbohrungen und den Gasrohrleitungen, das nur etwa 3 Kilometer nordöstlich des Kaliwerkes New Brunswick gelegen, die Primärenergie für das Eindampfen der flüssigen Aufbereitungsrückstände bereitstellt. [nach: http://www.corridor.ca, modifiziert]

Kostengünstige Primärenergie zum Betrieb der Eindampfanlage für flüssige Aufbereitungsrückstände

Seit April 2003 wird die Eindampfanlage am Standort Penobsquis mit Energie aus dieser Primärenergiequelle betrieben. Für das Jahr 2013 hatte PCS geplant, täglich etwa 295.000 Normkubikmeter Erdgas aus der Gaslagerstätte McCully zu beziehen und dafür Kosten von lediglich einer Million Kanadischen Dollar pro Jahr, umgerechnet also weniger als 690.000 Euro pro Jahr, aufbringen zu müssen (CRI 2013, /174/). Da PCS eigene Nutzungsrechte an der Erdgaslagerstätte besitzt, ist für diese Gasmenge lediglich eine Servicegebühr[148] an den Betreiber der Gasförderanlagen, die CRI zu entrichten, was diese Primärenergieversorgung für die *New Brunswick Division* derart kostengünstig möglich macht.

Das Produkt aus der Eindampfanlage ist am Werk Penobsquis wiederum die wesentliche Voraussetzung, durch Anheben des Wertstoffgehaltes des Flotations-KCl eine verkaufsfähige Produktqualität zu erreichen. Dies ermöglicht am Standort Penobsquis die einmalige Chance, die Rückstandslösungen eines Flotationsbetriebes deutlich zu vermindern. Im praktischen Betrieb gelingt es aber auch hier nicht, die flüssigen Rückstände gänzlich zu vermeiden, so dass die verbleibenden Mengen gemeinsam mit den dem Bergwerk zutretenden Salzlösungszuflüssen in die Bay of Fundy eingeleitet werden. Hierzu erfolgt zunächst ein Transport vom Bergwerk Penobsquis zur sogenannten *Cassidy Lake Division*, dem ehemaligen Bergwerk Denison-Potacan mit der zugehörigen Aufbereitungsanlage Clover Hill, wo ausreichende Speichervolumina für diese flüssigen Rückstände vorhanden sind. Bis zum Sommer 2013 wurden die Salzlösungen ausschließlich mittels Tanklastzügen über 38 Kilometer vom Werk Penobsquis zur *Cassidy Lake Division* transportiert, wozu täglich zwischen 300 und 350 Fahrten erforderlich waren. Im Frühsommer 2013 wurde eine Rohrleitung in Betrieb genommen, so dass nunmehr weit weniger Tanklasttransporte notwendig sind.

148 GPT Gebühr: *gathering, processing and transportation*; umgerechnet entspricht dies einem Gaspreis von weniger als 0,70 EUR/MWh. Zum Vergleich sei angeführt, dass ein Industrieabnehmer an einem Standort in Deutschland für die Primärenergie aus Erdgas etwa 25 bis 30 EUR/MWh Kosten zu veranschlagen hätte.

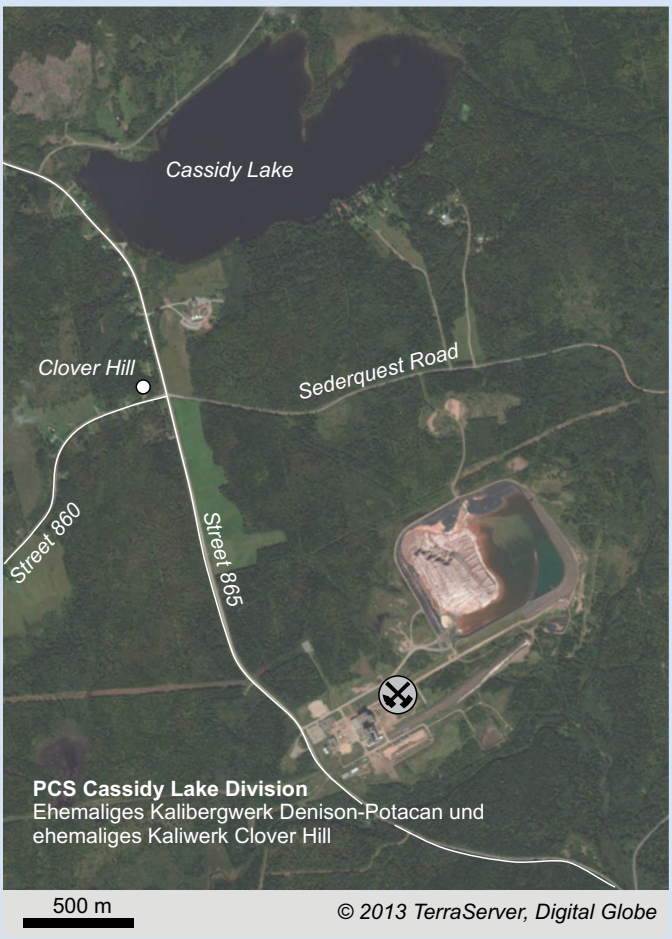
Entsorgungspraxis im Kaliwerk New Brunswick, Kanada: Ein auf andere Standorte übertragbares Vorbild?

Nachbarschaft ozeanischer Gewässer ermöglicht die Beseitigung auf kurzem Wege

Von der *Cassidy Lake Division* werden die Salzlösungen über eine noch aus der Produktionszeit des Werkes Clover Hill bestehende Rohrleitung in der Gegend von Giffins Pond, südlich von St. Martins, in eine kleine Meeresbucht der Bay of Fundy eingeleitet. Im Falle von Rohrleitungshavarien hat PCS gleichfalls die Möglichkeit, diese flüssigen Rückstände der Kalidüngemittelproduktion sowie die Zutrittslösungen auch im Umfeld der Produktverladung *Barrack Point Potash Terminal*, im Ostteil des Hafens von Saint John gelegen, kontrolliert einzuleiten.

Erhebliche Reduzierung der zu beseitigenden Rückstände aufgrund eines optimalen Zusammenspiels unterschiedlicher Randbedingungen am Standort Penobsquis der *New Brunswick Division*

Veröffentlichungen darüber, welche Mengen oder Volumina der zu entsorgenden Salzlösungen welcher Herkunft – Salzlösungszufluss versus Überschusslösungen aus dem Flotationsbetrieb – entstammen, existieren leider nicht. Eine überschlägige Abschätzung lässt erwarten, dass im Kaliwerk Penobsquis im Jahresmittel etwa 80 Kubikmeter Rückstandslösung pro 1.000 Tonnen Fertigprodukt unmittelbar aus dem Flotationsprozess nach der Eindampfkristallisation der Transportlösungen des Spülversatzes zur Beseitigung anfallen dürften. Im Vergleich mit einer reinen Sylvinitflotation – also ohne Eindampfkristallisation – entspricht dies etwa einer Reduzierung der flüssigen Rückstände auf weniger als 40 Prozent. Damit ist es im Kaliwerk Penobsquis in Anlehnung an das von Roulston (1995, /852/) seinerzeit angekündigte Konzept also gelungen, eine erhebliche Reduzierung der zu entsorgenden Rückstandsmengen herbeizuführen, nicht aber die Kalidüngemittelproduktion gänzlich ohne zu entsorgende Rückstände zu betreiben. Getreu der eingangs zitierten ehrenwerten Maxime Hermann Hesse‘ wurde auch hier das *Unmögliche* versucht, um letztlich das unter den bestehenden Randbedingungen Bestmögliche zu erreichen. Für eine allein auf MOP zielende Produktionsanlage ist dies nur wegen der am Standort Penobsquis besonders günstigen, oben eingehend erläuterten Randbedingungen, vor allem aufgrund der preisgünstigen Gasbereitstellung für den Betrieb der Eindampfkristallisation möglich, weshalb diese Praxis nicht auf andere Standorte übertragbar ist.



Geografische Lage des ehemaligen Kaliwerkes Clover Hill und des abgesoffenen Bergwerkes Dension-Potacan, die heute als Cassidy Lake Division von PCS, New Brunswick, Kanada, firmieren und in den Beseitigungspfad integriert sind.

Man sollte in diesem Zusammenhang vielleicht auch einen Vergleich mit dem Kaliwerk Zielitz von K+S anführen: Dort wird ebenfalls eine Sylvinitflotation zur Erzeugung von MOP betrieben. Die Rohsalzqualität ist hier jedoch deutlich schlechter als die des Kaliwerkes Penobsquis (Zielitz: < 14,4 m% K_2O; Penobsquis: 23 m% K_2O). Neben MOP stellt K+S in Zielitz auch Industriekaliprodukte (KCl98 und KCl99) her, die ebenfalls mittels technischer Eindampfkristallisation erzeugt werden, was auch hier zu einer vergleichsweise sehr geringen Menge flüssiger Rückstände führt (300 m^3 Rückstand pro 1.000 t Fertigprodukt).

In Tabelle 25 bis Tabelle 28 sind Massen-Volumen-Bilanzen verschiedener Aufbereitungsverfahren bei der Aufbereitung unterschiedlicher Kalirohsalze gegenübergestellt. Exemplarisch werden jeweils zu einem carnallitischen und einem sylvinitischen Rohsalz zwei zur Kalidüngemittelproduktion angewendete Aufbereitungswege verglichen. Zur Vergleichbarkeit sind jeweils (theoretisch) gleichwertige Rohsalzzusammensetzungen und ein analoges Produktportfolio angenommen worden, wobei die Verfahrensauswahl der konkreten Fallbeispiele auch von anderen Faktoren und Randbedingungen beeinflusst sein kann, wie es bereits in den Kapiteln 4, 5 und 6 besprochen worden ist.

Die Carnallititaufbereitung (▸Tabelle 25) kann mittels Heißverlösung und Kristallisation erfolgen. Hierbei bietet sich durch die Ausnutzung von Restwärme auch die Möglichkeit, das Volumen der anfallenden $MgCl_2$-Lösungen bis auf ein gewisses Maß zu verringern. Bei der Aufbereitung von Carnallitit mit Hilfe der Flotation und dem Decken ist eine solche Eindampfung der flüssigen Aufbereitungsrückstände nur durch einen dafür eigens konzipierten thermischen Prozess möglich. Durchaus ähnlich gestaltet sich auch die Massen-Volumen-Bilanz bei der Aufbereitung carnallitischer Kristallisate aus der solaren Evaporation (▸Tabelle 28).

Zur Aufbereitung sylvinitischer Rohsalze (▸Tabelle 26) wird meist ein Flotationsverfahren eingesetzt. Sylvinitische Rohsalze können aber auch mittels Heißverlösung verarbeitet werden, was zum Beispiel den Vorteil der Herstellung von KCl-Produkten mit höherer Reinheit (KCl98 oder KCl99) ermöglicht. Die anfallenden Rückstandsmengen unterscheiden sich bei beiden Verfahren nicht signifikant voneinander.

Tabelle 25 Massen-Volumen-Bilanzen zur Aufbereitung carnallitischer Rohsalze mit geringem K_2O-Gehalt mittels Heißverlösung und Eindampfungskristallisation oder mittels Flotation

	Chemische Zusammensetzung						Spezifisches Verhältnis von Rückstands-		
							-masse	-volumen	
							zu je 1 Tonne Fertigprodukt		
	KCl	NaCl	$MgCl_2$	$CaSO_4$	Unlösliches	H_2O	Masse	Fest-volumen	Schütt-volumen[149]
	[m%]	[m%]	[m%]	[m%]	[m%]	[m%]	[t]	[m³]	[m³]
Aufbereitung carnallitischer Rohsalze mittels Heißverlösung									
Rohsalz	16,1	45,0	18,1	0,3	0,0	20,5	6,6	3,6	5,9
Produkt	95,4	4,4	0,0	0,0	0,0	0,2	1,0	0,5	0,9
Feste Rückstände	2,1	86,4	2,7	0,5	0,0	8,3	3,3	1,7	2,4
Flüssige Rückstände	0,7	0,8	32,8	0,1	0,0	65,6	3,4	2,6	-
Aufbereitung carnallitischer Rohsalze mittels Flotation									
Rohsalz	16,1	45,0	18,1	0,3	0,0	20,5	7,9	4,3	7,0
Produkt	95,3	2,3	0,0	2,2	0,0	0,2	1,0	0,5	0,9
Feste Rückstände	3,6	85,3	3,1	0,0	0,0	8,0	4,0	2,0	3,0
Flüssige Rückstände	3,5	2,0	25,7	0,0	0,0	68,8	5,0	3,9	-

149 Das Schüttvolumen ergibt sich aus dem Quotient der Masse und der Schüttdichte eines Stoffes. Die Schüttdichte beträgt für die in der Tabelle genannten trockenen und feuchten Feststoffe meist zwischen 1,1 und 1,4 g/cm³. Die körnigen Feststoffe bilden keinen einheitlichen festen Block, sondern durch die unregelmäßige Struktur der Partikel sowie ihre lose Orientierung im Raum ergeben sich mit Luft gefüllte Räume zwischen den Partikeln, was die Dichte des geschütteten Volumens herabsetzt.

Theoretisch können jene Bestandteile der Kalirohsalze, die nicht zur Erzeugung der Kalidüngemittel nutzbar sind, voneinander abgetrennt werden, wodurch unter Erzeugung von Nebenprodukten die Menge anfallender Aufbereitungsrückstände reduziert werden könnte (▸ Box 7.2). Zumindest existieren dafür technische Verfahrensvorschläge, die auch, soweit sie ökologisch nachhaltig und technisch wie auch wirtschaftlich machbar sind, von den Kalidüngemittelproduzenten angewendet werden. Eine in gewisser Weise grundlegende Fragestellung ist dabei, inwieweit diese Stofffraktionen tatsächlich als Nebenprodukte verkaufsfähig sind, was vor allem von ihren Gebrauchseigenschaften und der regionalen sowie globalen Nachfrage nach solchen Nebenprodukten abhängt. Vor einer eingehenden Diskussion der heute zur Entsorgung von festen und flüssigen Aufbereitungsrückständen in der Kaliindustrie genutzten Methoden, Verfahren und Anlagen (▸ Kapitel 8) sollen deshalb im Folgenden auch die Möglichkeiten und Grenzen einer Erzeugung und Vermarktung von Nebenprodukten diskutiert werden.

Einzelne Kalidüngemittelproduzenten, darunter K+S, nutzen mineralogisch komplex zusammengesetzte Rohsalze mit relativ niedrigem KCl-Gehalt zur Herstellung von Kalidüngemitteln und verwerten dabei auch andere Wertstoffinhalte für die Herstellung von Nebenprodukten. Dies erfordert eine im verfahrenstechnischen Ablauf der Aufbereitung relativ aufwendige Kombination von verschiedenen Methoden und Verfahren (▸ Abschnitt 6.1). Hartsalze mit hohem Kieserit-Anteil werden zur Erzeugung von MOP genutzt und zugleich zur Herstellung eines Kieserit-Nebenproduktes, wie es in Tabelle 27 beispielhaft für den Standort Neuhof-Ellers von K+S dargestellt ist (K+S 2011c, /475/). Dabei wird das Rohsalz zunächst einer elektrostatischen Sortierung unterzogen, wobei sulfatische und chloridische Komponenten voneinander getrennt werden. Die sulfatische Fraktion wird zu einem verkaufsfähigen Kieserit-Produkt mit hoher Reinheit aufgearbeitet. Die chloridische Fraktion wird per Flotation zu einem MOP-Produkt und zu einem verkaufsfähigen Produkt mit geringerem KCl-Gehalt, aber etwa 17 Prozent $MgSO_4$-Gehalt (Kornkali) aufgearbeitet. Dieses Verfahren führt zu einem sehr hohen Verwertungsgrad des Lagerstätteninhaltes.

Tabelle 26 Massen-Volumen-Bilanzen zur Aufbereitung sylvinitischer Rohsalze mit hohem K_2O-Gehalt mittels Heißverlösung und Eindampfungskristallisation oder mittels Flotation

	Chemische Zusammensetzung						Spezifisches Verhältnis von Rückstands-		
							-masse	-volumen	
							zu je 1 Tonne Fertigprodukt		
	KCl	NaCl	$MgCl_2$	$CaSO_4$	Unlösliches	H_2O		Festvolumen	Schüttvolumen
	[m%]	[m%]	[m%]	[m%]	[m%]	[m%]	[t]	[m³]	[m³]
Aufbereitung sylvinitischer Rohsalze mittels Heißverlösung									
Rohsalz	30,0	62,1	0,1	1,9	5,0	0,9	3,7	1,8	3,2
Produkt	95,4	4,4	0,0	0,0	0,1	0,1	1,0	0,5	0,9
Feste Rückstände	4,1	75,6	0,1	2,3	6,2	11,7	2,9	1,5	2,1
Flüssige Rückstände	12,1	18,1	0,7	0,4	0,0	68,7	0,2	0,2	–
Aufbereitung sylvinitischer Rohsalze mittels Flotation									
Rohsalz	30,0	62,1	0,1	1,9	5,0	0,9	3,6	1,7	3,1
Produkt	95,4	3,4	0,0	0,3	0,7	0,2	1,0	0,5	0,9
Feste Rückstände	4,0	78,3	0,1	2,4	6,2	9,0	2,8	1,4	2,1

Tabelle 27 Massen-Volumen-Bilanz zur Aufbereitung eines kieseritischen Hartsalzes mit einem Gesamt-Wertstoffinhalt von 35 Prozent (KCl + $MgSO_4$) mittels ESTA® und Zwischenproduktaufbereitung mittels Flotation [K+S 2011c, /475/]

	Chemische Zusammensetzung						Spezifisches Verhältnis von Rückstands-		
							-masse	-volumen zu je 1 Tonne Fertigprodukt	
	KCl	NaCl	$MgCl_2$	$CaSO_4$	Unlösliches	H_2O		Fest-volumen	Schütt-volumen
	[m%]	[m%]	[m%]	[m%]	[m%]	[m%]	[t]	[m³]	[m³]
Aufbereitung von Rohsalz mittels ESTA®									
Rohsalz	16,3	58,9	0,4	19,0	1,1	3,8	4,4	2,0	3,8
Produkt									
Kieserit G[151]	1,5	1,5	0,0	75,0	1,3	16,4	0,6	0,2	0,5
Kieserit M[150]	1,3	1,9	0,0	81,4	0,3	11,9			
Zwischenprodukt[150]	18,9	73,6	0,5	4,9	k.A.	k.A.	3,7	–	–
Aufbereitung des Zwischenproduktes mittels Flotation									
Zwischenprodukt[150]	18,9	73,6	0,5	4,9	k.A.	k.A.	3,7	–	–
Produkt									
60er Kali fein	95,4	1,0	0,1	2,5	0,3	0,7	0,4	0,5	0,9
Kornkali 40+6[150]	62,6	8,7	0,9	17,1	2,8	5,2		0,5	0,9
Feste Rückstände	3,5	78,2	1,0	6,8	1,1	9,4	3,0	1,5	2,2

Andere Kalilagerstätten des Sulfattyps sind durch das Auftreten von Kalium-Trägermineralen in Form der sogenannten Doppelsalze[151] gekennzeichnet (▸ Abschnitt 4.1), in denen neben KCl und/oder K_2SO_4 auch $MgSO_4$ (zum Beispiel Polyhalit, Kainit, Langbeinit) enthalten ist. Aus solchen Rohsalzen können einerseits K_2SO_4 als SOP-Produkt, andererseits auch noch sulfatische K-Mg-Produkte erzeugt werden. Dies kann dadurch geschehen, dass das Rohsalz lediglich einer mechanischen Zerkleinerung und Klassierung oder zusätzlich noch einer elektrostatischen Sortierung zugeführt wird. Da keine größeren Aufbereitungsschritte notwendig sind, ist diese Methode äußerst energiesparend. Es können K-Mg-Produkte als Nebenprodukt bei einer K_2SO_4-Herstellung erzeugt und der Verwertungsgrad der Lagerstätte damit signifikant erhöht werden. Durch zusätzliche verkaufsfähige Produkte wird außerdem ein Deckungsbeitrag zu den Produktionskosten erzielt. Weltweit ist das Marktvolumen für solche, in der Regel mit geringen Nährstoffgehalten vertriebenen K-Mg-Produkte ausgesprochen gering und auf die regionalen Märkte in Nordamerika und Westeuropa beschränkt.

150 Die Angaben zur Zusammensetzung dieser Produkte sind in der Tabelle nicht vollständig wiedergegeben. Es wurden hier nur die für den Vergleich der Massen-Volumenbilanzen der einzelnen Aufbereitungsverfahren erforderlichen Parameter aufgeführt.

151 Doppelsalze sind anorganische Salze mit mehreren verschiedenen Kationen (im hier zur Rede stehenden Fall: Na^+, Mg^{2+}, K^+, Ca^{2+}) oder verschiedenen Anionen (Cl^-, SO_4^{2-}).

Tabelle 28 Massen-Volumen-Bilanzen zur Aufbereitung eines durch solare Evaporation gewonnen, carnallitischen Kristallisates mittels Heißverlösung oder mittels Flotation

	Chemische Zusammensetzung					Spezifisches Verhältnis von Rückstands-		
						-masse	-volumen zu je 1 Tonne Fertigprodukt	
	KCl [m%]	NaCl [m%]	$MgCl_2$ [m%]	$CaCl_2$ [m%]	H_2O [m%]	[t]	Festvolumen [m³]	Schüttvolumen [m³]
Natürliche Lösung	1,2	8,5	14,3	4,0	72,0	125,0	101,0	–
Rückstand der solaren Evaporation	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	7,8	3,6	6,5
Kristallisataufbereitung mittels Heißverlösung								
Kristallisat (trocken)	22,6	15,8	28,9	0,0	32,7	5,3	3,2	4,4
Produkt	96,5	2,7	0,6	0,0	0,2	1,0	0,5	0,9
Feste Rückstände	3,0	91,5	0,2	0,0	5,3	0,7	0,4	0,5
Flüssige Rückstände	1,8	1,3	25,5	4,7	66,7	22,0	16,7	–
Kristallisataufbereitung mittels Flotation								
Kristallisat (trocken)	22,6	15,8	28,9	0	32,7	5,7	3,4	5,1
Produkt	95,4	3,4	0,2	0,3	0,7	1,0	0,5	0,9
Feste Rückstände	9,3	73,0	8,3	0	9,4	1,0	0,5	0,7
Flüssige Rückstände	1,8	1,4	23,9	4,8	68,1	22,9	17,6	–

Bei der Aufbereitung von carnallitischen Rohsalzen zu Kalidüngemitteln fallen unvermeidbar erhebliche Mengen $MgCl_2$-haltige Lösungen an. Beispielsweise können für eine Aufbereitung eines Carnallitits mittels Heißverlösung unter Nutzung zusätzlicher Eindampfprozesse etwa 2,6 Kubikmeter Abstoßlösung pro Tonne Produkt entstehen (▸ Tabelle 25). Diese Lösungen könnten prinzipiell zu $MgCl_2$-Salzen, zu $Mg(OH)_2$, zu MgO oder letztlich auch zu Magnesium-Metall verarbeitet werden. Allerdings ist die Herstellung solcher Nebenprodukte zum einen sehr energie- und somit kostenintensiv und zum anderen entstehen dabei Koppelprodukte[152], wie zum Beispiel Salzsäure oder Chlorgas. Wenn eine Verwertung gelingen soll, dann muss für solche Koppelprodukte auch die Möglichkeit der Vermarktung gegeben sein, was jedoch in der Regel nicht der Fall ist. Eine Vermarktung von Salzsäure oder Chlorgas als Nebenprodukte von Standorten der Kalidüngemittelproduktion ist nicht möglich, da der heutige Bedarf an Salzsäure und Chlorgas in den Industrieländern bereits durch Koppelprodukte anderer Prozesse der chemischen Industrie vollständig gedeckt wird. Letztere sind vor allem deshalb nicht vom Markt zu verdrängen, da sie in unmittelbarer oder enger räumlicher Nachbarschaft der Verbraucher erzeugt werden, sicherheitstechnisch aufwendige Transporte solcher Gefahrstoffe also entfallen oder aber drastisch geringere Kosten verursachen, als ein Antransport von den Standorten der Kalidüngemittelproduktion.

152 Unter Koppelprodukten werden in der chemischen Industrie solche Reaktionsprodukte verstanden, die bei der Erzeugung eines verkaufsfähigen Produktes aufgrund chemischer Reaktionsgleichgewichte unweigerlich anfallen. Bei den hier zur Rede stehenden Koppelprodukten aus der potenziellen Verwertung von festen und/oder flüssigen Rückständen der Kalidüngemittelproduktion handelt es sich mehrheitlich um sogenannte starre Koppelprodukte, deren Mengenverhältnis zum Hauptprodukt aufgrund der Stöchiometrie der zugrundliegenden chemischen Reaktionen fest definiert ist.

Unter Umständen kann auch die $MgCl_2$-haltige Abstoßlösung in geringen Teilen als verkaufsfähiges Produkt dienen: Das Kaliwerk Wendover, Utah, USA, von INTREPID veräußert seine mit $MgCl_2$-angereicherte NaCl-Lösung als Enteisungsmittel für den Straßenverkehr beziehungsweise $MgCl_2$-Lösungen als Staubabsorptionsmittel. Auch in Deutschland werden solche $MgCl_2$-Nebenprodukte in solchen Mengen produziert und verkauft, wie sie vom Markt tatsächlich nachgefragt werden. DEUSA produziert in einem thermisch recht aufwendigen Verfahren festes $MgCl_2$-Hexahydrat, sogenannten synthetischen Bischofit[153], und vermarktet dieses Nebenprodukt der KCl-Produktion unter diesem Mineralnamen ebenfalls zur Staubabsorption in Mittel- und Nordeuropa. Grundsätzlich aber gelingt es nicht, die bei der Carnallititaufbereitung insgesamt anfallenden Mengen an flüssigen $MgCl_2$-Rückständen zu verwerten, so dass erhebliche Teile einer Beseitigung zugeführt werden müssen.

In diesem Zusammenhang ist der Hinweis erlaubt, dass selbst in der planwirtschaftlich ausgerichteten ehemaligen DDR der in zahlreichen F/E-Vorhaben untersuchte Ansatz einer vollständigen Verwertung der $MgCl_2$-Lösungen aus der Kalidüngemittelproduktion scheiterte, obgleich im Direktionsbereich Forschung des früheren VEB Kombinat KALI in Sondershausen – der Vorläufereinrichtung der heutigen K-UTEC – vielfältige Verfahrensvorschläge theoretisch entwickelt sowie im Labor- und Technikumsmaßstab getestet worden sind. Die umfassende volkswirtschaftliche Nutzung der Ressource $MgCl_2$ war also auch in der Planwirtschaft ökonomisch nicht zumutbar (Döring 2005, /207/).

Die Produktion und der Verkauf von $MgCl_2$-Nebenprodukten kann die Rückstandsbilanz positiv beeinflussen, abhängig vom tatsächlich verkaufsfähigen Anteil dieser Rückstandsfraktion. Die Marktfähigkeit solcher $MgCl_2$-Nebenprodukte ist vor allem von den Transportkosten, darunter aber, besonders beim Einsatz als Enteisungsmittel, auch von nationalen Vorschriften abhängig.

Bei der Diskussion möglicher Nebenprodukte aus der Kalidüngemittelproduktion muss der Vollständigkeit halber auch auf die prinzipiell technisch machbare Herstellung von Mg-Metall bei der Gewinnung und Aufbereitung von carnallitischen Rohsalzen eingegangen werden. Für die bei der Kalidüngemittelproduktion als flüssiger Rückstand unvermeidbar anfallende $MgCl_2$-Komponente des Carnallit besteht eine solche Verwertungsoption grundsätzlich. Es war wiederum die deutsche rohstoffverarbeitende Industrie, die verstärkt seit den 1930er Jahren, nicht zuletzt auch angetrieben durch die nationalsozialistische Aufrüstungspolitik, Verfahren zur Herstellung von Magnesium-Metall entwickelte und im Kaliwerk Wintershall zur industriellen Anwendung brachte (Reitermayer & Karschin 2013, /828/). Eine Verwertung der bei der Aufbereitung von Carnallitit anfallenden $MgCl_2$-Rückstände im Rahmen der Magnesium-Metallherstellung erfordert die Nutzung schmelzelektrolytischer Verfahren und bedarf damit eines sehr hohen Einsatzes von Elektroenergie, weil zunächst ein wasserfreies Ausgangsprodukt für die Magnesium-Elektrolyse bereitgestellt werden muss. Zudem stellt sich auch hier die Frage der Verwendung der dabei entstehenden Koppelprodukte. Aus diesem Grund stellt eine solche Verwertung am Standort Deutschland – aber auch anderswo – ökonomisch keine machbare und vor allem ökologisch keine nachhaltige Option dar. Heute entstammen etwa 80 Prozent der Weltproduktion von etwa 800.000 Tonnen (Stand 2011) Magnesium-Metall aus China, was aufgrund der dort herrschenden vorteilhaften Produktionsbedingungen zu quasi konkurrenzlos günstigen Preisen angeboten wird (Höck et al. 2013, /399/). Als Folge dieser staatlich sanktionierten Preispolitik der chinesischen Magnesium-Produzenten hat im Jahre 2002 auch der norwegische Mischkonzern NORSK HYDRO die Magnesium-Metallproduktion am Standort Porsgrunn, Norwegen, eingestellt, wo über mehr als zwei Jahrzehnte flüssige $MgCl_2$-Rückstände aus der Kalidüngemittelproduktion beider deutscher Staaten verwertet wurden. Eine solche, fern von der Ursprungslokation der bergbaulichen Abfälle betriebene Verwertung war über lange Zeit auch trotz der erheblichen Transportwege wirtschaftlich machbar und auch ökologisch nachhaltig, da der Standort Porsgrunn seinen enormen Elektroenergiebedarf aus Wasserkraft erzeugen konnte. Andere westliche Produzenten, darunter auch jene, die ebenfalls $MgCl_2$-haltige flüssige Rohstoffe nutzen, wie US MAGNESIUM LLC am Great Salt Lake in Utah, USA, und DEAD SEA MAGNESIUM am Toten Meer in Israel, leiden gleichfalls unter den derzeit niedrigen Magnesium-Metallpreisen (GLOBES 1999, /334/; 2002, /335/; HAARETZ 2001, /358/; WORLD BANK 2013, /1131/; TJP 2014, /1016/). Auch für *greenfield* Projekte zur Kalidüngemittelproduktion sind solche Verwertungsoptionen von flüssigen Rückständen aus der Carnallititaufbereitung eingehend untersucht worden, aufgrund der oben geschilderten starken Abhängigkeit vom Preis für Primär-Magnesium-Produkte und den Energiekosten aber nicht zur Anwendung gekommen (ERCOSPLAN 2007k, /252/; 2008, /253/).

153 Mineral mit der chemischen Formel $MgCl_2 \times 6H_2O$.

BOX 7.2

Natürliche Kalisalze als Rohstoffe für die Kalidüngemittelproduktion: Verhältnisse von Wertstoffen und Reststoffen

Verhältnis von Wert- und Reststoffen natürlich bedingt

Die primäre Bildung und die anschließende weitere geologische Entwicklungsgeschichte der natürlichen Kalisalzlagerstätten bestimmen das Verhältnis von Wertstoffanteil zu den Reststoffen im anstehenden Kalirohsalz sehr wesentlich. Die natürlichen Ressourcen sind in aller Regel polymineralische Kalisalzgesteine, in denen die nicht-Kalium-führenden Komponenten die meisten Masse- und auch Volumenanteile ausmachen, und somit die für eine Kalidüngemittelproduktion notwendigen Wertstoffminerale verhältnismäßig geringer vertreten sind. Nur in wenigen Ausnahmefällen wurden und werden auch feste Kalirohsalze gewonnen, die nahezu oder auch tatsächlich monomineralisch aus einen Kalium-Trägermineral bestehen, wie zum Beispiel seltene Umwandlungssylvinite oder auch hochreine Carnallitite.

Liberation monomineralischer Fragmente als Voraussetzung für eine effektive Aufbereitung

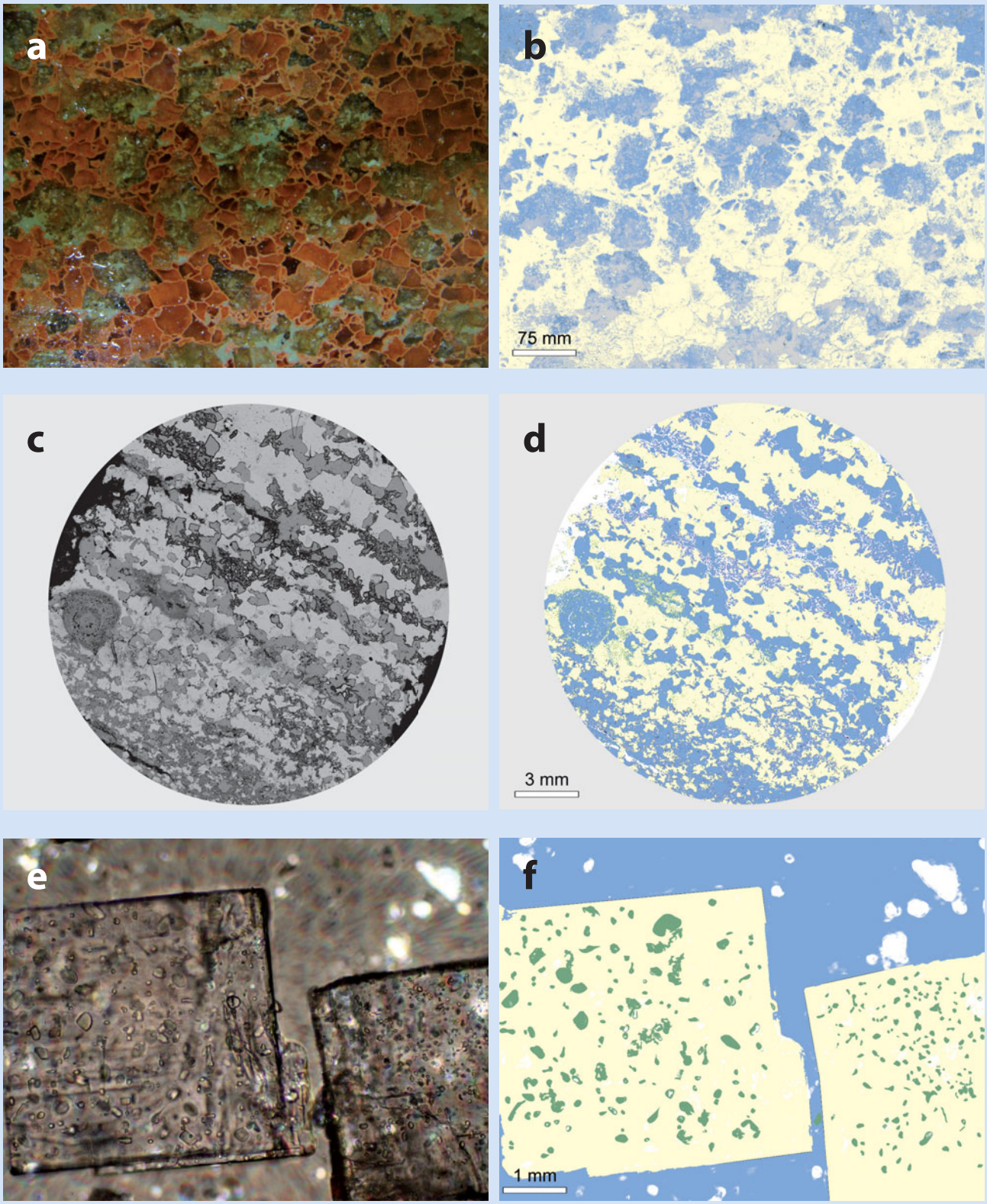
Heute werden feste Kalirohsalze aus dem geologischen Untergrund gewonnen, deren durchschnittliche Wertstoffgehalte zwischen 13 und 43 Prozent KCl liegen, zum Teil auch solche, die neben Kalium-Komponenten auch noch andere Wertstoffanteile enthalten. Die Gefüge dieser natürlichen Ressourcen zeigen stets einen granularen Aufbau, so dass die Wertstoffminerale mit den keine Wertstoffe führenden Mineralen innig verwachsen sind. Infolge dessen muss für den Aufbereitungsprozess zunächst eine Freisetzung der einzelnen mineralischen Komponenten zu monomineralischen Kornfragmenten, also die in der Aufbereitungstechnik als Liberation bekannte Zerkleinerung erfolgen. Erst diese ist eine hinreichende Voraussetzung für die Wirksamkeit des gewählten Aufbereitungsverfahrens und garantiert damit auch letztlich die Trennschärfe der eingesetzten Verfahren und damit auch das Ausbringen der Wertstoffkomponente(n). Dies gilt insbesondere für mechanische Aufbereitungsmethoden, ist aber auch für alle auflösenden Methoden nicht ohne Bedeutung.

Nicht nur Art und relativer Anteil der Reststoffe werden daher von der natürlichen Ressource Rohsalz bestimmt, sondern auch die vorbereitenden Aufbereitungsschritte. Die abgebildeten Bildpaare von Proben natürlicher Kalisalzgesteine veranschaulichen diese unterschiedlichen Anteile von Wert- und Reststoffen in verschiedenen Betrachtungsdimensionen vom Bohrkern oder Handstück über das Kornensemble im Dick- und Dünnschliff bis hin in das interkristalline Einschlussgefüge.

Oberes Bildpaar: Sylvinitprobe aus dem Kalilager Esterhazy (Prairie Evaporite Formation, Mittleres Devon), Saskatchewan, Kanada, mit einem Wertstoffgehalt von 42,3 m% KCl, a – Fotografische Aufnahme eines Bohrkernes, b - mittels bildanalytischer Verfahren erzeugte Falschfarbenaufnahme zur Unterscheidung der Wertstoffkomponente Sylvin (gelb) von den Kalium-freien Mineralen (Halit – blau, Tonminerale – grau); Mittleres Bildpaar: Sylvinitprobe aus dem Kalilager AB (Kungur, Unteres Perm), Obere Kama, Russland, mit einem Wertstoffgehalt von 31,7 m% KCl, c – Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Dickschliffpräparates (Rückstreuelektronenbild) d – mittels QEMSCAN®[154] erzeugte Falschfarbenaufnahme zur Unterscheidung der Wertstoffkomponente Sylvin (gelb) von den Kalium-freien Mineralen (Halit – blau; bei den weißen Bereichen handelt es sich um Schadstellen des Präparates); Unteres Bildpaar: Sylvinitprobe aus dem Kalilager im Ibura Member (Muribeca Formation, Apt, Untere Kreide), Sergipe, Brasilien, mit einem Wertstoffgehalt von 27,8 m% KCl, e – Polarisationsmikroskopische Aufnahme eines Dünnschliffpräparates (Schliffdicke 30 µm, Nic. 20°), f – mittels bildanalytischer Verfahren erzeugte Falschfarbenaufnahme zur Unterscheidung der Wertstoffkomponente Sylvin (gelb) von den Kalium-freien Mineralen (Halit – blau, Anhydrit und andere Sulfate – grün, bei den weißen Bereichen handelt es sich um Schadstellen des Präparates).

---

154 QEMSCAN® steht als Abkürzung für die englische Beschreibung einer Analysenmethode, die sogenannte *Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy*, also eine quantitative Bestimmung von Mineralen mittels rasterelektronenmikroskopischer Verfahren, welche die elementcharakteristischen Linien des Röntgenspektrums zur Phasencharakterisierung ausnutzt.


a
b
75 mm
c
d
3 mm
e
f
1 mm

An der Oberen Kama in Russland stellt der Kalidüngemittelproduzent URALKALI gewissermaßen als ein zusätzliches Produkt zu seinen MOP-Fertigprodukten in kleinen Mengen von einigen Hunderttausend Tonnen pro Jahr Carnallititrohsalz für die beiden von ihm juristisch und wirtschaftlich unabhängigen Betrieben OAO VSMPO AVISMA CORPORATION (AVISMA) in Berezniki und OAO SOLIKAMSKI MAGNIEVYI ZAVOD (SMZ) in Solikamsk bereit. Hier handelt es sich jedoch nicht um eine Verwertung von Aufbereitungsrückständen der Kalidüngemittelproduktion, sondern um eigens dafür abgebaute und geförderte Rohstoffströme. AVISMA und SMZ, die beide zum militär-industriellen Agglomerat der ROSOBORONEXPORT-Gruppe[155] gehören, produzieren ebenfalls mit Hilfe eines schmelzelektrolytischen Verfahrens, dem sogenannten VAMI-Prozess, primäre Magnesium-Erzeugnisse und Zwischenprodukte für die Titan-, Niob- und Tantalherstellung. Für diese russischen Produzenten, und in gewisser Weise auch für die US-amerikanischen Wettbewerber, ist die eigene Produktion von Rüstungsmetallen vor allem auch von strategischer Bedeutung, weshalb hier weder die Aspekte der wirtschaftlichen Machbarkeit noch der ökologischen Nachhaltigkeit alleinige Kriterien für die Entscheidung über den Betrieb solcher Anlagen sind.

Ein über viele Jahrzehnte verkaufsfähiges Nebenprodukt der Kaliindustrie stellte das Brom dar. Im Kalirohsalz kommt es als Alkalibromide in Form von NaBr und KBr sowie als Bromcarnallit[156] vor. Da solche Bromide ähnlich gut wasserlöslich sind wie ihre Chloridpendants, reichern sich diese in den Umlauf- und Endlösungen im Aufbereitungsprozess an, wobei der Bromidgehalt je nach Lagerstätte bis zu 5 Gramm pro Liter betragen kann. Durch Einleiten von Chlorgas als Oxidationsmittel kann elementares Brom erhalten, durch Erwärmen der Salzlösung gasförmig ausgetrieben und anschließend durch Kühlung kondensiert werden. Beispiele für Kaliwerke mit angeschlossener Bromfabrik waren die Werke Wintershall (bis 1978), Hattorf (bis 1982) und Merkers (bis 1989) im heutigen Verbundwerk Werra oder auch das ehemalige Kaliwerk in Sondershausen. Mittlerweile wurde die Bromerzeugung an den deutschen Kalistandorten aufgrund der zurück gegangenen Nachfrage nach Bromprodukten, aber auch wegen der – gemessen an den relativ geringen Deckungsbeiträgen – sehr hohen arbeitssicherheitlichen Aufwendungen beendet.

Für die Verbesserung der Rückstandsbilanz lieferte die Bromgewinnung jedoch niemals einen nennenswerten Beitrag. Ein solcher könnte maßgeblich durch die Verwertung des Hauptbestandteiles der festen Kalirohsalze, dem Natriumchlorid (NaCl), erreicht werden. Es ist daher nicht verwunderlich, dass in der mehr als 150jährigen Geschichte der Kaliindustrie zahlreiche Forschungsprojekte mit genau dieser Zielstellung gestartet wurden. Im Ergebnis dieser sind auch technisch machbare Verfahren vorgeschlagen worden, die jedoch alle wegen ungenügender ökologischer Nachhaltigkeit oder schlichtweg aus Gründen der fehlenden Wirtschaftlichkeit nicht zur Anwendung gelangten.

Heute wird das bei der Kalidüngemittelproduktion unvermeidbar als Rückstand anfallende NaCl nur zu einem geringen Teil als NaCl-Nebenprodukt verwertet, da die Aufbereitung zu verkaufsfähigen NaCl-Produkten an den meisten Standorten weltweit zusätzlicher Ressourcen an Wasser beziehungsweise Primärenergie bedarf und daher Aufwendungen in ähnlicher Größenordnung wie bei der Kaliproduktion selbst erfordern würde. Fast immer ist es vergleichsweise wirtschaftlicher, wie auch ökologisch nachhaltiger, das vielerorts gewonnene Massengut Steinsalz lokal zu nutzen, anstatt die Rückstände aus der Kaliindustrie energie- und kostenintensiv als Nebenprodukt aufzubereiten und über weite Distanzen zu den Märkten zu transportieren (Schmid 1951, /887/; Kahle & Scherzberg 2000, /496/; Webb & Smith 2009, /1104/; CMAI 2011, /164/). Dies gilt um so mehr für NaCl-Rückstände aus der flotativen Aufbereitung fester Kalirohsalze, die verfahrenstechnisch bedingt durch anhaftende Flotationsreagenzien verunreinigt sind. Um den Flotationsrückstand zu einem nutzbaren NaCl-Nebenprodukt zu verarbeiten, müsste zunächst die technisch und energetisch aufwendige Abtrennung der bei der Flotation (▸ Abschnitt 6.1.1) als Sammlerreagenzien notwendigen organischen Verbindungen von Carboxylaten, Alkylsulfaten, Alkansulfonaten, Alkylpolyethersulfaten, Alkylmorpholinsalzen oder N-Alkylammoniumsalzen erfolgen.

Auch die soziale Unverträglichkeit (BMBF 2013, /107/) einer theoretisch denkbaren – und mitunter in der Öffentlichen Diskussion geforderten – globalen Vermarktung der NaCl-Rückstände zur Reduzierung der Rückstandshalden in den Industrienationen sei erwähnt: In vielen Teilen der Welt ist die Steinsalz-Produktion aus Hochgebirgssalaren, in Meerwassersalinen oder auch durch artisanalen Bergbau[157]

155 FGUP ROSOBORONEXPORT: ФГУП Рособоронэкспорт – Федеральное государственное унитарное предприятие Рособоронэкспорт – auf Deutsch: Föderales staatliches Monopolunternehmen ROSOBORONEXPORT, das in der Russischen Föderation die Produktion und den Vetrieb rüstungswichtiger Güter lenkt.

156 Mineral mit der chemischen Formel $KCl\text{-}MgBr_2 \times 6H_2O$.

157 Als artisanaler Bergbau wird ein weltweit, besonders aber in Entwicklungsländern betriebener Kleinbergbau zur Gewinnung mineralischer Rohstoffe mit sehr einfachen, nicht industriellen Methoden bezeichnet. Einschlägige Organisationen schätzen, dass weltweit derzeit etwa 15 Millionen Menschen in dieser Art Kleinbergbau ihre einzige Erwerbsquelle haben (Wotruba 2004, /1132/).

die einzige Erwerbsquelle für eine große Zahl von Menschen in diesen Regionen. Abgesehen von der fehlenden sozialen Nachhaltigkeit sprechen aber vor allem die oben genannten technischen und wirtschaftlichen Aspekte gegen eine großmaßstäbliche Verwertung von NaCl-Rückständen der Kalidüngemittelproduktion.

Aus den eingangs erwähnten Gründen ist es daher nicht verwunderlich, dass die NaCl-Rückstände weltweit keine – gemessen an ihrer Gesamtmenge – nennenswerte Verwertung erfahren. Jedenfalls wird weltweit nur eine sehr geringe Menge der bei der Kalidüngemittelproduktion anfallenden NaCl-Rückstände zu verkaufsfähigen Nebenprodukten verarbeitet:

Von MOSAIC werden im Kaliwerk Carlsbad, New Mexico, USA, die halitischen Rückstände in die Laguna Grande, einen natürlichen, abflusslosen See eingeleitet. Aufgrund der an diesem Standort herrschenden klimatischen Verhältnisse kommt es zur solaren Evaporation und NaCl kristallisiert und kann als Bodenkörper geerntet und für industrielle Zwecke weiterverkauft wird.

Im Kaliwerk Vanscoy, Saskatchewan, Kanada, werden vom Kalidüngemittelproduzenten AGRIUM feste NaCl-Rückstände an das eigenständige Unternehmen NSC MINERALS INC (NSC), ansässig in Saskatoon, Saskatchewan, Kanada, zur Verwertung abgegeben. NSC stellt daraus saisonal Auftausalz für den lokalen Straßenwinterdienst, technische Salze für Gerbereianwendungen, Bohrspülungen und Baumaterialzusätze, zur Wasserenthärtung und Viehsalz zur Tierernährung her.

Auch an den von MOSAIC in Saskatchewan, Kanada, betriebenen Standorten Belle Plaine und Esterhazy werden geringe Teile der festen Aufbereitungsrückstände durch die Herstellung von Nebenprodukten verwertet. In Belle Plaine, wo MOSAIC die Eindampf-/Kühlkristallisation technischer Lösungen aus der Soltechnischen Gewinnung betreibt, werden von dem Kaliproduzenten selbst auch Auftausalz für den lokalen Straßenwinterdienst, technische Salze zur Wasserenthärtung und Viehsalz zur Tierernährung als Nebenprodukte hergestellt. Außerdem veräußert MOSAIC sporadisch auch gewisse Anteile der festen NaCl-Rückstände aus dem KCl-Kristalisationsprozess an das Steinsalzwerk Windsor, Ontario, von MORTON SALT INC. In Esterhazy stellt MOSAIC hingegen dem eigenständigen Unternehmen KAYWAY INDUSTRIES (KAYWAY), ansässig in Esterhazy, Saskatchewan, Kanada, feste Rückstände zur Verfügung. KAYWAY verwertet diese wiederum saisonal als Auftausalz für den lokalen Straßenwinterdienst.

An dem von PCS betriebenen Kaliwerk Rocanville, Saskatchewan, Kanada, verwertet NSC ebenfalls kleine Mengen der jährlich anfallenden festen Rückstände zur Herstellung von Auftausalz, von technischen Salzen für Gerbereianwendungen, für Bohrspülungen und Baumaterialzusätze, zur Wasserenthärtung und Viehsalz zur Tierernährung. Am Standort Penobsquis, New Brunswick, Kanada, ist dieses Auftausalzgeschäft in den Händen des Kalidüngemittelproduzenten PCS. Mengenmäßig sind es überall die Auftausalze, die diese insgesamt aber sehr geringe Produktion von Nebenprodukten dominieren. Besonders NSC bewirbt potenzielle Kunden mit großen Verarbeitungskapazitäten an den Standorten Vanscoy und Rocanville, vermag die vermeintlich installierten Leistungen von bis zu 6.000 Tonnen Feststoff am Tag aber nicht auszulasten. Insgesamt werden in den beschriebenen nordamerikanischen Kalibergwerken etwa 700.000 Tonnen Steinsalz-Rückstände einer weiteren Nutzung zugeführt, was global weniger als 0,5 Prozent der gesamten festen Rückstände entspricht.

In ähnlicher Weise verwerten auch der deutsche Produzent K+S und BELARUSKALI gewisse Anteile der NaCl-Rückstände. Im Kaliwerk Berezniki 4 von URALKALI wurden über einen kurzen Zeitraum geringe Anteile (< 10%) der halitischen Rückstände zur Herstellung von NaCl-Lösungen verwertet, welche zur Sodaherstellung genutzt wurden (URALKALI 2011c, /1047/), was mittlerweile wegen des dafür erforderlichen hohen Energieaufwandes wieder eingestellt wurde (Baumgertner & Belyakov 2012, /78/; ERCOSPLAN 2015, /255/).

Der Kalibergbau und die Kaliaufbereitung waren in ihrer mehr als 150jährigen Geschichte aus ökonomischen Motiven stets bemüht, die Verluste beim Ausbringen der Wertstoffkomponente zu senken und/oder durch verkaufsfähige Nebenprodukte Deckungsbeiträge für die Betriebskosten zu erzielen (Hoffmann 1972, /404/; Eatock 1982, /219/; 1985, /220/; Fricke 1986, /292/; Duchrow et al. 1991, /215/; Schultz et al. 2000, /904/). Umfangreiche F/E-Maßnahmen wurden hierzu vor allem seit der Einführung der Großgerätetechnik unter Tage und den damit sprunghaft angestiegenen Fördermengen unternommen. Die bessere Auslastung der Lösespannen im Heißverlösungsprozess oder auch die neuartigen Flotationsreagenzien sind Ergebnisse dieser Entwicklungsarbeit. Andere Zielrichtungen wurden nach jahrelanger Forschungsarbeit ohne praxistaugliche Resultate nicht weiter verfolgt. Zusammenfassend stellt sich die Situation heute wie folgt dar:

Grundsätzlich ist der Spielraum gering, da in der modernen Kaliindustrie ohnehin allgemein bereits hohe Wertstoffausbeuten erzielt werden und diese auch eine Voraussetzung für eine erfolgreiche Position im weltweiten Wettbewerb sind. Die Herstellung von Düngemitteln mit geringen Nährstoffgehalten reduziert zwar den Anfall fester Rückstände, kann jedoch aufgrund der nur geringen Nachfrage nach solchen Produkten auch nur sehr bedingt in Erwägung gezogen werden.

Traditionell ist K+S in diesem Segment sehr erfolgreich, was letztlich auf die jahrzehntelange Düngemittelberatung und den permanenten Dialog mit den landwirtschaftlichen Verbrauchern zurückzuführen ist. Dieses Bewusstsein reift mittlerweile auch in der ICL-Gruppe, während andere Produzenten bis heute keinerlei derartige Aktivitäten entwickelt haben.

Bei der Aufbereitung carnallitischer Rohsalze ist zwar der Anfall fester Rückstände oft spezifisch gering, jedoch fallen unvermeidbar aufgrund des freigesetzten Kristallwassers und der $MgCl_2$-Komponente des Minerals Carnallit entsprechend große Mengen flüssiger Rückstände an.

Insbesondere im deutschen Kalibergbau wurden durch die Beibehaltung der bohr- und sprengtechnischen Gewinnungsmethoden gute Möglichkeiten zur selektiven, das heißt verdünnungsarmen Gewinnung geschaffen und auch konsequent genutzt. Die Gewinnung des geringmächtigen Flözes Hessen beziehungsweise seines Begleitflözes im Werra-Kalirevier ist ein Beispiel dafür. Diese Möglichkeit der Reduzierung beibrechender wertstofffreier und/oder -armer Gesteinspartien und damit auch der Aufbereitungsrückstände sowie des Verbrauches von Prozessreagenzien ließe sich bei der Schneidenden Gewinnung mit Vollschnittmaschinen nicht in gleicher Weise umsetzen.

Die Verwertungsmöglichkeiten für die festen Rückstände der Rohsalzaufbereitung sind naturgemäß sehr beschränkt, da es sich ja allgemein um Stoffe handelt, die als nicht wertstoffhaltig aus dem Prozess entfernt werden müssen. Eine direkte Verwertung bleibt daher bis auf wenige Ausnahmen ausgeschlossen. So ist ein Fremdversatz, das heißt das Bereitstellen von Versatzmaterial zur Sicherung von Abbauhohlräumen in einem fremden Bergwerk bereits in geringem Umfang praktiziert beziehungsweise in anderen Fällen angedacht worden. Dafür müssen jedoch besondere logistische und infrastrukturelle Voraussetzungen erfüllt sein, wie zum Beispiel ein zeitnaher Bedarf, die grundsätzliche Eignung des Materials, ein kostengünstiger Transport und anderes mehr, was jedoch nur selten der Fall ist.

Eine Teilverwertung der festen Aufbereitungsrückstände durch Gewinnung weiterer Rohsalzbestandteile, die neben der Hauptproduktion von MOP und SOP als Rohstoffe oder Produkte nachgefragt werden, hat dagegen größere Bedeutung und wird vielfach praktiziert. Seit langem bekannt ist die Gewinnung von Kieserit aus dem Rückstand von Löse- und Flotationsprozessen, in modernen Anlagen auch durch Separation aus dem Rohsalz bei der elektrostatischen Aufbereitung.

Die Kieserit-Gewinnung kann auch mengenmäßig von Bedeutung sein, immerhin können kieseritische Hartsalze und carnallitische Rohsalze 15 bis 30 Prozent Kieserit enthalten.

Die Verwertung von NaCl aus den festen Rückständen ist dagegen nur wenig verbreitet, wie es vorab bereits erläutert worden ist, obwohl NaCl hier den größten Anteil ausmacht. Eine Aufbereitung solcher Rückstände zu NaCl-Produkten mit 98 bis 99 Prozent NaCl ist theoretisch vorstellbar, aber mit einem erheblichen Primärenergieverbrauch verbunden, daher in der Regel weder wirtschaftlich machbar noch ökologisch nachhaltig. Zudem bestehen echte Marktchancen nur für solche Produktionsstandorte, wo die Transportkosten zum Verbraucher keine zusätzliche Barriere darstellen.

Eine indirekte Verwertung von Nebenbestandteilen der festen Aufbereitungsrückstände wird für die $MgSO_4$-Anteile praktiziert, indem K-Mg-Salze, zum Beispiel Langbeinit und Schönit, hergestellt und als Produkte verkauft werden. Man muss dabei zwar einen niedrigeren K_2O-Gehalt in Kauf nehmen, hat aber den Vorteil eines Zwei-Komponenten-Düngemittels mit den Hauptkomponenten Mg und K mit zusätzlichem S-Anteil. Allerdings sind auch für diese Nebenprodukte nur wenige Vermarktungsmöglichkeiten gegeben. Die gemessen an MOP und SOP deutlich schlechteren Löseeigenschaften dieser Düngemittel wirken sich auch auf den Nährstoffübergang in den Boden und die Pflanze nachteilig aus und schränken deren Nachfrage ein.

Insbesondere seitens der Öffentlichkeit werden solche Zielrichtungen früherer F/E-Themen heute erneut aufgegriffen und im Sinne einer nachhaltigeren Lagerstättennutzung, aber auch im Hinblick auf die Reduzierung der festen Aufbereitungsrückstände ins Gespräch gebracht, wobei vielfach Bezug genommen wird auf frühere Fortschrittsberichte zu zum Teil seinerzeit noch unfertiger F/E-Vorhaben. Es soll aus diesem Grund im Folgenden auf einige dieser auf den ersten Blick durchaus innovativ erscheinenden Ansätze eingegangen werden.

Dem technischen Prinzip nach ist die Eindampfung von salzhaltigen Rückstandslösungen zur Verringerung des Abstoßvolumens möglich. Allerdings ist eine solche Eindampfung stets mit einem erheblichen Energieaufwand verbunden und steht in starker Abhängigkeit von den Energieerzeugungskosten. Eine Eindampfung von NaCl/KCl-haltigen Lösungen sowie auch von $MgCl_2$-haltigen Lösungen zur Vermeidung von Lösungsrückständen findet derzeit keine Anwendung in der Kalisalzaufbereitung.

Wie bereits erläutert ist auch die Verwertung der bei der Aufbereitung von Carnallitit beziehungsweise Mischrohsalzen mit erheblichem Carnallit-Gehalt anfallenden Mengen von $MgCl_2$-Lösungen nur in engen Grenzen wirtschaftlich machbar und vielfach auch ökologisch nicht nachhaltig. Die Eindampfung solcher Lösungen ist zwar theoretisch denkbar, um daraus Produkte wie zum Beispiel Bischofit, MgO oder weiterführend Mg-Metall herzustellen. Allerdings ist das Marktvolumen für diese Produkte begrenzt und die Eindampfung erfordert erhebliche Energiemengen, die eine kostendeckende Vermarktung ebenfalls kaum möglich machen. Auch dabei stellt sich wiederum die Frage nach Vermarktungsmöglichkeiten für die unweigerlich anfallende und durch die stöchiometrischen Verhältnisse diktierte Menge von Koppelprodukten.

Die Methode der Lösungstiefkühlung dient hauptsächlich der Steigerung des Ausbringens an KCl-Wertstoff. Eine Anwendung an den weltweiten Standorten der Kalisalzaufbereitung findet derzeit allerdings nicht statt. Im Jahre 1986 wurde im ehemaligen Kaliwerk Merkers nach vorlaufender Forschungs- und Entwicklungsarbeit und erfolgreichem Probebetrieb eine Anlage zur Tiefkühlung von Betriebs- und Abstoßlösungen der Kalisalzaufbereitung in Betrieb genommen und bis zur Stilllegung des gesamten Kaliwerkes 1993 erfolgreich betrieben (▸ Tabelle 29). Die Anlage bestand aus 4 Kühlstufen, jede einzelne dieser Kühlstufen aus Kristallisator, Umwälzpumpe und liegendem Rohrbündelwärmeübertrager. In einem nachgeschalteten Eindicker wurde das erzeugte KCl-Kristallisat von der gekühlten Lösung getrennt und zur Weiterverarbeitung zu MOP bereitgestellt. Die Kühlung erfolgte im indirekten Wärmeaustausch mit einer speziellen Kühllösung, die in einer Kälteanlage im Kreislaufbetrieb bereitgestellt wurde.

Tabelle 29 Technische Parameter der Lösungstiefkühlanlage des ehemaligen Kaliwerkes Merkers, Thüringen, Deutschland; gegenübergestellt sind die nach verfahrenstechnischen Berechnungen geplanten und im großtechnischen Probebetrieb tatsächlich erreichten Kenngrößen

	Nach verfahrenstechnischen Berechnungen geplant:		Im großtechnischen Probebetrieb tatsächlich erreicht:	
	Eingangslösung	Ausgangslösung	Eingangslösung	Ausgangslösung
Durchsatz [m^3/h]	305,0		290 – 340	
Temperatur [°C]	22,0	0,0	26,9	2,4
$MgCl_2$ [g/l]	236,0	237,0	266,9	271,3
$MgSO_4$ [g/l]	51,0	40,0	40,2	38,4
KCl [g/l]	62,0	40,4	59,2	40,3
NaCl [g/l]	59,0	52,4	50,0	42,7
H_2O [g/l]	882,0	902,0	863,6	874,6
Dichte [g/cm^3]	1,2900	1,2718	1,2799	1,2673

Zur Kühlung gelangte eine Abstoßlösung aus der Mischsalzaufbereitung. Ziel des Prozesses war die Absenkung des KCl-Gehaltes in der Lösung durch Kristallisation und Bereitstellung des KCl-Kristallisates zur Weiterverarbeitung zu MOP. Mit dieser Lösungstiefkühlanlage wurde seinerzeit, unter den ökonomischen Randbedingungen der früheren DDR-Planwirtschaft, eine Produktion von 25.000 bis 30.000 Tonnen pro Jahr KCl erreicht. Dieses Verfahren ist auch aktuell wieder in der Diskussion. So hat K+S zum Beispiel im Jahre 2008 im Zusammenhang mit dem Maßnahmenpaket zum Gewässerschutz an der Werra die Errichtung einer Laugentiefkühlung geplant:

> Im Produktionsprozess des Standortes Hattorf fällt ein Teilstrom von Salzlösungen mit einem jährlichen Volumen von 2,2 Millionen Kubikmeter mit einer Temperatur von etwa 30° C an. Durch Abkühlen dieser Lösung auf minus 10° C gelingt es, den Restgehalt an KCl und $MgSO_4$ zu senken, indem ein Gemisch aus KCl und $MgSO_4$ x $7H_2O$ auskristallisiert. Das Kristallisatgemisch könnte voraussichtlich als Ausgangsprodukt in der SOP-Produktion weiterverarbeitet werden. Den flüssigen Rückstandsmengen würden somit etwa 70.000 Tonnen KCl und etwa 75.000 Tonnen $MgSO_4$ entzogen, was eine Halbierung der Gehalte von KCl und $MgSO_4$ in diesen Rückstandslösungen bewirken würde.

Der Beitrag zur Reduzierung des Volumens anfallender flüssiger Rückstände ist dagegen gering, er beträgt etwa 85.000 Kubikmeter pro Jahr. Das bedeutet, das Volumen dieser flüssigen Rückstände könnte um 4 Prozent reduziert werden. Allerdings erfordert dieser Tiefkühlprozess auch einen erheblichen Energieaufwand, weshalb die wirtschaftliche Machbarkeit und die ökologische Nachhaltigkeit derartiger Verfahrensschritte unter den am Standort und am Energie- wie auch am Kalimarkt herrschenden Randbedingungen geprüft werden muss. Zum Zeitpunkt, als das Maßnahmenpaket seitens K+S vorgeschlagen wurde, lag der Preis für eine Tonne MOP fob bei 780 US-Dollar, heute hingegen, also im Mai 2015, liegt dieser nur noch bei 320 US-Dollar (▸ Abbildung 7). Der industrielle Preisindex für Primärenergie hat sich hingegen nur leicht erhöht (DESTATIS 2012, /193/). Eine heute durchzuführende Prüfung der Machbarkeit dieses Vorhabens muss selbstverständlich solche geänderten Rahmenbedingungen würdigen. Parallel zu den Untersuchungen der Lösungstiefkühlung beschäftigte sich K+S alternativ mit der Frage der weiteren Eindampfung bestimmter Salzlösungen. Im Ergebnis dieser Untersuchungen stellte sich heraus, dass die Eindampfung und die Aufbereitung der dabei entstehenden Kristallisate im Vergleich zur Lösungstiefkühlung größere Vorteile aufweist. Die eigentlich zu lösende Herausforderung bestand in der Entwicklung geeigneter Trennverfahren für die bei der Eindampfung entstehenden Kristallisate, was letztlich mit der Adaption bewährter Aufbereitungsverfahren auf die Verarbeitung der aus den Rückständen zu gewinnenden Minerale gelang. Im Rahmen der Umsetzung des Maßnahmenpaketes ersetzt somit diese neue Anlage mit der Bezeichnung Kainit-Kristallisations-Flotationsanlage die ursprünglich vorgesehene Lösungstiefkühlung.

Letztlich zielt auch das sogenannte Maßnahmenpaket zum Gewässerschutz im Verbundwerk Werra auf eine weitere Steigerung der Wertstoffausbeute, indem Teilströme von festen und flüssigen Aufbereitungsrückständen, die früher zu beseitigten waren, nunmehr einer Verwertung durch verbesserte, im Detail komplex miteinander verbundene Verfahren zugeführt werden. Diese Verwertung geschieht in speziell dafür neu errichteten Anlagen, wie zum Beispiel der Eindampfanlage für Kainit im Kaliwerk Wintershall und der Anlage zur kalten Vorzersetzung im Kaliwerk Unterbreizbach, beziehungsweise in erweiterten Anlagen, wie zum Beispiel der ESTA® im Kaliwerk Hattorf (K+S 2008a, /467/; 2008b, /468/; 2009, /469/; 2010c, /472/; 2012d, /480/; Balduf & Handke 2014a, /57/; Gerling 2014a, /324/; 2014c, /326/). K+S plante zur Realisierung all dieser Maßnahmen bis Ende 2015 ein Investitionsvolumen von mehr als 360 Millionen Euro und hat bereits einen Großteil dieser Maßnahmen umgesetzt (K+S 2011b, /474/; 2012e, /481/).

Grundsätzlich wird die Machbarkeit derartiger Verfahrensvorschläge stets maßgeblich von der Verfügbarkeit von Überschussenergie und der Möglichkeit, das Kristallisat weiter aufbereiten zu können, bestimmt. Da die Aufbereitungsprozesse in der Kalidüngemittelproduktion heute jedoch allesamt hohe thermische Wirkungsgrade aufweisen, weil sie in ihrer Entwicklung bereits frühzeitig (▸ Kapitel 2) und auch fortlaufend hinsichtlich Wasser- und Energieverbrauch optimiert worden sind (▸ Abschnitt 6.1), besteht hier – wenn überhaupt – nur ein sehr geringer Spielraum. Auch gilt es, die Möglichkeit zur Aufbereitung der Kristallisate stets standortspezifisch zu prüfen.

Ein gleichermaßen ernüchterndes Resultat ergibt auch die Prüfung von technischen Alternativen zur Verwertung der Stoffinhalte von Salzlösungen, die durch die Einwirkung von Niederschlägen auf die in Halden abgelagerten festen Aufbereitungsrückstände entstehen (ERCOSPLAN 2007a bis 2007g, /241/ bis /248/), worauf jedoch erst im Abschnitt 8.3 näher eingegangen werden soll.

Die vorangestellte Diskussion aller in die Massen-Volumen-Bilanz der Gewinnung und Aufbereitung der natürlichen Kalirohstoffe einfließenden, vor allem naturgegebenen oder auch von den Märkten möglicher Nebenprodukte vorgegebenen Sachverhalte zeigt, dass auch bei Anwendung modernster Methoden, Verfahren und Anlagen bei der Aufbereitung fester Rohsalze oder technischer oder auch natürlicher Lösungen zu Kalidüngemitteln unvermeidbar feste sowie flüssige Rückstände anfallen, die einer umweltschonenden Beseitigung zugeführt werden müssen. Zusammenfassend sind in Tabelle 30 für die wichtigsten

Standorte und die wesentlichsten Verfahren der Kalidüngemittelproduktion die spezifischen Wertstoffverluste und die dabei anfallenden spezifischen Massen fester und flüssiger Aufbereitungsrückstände pro Tonne Produkt gegenübergestellt. Diese Bilanz wäre aber unvollständig, würde man nicht auch die Stoffströme mit einbeziehen, die wiederum bei der Beseitigung der nicht verwertbaren festen Rückstände entstehen. Gering mineralisierte Salzlösungen, die erst im Zuge der Aufhaldung fester Rückstände an der Erdoberfläche (▸ Abschnitt 8.1.2) aufgrund einwirkender Niederschläge auf die Haldenkörper entstehen, sind dem Gliederungsprinzip von Tabelle 30 nicht zuzuordnen und folglich dort auch nicht dargestellt. Da es sich hierbei aber ebenfalls um Abfälle der Kalidüngemittelproduktion handelt, soll bereits in diesem Abschnitt auf tatsächliche und vermeintliche Strategien zu ihrer Vermeidung und Verwertung, im späteren Abschnitt 8.1.3 auf die Methoden, Verfahren und Anlagen zu ihrer Beseitigung eingegangen werden.

Weltweit erfolgt an keinem Standort der Kalidüngemittelproduktion eine Aufbereitung dieser durch Niederschlagseinwirkung auf die aufgehaldeten festen Aufbereitungsrückstände entstehenden Salzlösungen, etwa im Hinblick auf die Rückgewinnung von KCl-Wertstoff und/oder zur Erzeugung von Nebenprodukten anderen Stoffinhalts. Nichtsdestotrotz wurden und werden in der Öffentlichen Diskussion in Deutschland in jüngerer Vergangenheit jedoch vielfach Verfahrensvorschläge zur Verwertung solcher gering wertstoffhaltigen Salzlösungen unterbreitet und die Brauchbarkeit des Vorschlages nicht selten mit dem Argument untermauert, es handle sich um anderenorts erfolgreich praktizierte und damit um Methoden und Verfahren, die dem Stand der Technik zuzuordnen sind (Krupp 2008, /564/; 2011, /565/; 2014a, /566/; 2014b, /567/; WWA 2009, /1142/; 2010, /1143/; 2014a, /1144/; Marx et al. 2012b, /624/; Marx et al. 2013, /622/; K-UTEC 2014, /466/). Dies ist wohl vornehmlich aus der Bedeutung dieser bei der Haldenbewirtschaftung auch in der Nachbetriebsphase eines Kaliwerkes dauerhaft anfallenden Salzlösungen heraus motiviert und insofern auch im Sinne der im Vorwort zitierten Maxime Hermann Hesses durchaus nachvollziehbar und ehrenwert.

Tabelle 30 Gegenüberstellung von Wertstoffverlusten und den dabei anfallenden festen beziehungsweise flüssigen Aufbereitungsrückständen für ausgewählte Standorte der Kalidüngemittelproduktion, dargestellt als rohsalz- beziehungsweise produktspezifische Kennziffern [K+S 2009, /469/; INTREPID 2012a, /437/; PCS 2012, /738/; SEC 2012, /913/; ERCOSPLAN 2015, /255/]

Kaliwerk	Aufbereitungsverfahren	K_2O-Gehalt im Rohstoff [m%]	KCl-Verluste [%]	Verhältnis von Rückstands- zu Produktmenge[158] [$t/t_{Produkt}$]	
				Feste Rückstände	Flüssige Rückstände
URALKALI					
Berezniki 4	Heißverlösung	19,86	11,2	2,72	0,35
Berezniki 3	Flotation	18,08	13,3	3,08	0,38
PCS					
Lanigan	Flotation	22,89	15,6	1,78	0,55
Rocanville	Flotation	23,74	11,7	1,51	0,34
Allan	Flotation	24,07	15,5	0,99	1,10
New Brunswick	Flotation	20,39	9,4	2,20	0,15

158 Dieses Verhältnis wird sehr stark von Art und Menge der Begleitminerale im festen Rohsalz beziehungsweise der Zusammensetzung in der natürlichen Lösung bestimmt. Streng genommen dürften daher nur gleichartige Rohsalze miteinander verglichen werden.

Kaliwerk	Aufbereitungs-verfahren	K_2O-Gehalt im Rohstoff [m%]	KCl-Verluste [%]	Verhältnis von Rückstands- zu Produktmenge[158] [$t/t_{Produkt}$]	
				Feste Rückstände	Flüssige Rückstände
K+S					
Neuhof-Ellers	Flotation/ESTA®	10,10	8,9	3,03	<0,03
Sigmundshall	Heißverlösung ESTA®/Flotation	13,00 10,00	8,0 25,0	4,20 1,70	- 0,30
Zielitz	Flotation	12,91	11,8	3,59	<0,03
Werra[159]	Heißverlösung ESTA®/Flotation	8,4 – 14,9	21,0	4,97	0,88
APC					
Safi	Heißverlösung	0,70 14,20[160]	20,5	8,80	1,60

In diesem Buch soll am Rande auch auf solche alternativen Verfahrensvorschläge eingegangen werden. Wenn dies nur marginal erfolgen soll, dann aus zwei Gründen: Einmal handelt es sich mehrheitlich um altbekannte klassische Verfahren der Kaliindustrie, deren Anwendungsfelder ebenso gut bekannt sind, wie die mit ihnen verbundenen Aspekte der ökologischen Nachhaltigkeit und/oder der wirtschaftlichen Zumutbarkeit, soweit sie für derart wertstoffarme Lösungen strapaziert werden sollen. Die meisten solcher Methoden und Verfahren gehören auch tatsächlich schon seit Jahrzehnten zum Stand der Technik, jedoch nicht für die im Rahmen manch eines kühnen Verfahrensvorschlages vorgesehenen Anwendungsfälle und daher dann auch nicht zum Gegenstand des vorliegenden Buches (▸ Box 7.3).

Eingehende Prüfungen hinsichtlich der technischen Machbarkeit oder der ökologischen Nachhaltigkeit und auch der wirtschaftlichen Zumutbarkeit solcher Verfahrensvorschläge sind in der Vergangenheit vielfach vorgenommen worden, jüngst in den Jahren 2005 bis 2011 zum Beispiel für die am Haldenstandort Neuhof-Ellers von K+S anfallenden Salzlösungen. Im Rahmen eines Genehmigungsverfahrens für eine Rohrleitung zum Transport solcher Salzlösungen erfolgte auch eine umfangreiche Alternativenprüfung, bei der es zunächst um die Prüfung der Möglichkeiten zur Vermeidung oder Minimierung der aufgrund der einwirkenden Niederschläge am Haldenkörper anfallenden Lösungen (▸ Abschnitt 8.1.2.5) und auch um alternative Beseitigungspfade ging, darüber hinaus aber auch Verwertungsoptionen

159 Für das Verbundwerk Werra sind hier alle Aufbereitungsprozesse an den Produktionsstandorten Hattorf, Wintershall und Unterbreizbach derart zusammengefasst, dass die KCl-Verluste und auch die Verhältnisse von Rückstandsmengen und Fertigprodukten in je einer gemeinsamen Zahl für die Erzeugung von MOP-, SOP- und K-Mg-Düngemitteln angegeben ist. Da neben dem KCl-Wertstoff hier auch der $MgSO_4$-Wertstoff genutzt wird, sind diese Aufbereitungsverfahren auf die Gesamtwertstoffausbeute optimiert, weshalb die alleinige Beachtung des KCl-Ausbringens keine Wertung über die Nachhaltigkeit der Rohstoffnutzung erlaubt. Eine Rohsalzaufbereitung, die auf die Nutzung zweier Wertstoffkomponenten zielt, ist naturgemäß auch mit etwas höheren prozentualen Verlusten der Einzelkomponente verbunden, als es bei Rohsalzen mit nur einer Wertstoffkomponente der Fall wäre. Darüber hinaus sind die dargestellten Zahlen jedoch auch nur eine Momentaufnahme aus dem Jahr 2014 und daher nicht repräsentativ für die lange Zeit betriebenen und in der Zukunft veränderten Methoden, Verfahren und Anlagen. Wie bereits erläutert wurde, erfolgt derzeit im Werk Werra die Umsetzung des 2008 konzipierten Investitionsprogramm (sog. Maßnahmenpaket zum Gewässerschutz; K+S 2008a, /467/; 2008b, /468/; 2012g, /483/; 2013a, /486/), nach dessen Abschluss eine weitere deutliche Verbesserung der Wertstoffausbeute erreicht wird.

160 Angegeben sind zwei K_2O-Gehalte: einmal für den Rohstoff, die natürliche Lösung des Toten Meeres, und einmal für das nach der solaren Evaporation der natürlichen Lösungen geerntete Kristallisat.

für diese gering wertstoffhaltigen Lösungen untersucht wurden (ERCOSPLAN 2007a bis 2007g, /241/ bis /248/; K+S 2010b, /471/; 2011c, /474/). Ähnliche Untersuchungen wurden auch anderenorts durchgeführt, jüngst auch in Niedersachsen im Rahmen eines Planfeststellungsverfahrens für die Wiederinbetriebnahme des früheren Kalibergwerkes Siegfried-Giesen bei Hildesheim (K+S 2014b, /489/).

Für das Vorhaben in Neuhof-Ellers wurden seinerzeit insgesamt 17 theoretisch denkbare Alternativen zum Rohrleitungstransport der durch Aufhaldung der festen Aufbereitungsrückstände anfallenden Salzlösungen untersucht, darunter auch solche, die auf eine auch hier zur Rede stehende Verwertung zielen. Darunter waren auch drei Verfahrensvorschläge, die auch aktuell in der Öffentlichen Diskussion eine gewisse Rolle spielen, nämlich

(1) Eindampfung oder Tiefkühlung der anfallenden Salzlösungen unter Ausnutzung alternativer Energieträger und/oder -erzeugung zur Vermeidung beziehungsweise Reduzierung der zu entsorgenden Salzlösungen (ERCOSPLAN 2007c, /244/);
(2) Entsalzung der anfallenden Salzlösungen durch Umkehr-Osmose zur Beseitigung und/oder Reduzierung der Salzfracht in den zu entsorgenden Salzlösungen (ERCOSPLAN 2007g, /248/)

und

(3) Entsalzung der anfallenden Salzlösungen durch Nanofiltration zur Beseitigung und/oder Reduzierung der Salzfracht in den zu entsorgenden Salzlösungen (ERCOSPLAN 2007f, /247/).

Alle diese theoretisch denkbaren Alternativen für die Entsorgung der durch Aufhaldung der Aufbereitungsrückstände anfallenden Salzlösungen wurden hinsichtlich ihrer technischen Verfahren und der notwendigen Anlagenkomponenten planerisch soweit konzipiert, dass eine Bewertung der technischen und der ökonomischen Machbarkeit sowie der mit ihrer Anwendung verbundenen ökologischen Konsequenzen möglich wurde. Im Rahmen der hier zur Rede stehenden Ableitung eines möglichst konkreten aber allgemeingültigen Standes der Technik bei der Entsorgung der im Zuge der Kalidüngemittelproduktion anfallenden Rückstände sollen die Ergebnisse der Evaluierung dieser Alternativen noch einmal in der gebotenen Kürze diskutiert werden:

Die Eindampfung oder auch die Tiefkühlung der anfallenden Salzlösungen kann aufgrund eines zu hohen Primärenergieverbrauches zur Eindampfung der Wasseranteile, der damit verbundenen Umweltbeeinflussungen und mangels Möglichkeiten eines Einsatzes alternativer Energieerzeugung keinen sinnvollen Beitrag zur Verwertung der Salzlösungen leisten. Obgleich der aus dem Hause K-UTEC am Runden Tisch eingebrachte Verfahrensvorschlag nicht in vollem Umfange mit dem für die Salzlösungen vom Standort Neuhof-Ellers untersuchten Szenario identisch ist, trifft ihn dennoch das gleiche Urteil einer fehlenden ökologischen Nachhaltigkeit und der wirtschaftlichen Unzumutbarkeit (▸ Box 7.3).

Trotz eingangs positiver Erwartungshaltung erwiesen sich die Verfahren der Umkehr-Osmose und auch der Nanofiltration für die Entsalzung der durch Aufhaldung der festen Aufbereitungsrückstände anfallenden Salzlösungen als technisch nicht machbar. Für diese Verfahren besitzen die zu entsalzenden Lösungen relativ hohe Konzentrationen, was einen hohen Osmotischen Druck zur Folge hat, weshalb im technischen Filterprozess auch eine hohe Druckdifferenz zu überwinden ist. Dies ist technisch nicht einfach und aufgrund der damit verbundenen hohen Pumpleistungen energetisch sehr aufwendig. Entscheidend sind hier die hohen Konzentrationen der einwertigen Ionen in der Salzlösung, die, dem Gibbs-Donnan-Gleichgewicht[161] entsprechend, das Rückhaltvermögen für zweiwertige Sulfationen herabsetzen. Es verwundert daher nicht, dass die innovativen Verfahren der Nanofiltration bislang keine durchgreifende großtechnische Verbreitung in der Mineralsalzindustrie gefunden haben. Ein noch schwerer wiegendes Problem resultiert für die Zusammensetzung der Salzlösungen aus möglichen Kristallisationseffekten durch Lösungsübersättigung, die zur Verstopfung der Membrane und damit zur Unterbrechung der osmotischen Entsalzung führen.

Letztlich sind all diese technischen Probleme oder auch die unzureichende ökologische Nachhaltigkeit und auch die wirtschaftliche Unzumutbarkeit Gründe dafür, dass an keinem der weltweit 32 Haldenstandorte eine Verwertung der Gesamtmenge der dort anfallenden Salzlösungen vorgenommen wird.

Nichtsdestotrotz werden aber an jedem Haldenstandort sporadisch oder saisonal, seltener auch permanent Teilströme dieser Salzlösungen durch die Zuführung in den oder die Lösungskreisläufe bei der Rohstoffaufbereitung verwertet.

161 In der physikalischen Chemie ist die asymmetrische Verteilung geladener Teilchen (Ionen) in einer Lösung, wie sie sich an einer semipermeablen Membran einstellt, als Gibbs-Donnan-Gleichgewicht bekannt. Aus der asymmetrischen Verteilung resultiert eine verschiedene Konzentration der geladenen Teilchen beiderseits der Membran, was letztlich eine Potentialdifferenz bewirkt, die wiederum einen osmotischen Druck verursacht.

BOX 7.3

Vollständige Eindampfung der im Verbundwerk Werra zur Entsorgung anfallenden flüssigen Rückstände zur Wertstoffgewinnung

Rückstandsfreie Kalidüngemittelproduktion – Realität oder Utopie?

Im März 2008 hat sich in Kassel auf Initiative der Bundesländer Thüringen und Hessen gemeinsam mit der K+S AG ein Runder Tisch zusammengefunden, um einen auf Konsens ausgerichteten Dialog "Gewässerschutz Werra/Weser und Kaliproduktion" – so der Titel des Runden Tisches – zu führen. In mittlerweile 25 Sitzungen und begleitenden Veranstaltungen verschiedener Arbeitsgruppen ist es gelungen, dieses spezifische Spannungsfeld von Ökologie und Ökonomie zu erörtern und auch konsensfähige Empfehlungen zu formulieren. Seit der 20. Sitzung im September 2012 (RTGWW 2012, /857/) wird auch über die Frage "Abwasserfreie Kaliproduktion – Realität oder Utopie?" gestritten. Anlass hierfür war eine Idee aus dem Hause K-UTEC Sondershausen, wonach die für das Verbundwerk Werra von K+S seinerzeit prognostizierten jährlich 7 Millionen Kubikmeter flüssige Aufbereitungsrückstände sowie Salzlösungen, die bei der Aufhaldung der festen Rückstände aufgrund der Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallen, vollständig einzudampfen wären und dabei eine – gemessen am Gesamtvolumen der einzudampfenden Lösungsmenge – geringe Wertstoffmenge zurückzugewinnen wäre (K-UTEC 2014a, /465/). Diese mehrheitlich in den Gremien des Runden Tisches, zum Teil auch über Pressemitteilungen von Umweltverbänden, Kommunen oder auch Bürgerinitiativen und Internetforen geführte Diskussion soll hier nicht wiederholt und auch nur soweit ergänzt werden, wie es der auf Konsens bedachten Protokollierung des Runden Tisches nicht möglich war.

Unterschlagung wesentlicher Kriterien zur Machbarkeit

Die hier von K-UTEC bei diesen Diskussionen behauptete und auch durch Dritte (Quicker 2013, /792/; Krupp 2014b, /567/; WWA 2014a, /1144/) aufgegriffene Begründung, dass derart wertstoffarme Salzlösungen auch anderenorts zur Kalidüngemittelproduktion genutzt werden, ist schlichtweg als Argument für diese Projektidee nicht zutreffend, da sie den wesentlichsten Punkt der Machbarkeit unterschlägt. Richtig ist, dass auch anderenorts wertstoffarme Salzlösungen für die Produktion chloridischer und/oder sulfatischer Kalidüngemittelprodukte genutzt werden, wie die nachfolgende Tabelle veranschaulicht und wie es im Abschnitt 5 bereits beschrieben wurde:

	Lösungszusammensetzung der natürlichen Lösungen			Lösungszusammensetzung der flüssigen Rückstände
	Totes Meer [m%]	Great Salt Lake [m%]	Salar de Atacama [m%]	Verbundwerk Werra [m%]
NaCl	8,5	21,8	19,5	10,2
KCl	1,2	1,0	3,4	4,2
$MgCl_2$	14,3	1,7	2,1	9,3
$CaCl_2$	4,0	0,0	0,0	0,0
$MgSO_4$	0,0	2,3	2,4	5,2
$CaSO_4$	0,0	0,2	0,0	0,0
H_2O	72,0	73,2	72,6	71,1

Klassische Verfahrensschritte zur Verwertung nach Stand der Technik

Richtig ist ebenfalls, dass die seitens K-UTEC beabsichtigten Verfahrensschritte für sich genommen Bestandteile des heutigen Standes der Technik sind. Bei einer derartigen Argumentation muss aber der Prozess der Rohstoffaufbereitung, also der Weg zur Wertstoffanreicherung ebenso berücksichtigt werden. Überall dort, wo die Kalidüngemittelproduktion auf die Nutzung natürlicher wertstoffarmer Lösungen angewiesen ist, wird der maßgebliche Anteil der Wertstoffkonzentrierung durch den Prozess der solaren Evaporation erreicht und nicht etwa, wie seitens K-UTEC für die Salzlösungen des Verbundwerkes Werra vorgeschlagen, durch den Einsatz thermischer Eindampfungsverfahren, die mit einem großem Primärenergiebedarf verbunden sind. Ein solcher Vorschlag ist wohl technisch machbar, aber weder wirtschaftlich noch ökologisch nachhaltig, was die folgende einfache Gegenüberstellung zeigen soll:

	Natürliche Lösungen			Flüssige Rückstände
	Totes Meer	**Great Salt Lake**	**Salar de Atacama**	**Verbundwerk Werra**
Wertstoffe in Lösung [m%]	1,2	3,3	5,8	9,4
Lösungsmenge [Millionen m^3/a]	650	30	43	6,8
Produkte	MOP	SOP	MOP+SOP	SOP
Produktmenge [Millionen t/a]	6,50	0,35	1,60	0,37
Ausgedampftes Wasser [$t/t_{Produkt}$]	94	68	21	15
davon durch solare Evaporation ausgedampfte Anteile [%]	99	97	98	0

An den 3 Referenzfällen, am Toten Meer, Israel und Jordanien, am Great Salt Lake, USA, und am Salar de Atacama, Chile, wird das zur Wertstoffkonzentrierung auszudampfende Wasser durch die an diesen ariden Standorten reichlich zur Verfügung stehende Sonnenenergie quasi zum "Nulltarif" beseitigt. Nicht allein die kostengünstige Energiequelle macht diese Verfahrensweise wirtschaftlich attraktiv. Der Prozess der solaren Evaporation zur Wertstoffanreicherung ist auch als sogenannte *green technology* bekannt, da er nahezu emissionsneutral verläuft. Bei dem Verfahrensvorschlag aus dem Hause K-UTEC hingegen muss eine in ihrer Größenordnung mit den Referenzfällen vergleichbare spezifische Wassermenge pro Tonne Fertigprodukt durch technische Verdampfungsprozesse unter Verschwendung erheblicher Mengen an Primärenergie ausgedampft werden. Nicht allein sind die Betriebskosten für diese thermischen Aufbereitungsprozesse wirtschaftlich unzumutbar, vielmehr sind auch die dabei zu erwartenden Emissionen an Treibhausgasen ökologisch nicht vertretbar. Darüber hinaus sind am Ende des vorgeschlagenen Prozesses - entsprechend der seinerzeitlichen Bilanzierung - jährlich noch immer 3 Millionen Tonnen $MgCl_2$-Lösung mit einem entsprechenden technischen und wirtschaftlichen Aufwand zu entsorgen.

Diese Zusammenhänge zwischen den an einem konkreten Standort technisch machbaren Methoden sowie Verfahren und den dort herrschenden Randbedingungen wurden bereits in den Kapiteln 4 bis 8 eingehend dargelegt.

Mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit sind es nicht allein die hohen Betriebskosten, die den Verfahrensvorschlag unzumutbar machen, sondern ebenfalls die Höhe der erforderlichen Investitionen für den Bau einer solchen Eindampfanlage. Ohne dass bislang eine belastbare

Vollständige Eindampfung der im Verbundwerk Werra zur Entsorgung anfallenden flüssigen Rückstände zur Wertstoffgewinnung

Planungsgrundlage für eine solche Eindampfanlage vorliegt – das Vorhaben also nach international üblichen ingenieurtechnischen Standards (AACE 2005, /1/; 2012, /2/) allenfalls einen *class 4-status* erreicht hat – wurden dafür von verschiedener Seite Kostenschätzungen vorgelegt, die letztlich auch in einer Stellungnahme des Umweltbundesamtes (UBA 2014, /1032/) bewertet wurden. Diese unzureichende Planungstiefe hat selbstverständlich auch eine große Ungenauigkeit einer solchen Kostenschätzung zur Folge, weshalb die oben genannten Standards auch entsprechende Bandbreiten für die Investitionskostenermittlung von bis zu +/-50 Prozent vorgeben. Auch seitens ERCOSPLAN wurde im Januar 2014 eine Investitionskostenabschätzung vorgenommen und am Runden Tisch präsentiert (Rauche 2014, /801/), was folgende Ergebnisse lieferte:

Direkte Investitionskosten	1.096.600.000 Euro
Indirekte Investitionskosten	430.856.000 Euro
Gesamtinvestition	1.527.456.000 Euro

Diese Investitionskostenermittlung gründet sich auf Referenzen und Erfahrungstatsachen, wie sie bei der Planung und beim Bau von Eindampfanlagen für die Kalidüngemittelproduktion in Europa, Nord- und Südamerika, in Afrika und in Asien gesammelt wurden. Die ermittelten Gesamtinvestitionskosten liegen zwar über dem von K+S abgeschätzten, sind unter Berücksichtigung der aufgrund der unzureichenden Planungstiefe auftretenden Ungenauigkeiten faktisch identisch. Allerdings liegen sowohl die von K+S als auch die von ERCOSPLAN ermittelten Investitionskosten deutlich über dem seitens K-UTEC vorgestellten – offenbar nur die direkten Investitionskosten berücksichtigenden – Wert von weniger als 530 Millionen Euro. Die seitens K+S und ERCOSPLAN ermittelten Investitionskosten korrelieren in ihrer Größenordnung durchaus mit den Budgetgrößen, wie sie für bereits im Entwurfsplanungsstadium befindliche soltechnische *greenfield* Projekte zum Beispiel in Süd- und Nordamerika bekannt sind. In solchen Projekten sind zwar ähnliche Größenordnungen an Wasser durch den Einsatz thermischer Energie zu verdampfen - was sie zu Referenzfällen qualifiziert, jedoch wird dabei aufgrund der höheren Wertstoffkonzentration in den technischen Lösungen mindestens die fünffache Menge an Fertigprodukt erzeugt.

Unzutreffende Eingangszahlen zu Art und Menge der zu beseitigenden Salzlösungen

Abgesehen von diesen ökonomischen und ökologischen Argumenten gegen eine Umsetzung der vollständigen Eindampfung dieser Salzlösungen weist der Ansatz von K-UTEC auch einen gravierenden, weil konzeptionellen Schwachpunkt auf. Ihm liegen die früher unterstellten Mengen und Zusammensetzungen der seinerzeit 8 unterschiedlichen Salzlösungen zugrunde. Im Zuge der weiteren detaillierten Planungen zum Maßnahmenpaket Gewässerschutz von K+S und einmal mehr im Zuge der Umsetzung desselben zeigte sich jedoch ein verändertes Bild, auf das K+S im Rahmen der verschiedenen Veranstaltungen am Runden Tisch hingewiesen hatte (Keidel 2013, /512/; Gerling 2014a, /324/; 2014b, /325/; 2014c, /326/). Bei den Haldenwässern zeigt sich schon heute, dass die Gehalte an KCl und $MgSO_4$ deutlich niedriger ausfallen, als dies in der Prognose unterstellt wurde. Diese Entwicklung ist letztlich die Folge der heute im Vergleich mit früheren Produktionsphasen effizienteren Aufbereitungsverfahren, die zu einer höheren Wertstoffausbeute und damit zu geringeren Wertstoffpotenzialen in den Rückständen führen. Schon heute ist an den Halden Hattorf und Wintershall ein deutlicher Unterschied in der Haldenwasserzusammensetzung zwischen dem Altbereich und dem frisch beschütteten Bereich nachweisbar, ein Effekt, der sich insbesondere im Zuge der ausstehenden Haldenerweiterungen noch stärker auswirken wird. Um die Wertstoffmengen, die gemäß des Vorschlages von K-UTEC gewinnbar wären, müsste also ein noch höherer Aufwand betrieben, insbesondere noch mehr Primärenergie für den Eindampfungsprozess pro Tonne Produkt, aufgewendet werden, als bislang zugrunde gelegt.

8 METHODEN, VERFAHREN UND ANLAGEN ZUR ENTSORGUNG VON RÜCKSTÄNDEN AUS DER GEWINNUNG UND AUFBEREITUNG VON KALIROHSTOFFEN ZU KALIDÜNGEMITTELN

Unvermeidbar fallen weltweit bei der Kalidüngemittelproduktion aus festen Rohsalzen wie auch aus natürlichen Lösungen sowohl feste[162] als auch flüssige[163] Rückstände an, für die eine Verwertung technisch nicht möglich, ökologisch nicht nachhaltig und/oder wirtschaftlich nicht vertretbar ist (▸ Kapitel 7). Darüber hinaus entstehen bei der Aufhaldung fester Aufbereitungsrückstände als Folge der Niederschlagseinwirkung auf die Haldenkörper Salzlösungen, für deren größten Teil ebenfalls keine Verwertungsmöglichkeit besteht. Wie für andere Zweige der extraktiven Industrie besteht deshalb auch für die Kaliindustrie eine der größten Herausforderungen in der Beseitigung dieser Rückstände (Scharf 1990, /875/). Allein an den Standorten der Kalidüngemittelproduktion in Saskatchewan, Kanada, – wo die weltweit wertstoffreichsten Lagerstätten als Rohstoffbasis dienen (▸ Abschnitte 4.1, 5.1, 6.1 und 6.2 sowie Kapitel 7) – sind in den letzten 5 Jahrzehnten mehr als eine halbe Milliarde Tonnen feste Aufbereitungsrückstände zur Beseitigung angefallen. Hier existieren derzeit 10 großflächige Halden, jede mit angrenzenden Lösungsbecken wobei allein 7 dieser Halden gegenwärtig Flächen von jeweils mehr als 200 Hektar einnehmen und ihre Lösungsbecken jeweils noch einmal annähernd die gleiche Fläche verbrauchen. Gemeinsam nehmen sie bereits heute eine Fläche von mehr als 50 Quadratkilometer ein (Vonhof 1971, /1079/; Sonnenfeld 1984, /959/; Tallin, Pufahl & Barbour 1990, /998/; Haug & Reid 1991, /376/; Haug, Wong & Reid 1991, /377/; Reid & Klein 1994a, /824/; 1994b, /825/; Rauche 2002b, /797/; Stahl et al. 2005, /973/), die sich bis zum Ende der Lebensdauer der Kalisalzvorräte in dieser Region noch vervielfachen wird. Außerdem kommen in Saskatchewan in naher Zukunft mindestens 3 weitere Kaliwerke mit hoher Produktionskapazität hinzu (▸ Abschnitt 3.1), für die die gängige Praxis des Anlegens von großflächigen Rückstandshalden für die festen und Speicherbecken für die flüssigen Aufbereitungsrückstände bereits genehmigungsrechtlich sanktioniert ist (BHPB 2010, /99/; Leland & Pekeski 2012, /588/).

162 Unter festen Gewinnungs- und Aufbereitungsrückständen werden die festen Teile der einer Rohstoffgewinnung beziehungsweise -aufbereitung zugeführten Massenströme verstanden, die keiner weiteren Verwertung zugeführt werden können und folglich beseitigt werden müssen.

163 Unter flüssigen Aufbereitungsrückständen werden die flüssigen Teile der einer Rohstoffaufbereitung zugeführten oder dabei durch Kristallwasserfreisetzung entstehenden Massenströme verstanden, die keiner weiteren Verwertung zugeführt werden können und folglich beseitigt werden müssen.

H. Rauche, *Die Kaliindustrie im 21. Jahrhundert,*
DOI 10.1007/978-3-662-46834-0_8, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

Auch in den Kalirevieren an der Oberen Kama in Russland und um Soligorsk in Belarus, wo jeweils ebenfalls sehr wertstoffreiche Kalirohsalze genutzt werden, weisen die zur Beseitigung anfallenden Abfallströme ähnliche Größenordnungen auf. So betrug die Fläche, die zur Lagerung dieser festen und flüssigen Rückstände auf dem Gebiet der ehemaligen UdSSR verbraucht wird, bereits im Jahre 1991 über 20 Quadratkilometer (Lopushnyak 1991, /602/; Prugger 1992, /785/; GOSGORTEKHNADZOR 1993, /345/; Golubev 2001, /341/; Belkin 2010, /88/; Baturin et al. 2012, /75/; Borisihina 2015, /117/) und hat sich bis heute nahezu verdoppelt. Auch in den GUS-Ländern sind 5 neue Bergwerke und Aufbereitungsanlagen zur Kalidüngemittelproduktion bereits im Bau beziehungsweise im fortgeschrittenen Planungsstadium (▸ Abschnitt 3.1). Diese Produktionseinheiten werden den überwiegenden Teil ihrer bergbaulichen Abfälle ebenfalls durch Aufhaldung beziehungsweise Lagerung an der Erdoberfläche in Sammelbecken beseitigen (MINING INSTITUTE 2014, /657/). Nicht nur in den großen Kalirevieren in Saskatchewan und an der Oberen Kama werden diese Beseitigungspfade auch zukünftig genutzt. Auch in den bezüglich der Produktionskapazität kleineren Revieren, zum Beispiel in New Mexico, USA, (NMED 2011, /712/) und in Katalonien, Spanien, (Badia 2009, /55/; Orihuel 2012, /722/) wird zukünftig der größte Teil der festen Aufbereitungsrückstände aufgehaldet.

Überall dort, wo die lagerstättengeologisch bedingten Wertstoffgehalte der Kalirohstoffe geringer sind, ist auch der spezifische Anteil der zur Beseitigung anfallenden festen und/oder flüssigen bergbaulichen Abfälle naturgemäß noch höher (▸ Kapitel 7).

Durch die Beseitigung der Rückstände durch Ablagerung über Tage werden in den Regionen der Kalidüngemittelproduktion auf diese Weise sehr große Flächen an der Erdoberfläche in Anspruch genommen, für die eine andersartige kulturlandschaftliche Nutzung auf absehbare Zeit nicht in Frage kommt, was einen wesentlichen Eingriff in die natürliche Umwelt darstellt.

Andererseits sind diese großen Rückstandshalden in allen Kalibergbaurevieren der Welt seit Jahrzehnten feste Landschaftsbestandteile, genießen einen gewissen Status als Merkmale einer industriellen Prägung der sie umgebenden Kulturlandschaft (Schönrock 2009, /891/; Kreiszeitung 2014, /560/; Ockenga 2015, /719/). Nirgendwo anders kommt das so drastisch zum Ausdruck wie in Mittel- und Norddeutschland, wo umgangssprachliche Flurbezeichnungen wie "Land der Weißen Berge", "Monte Kali" oder "Kalimandscharo" entstanden und von großen Bevölkerungsteilen angenommen sind. Sie repräsentieren nicht allein visuelle Landschaftsmerkmale, sondern sind bereits heute Orte von industriegeschichtlicher Bedeutung sowie auch Austragungsstätten kultureller (HNA 2014, /398/; HOLZHAUSTHEATER 2014a, /410/; 2014b, /411/; KREISZEITUNG 2014, /560/; MS 2014, /691/; MZ 2014, /696/; OHN 2014, /721/; VOLKSSTIMME 2014a, /1077/; WTN 2014, /1137/) und/oder sportlicher Veranstaltungen (VOLKSSTIMME 2014b, /1078/; SAABC 2015, /869/) und nicht zuletzt deshalb in diesen Regionen mehrheitlich akzeptiert. Davon künden auch die Besucherzahlen solcher Veranstaltungen oder bei Haldenführungen (Balduf & Handke 2014b, /58/) (▸ Box 8.1).

Rückstandshalden der Kalidüngemittelproduktion sind darüber hinaus auch schutzwürdige Belege dafür, wie der ursprüngliche Naturraum durch die industrielle Nutzung überprägt wurde und veränderte Standortbedingungen die Ansiedlung neuer Fauna- und Floraelemente ermöglicht haben. Allein im Wartburgkreis im Freistaat Thüringen, wo die Kalidüngemittelproduktion im Werra-Kalirevier auf eine mehr als 100jährige Geschichte zurückblickt, sind zum Beispiel 5 solcher schutzwürdiger Biotope von Salzpflanzengesellschaften an Rückstandshalden bekannt (Schuster, Bellstedt & Schmidt 2010, /905/).

Neben der großen Flächeninanspruchnahme durch die Beseitigung der bergbaulichen Abfälle zielt die Besorgnis in der Öffentlichen Diskussion zum Umweltschutz bei der Kalidüngemittelproduktion aber auch auf eine mögliche Beeinträchtigung der Qualität von Oberflächengewässern oder auch des Grundwassers (Pufahl 1983, /789/; Prugger 1992, /785/; Voß 2004, /1080/; 2005, /1081/; EC 2009, /226/; WWA 2009, /1142/; Brinckmann 2010, /127/; RTGWW 2010, /856/; 2012, /857/; 2013a, /858/; Krupp 2011, /565/; 2014b, /567/; Sevastiyanov & Zakharov 2011, /924/; Borchardt & Richter 2013, /116/). Dabei wird vielfach auf historische Schadensfälle Bezug genommen. Dies war zum Beispiel bei der mittlerweile eingestellten Kalidüngemittelproduktion im Elsass, Frankreich, die bereits im Jahre 1910 ihren Anfang nahm, der Fall (MDPA 2004b, /632/; MDPA 2004c, /633/). Dort wurden feste Rückstände bis Anfang der 1930er Jahre vollständig aufgehaldet, ohne vorher eine Abdichtung des Haldenuntergrundes vorgenommen zu haben. In der Folge kam es zu einer Kontamination des Grundwassers in der Region Mulhouse, weshalb ab 1933 etwa 90 Prozent aller anfallenden festen Aufbereitungsrückstände aufgelöst und über Rohrleitungssysteme direkt in den Rhein eingeleitet wurden (Wroz 1982, /1133/; Prugger 1992, /785/; Schreiber 1997, /894/; Ciglia 2000, /157/; Elsass 2000, /235/; MDPA 2004b, /632/). Diese Maßnahme war durch internationale Verträge der Rhein-Anliegerstaaten legitimiert.

In der Öffentlichen Diskussion wird im Zusammenhang mit der Beseitigung der infolge der Aufhaldung anfallenden Salzlösungen im Zeitraum nach der Einstellung der Kalidüngemittelproduktion mitunter versucht, Parallelen zu den sogenannten Ewigkeitskosten bei der Regulierung der Umwelteingriffe durch den deutschen Steinkohlebergbau zu konstruieren (KPMG 2006, /554/).

BOX 8.1

Rückstandshalden der Kaliindustrie: Landmarken und Besuchermagneten

Die Rückstandshalden der Kaliindustrie sind heute nicht nur Zeugen der veränderten Naturlandschaft, sondern feste Bestandteile der durch des Menschen Schaffen entstandenen Kulturlandschaft und auch Begegnungsstätten für ein breites Publikum bei kulturellen und auch sportlichen Veranstaltungen. Sie ziehen in dieser Eigenschaft jährlich einige Tausend Besucher in ihren Bann (Balduf & Handke 2014b, /58/).

Am K+S Standort Wintershall ist der "Monte Kali" mit seinen mehrmals jährlich organisierten Sonnenuntergangsführungen oder auch dem Haldenfest ein Besuchermagnet sondergleichen: Knapp 5.000 Besucher nutzen die Möglichkeit, von diesem exponierten Aussichtspunkt die Landschaft zwischen Thüringer Wald und Rhön aus völlig neuer Perspektive zu erleben.

Am K+S Standort Neuhof-Ellers finden auf dem die umgebende Landschaft um gut 150 Meter überragenden Haldenplateau regelmäßig Open-Air-Konzerte statt, die besonderer Anziehungspunkt für ein junges Publikum sind. Ein Besucherrekord wurde am 18. Juli 2014 beim Konzert von Phil, einer Phil Collins Coverband erreicht, als mehr als 3.000 Personen dieses akustische Erlebnis in luftiger Höhe feierten.

Besonders in der norddeutschen Tiefebene sind die Rückstandshalden der Kaliindustrie wahre Landmarken, überragen sie doch besonders hier weithin sichtbar das flache Land und laden zu einem einmaligen Weitblick ein. Der "Kalimandscharo" am K+S Standort Zielitz lädt in den Sommermonaten wöchentlich zu anspruchsvollen Bergtouren ein, die sich hinsichtlich Steigung durchaus mit Wanderungen in alpinen Räumen vergleichen lassen. Eine zweiwöchige Theaterkampagne unter freiem Himmel bietet alljährlich in der Sommerzeit Unterhaltung für Kinder und Erwachsene. Am „Tag der Offenen Tür" erklimmen auch am K+S Standort Sigmundshall Hunderte von Besuchern das Haldenplateau.



Halde Zielitz: Hinweisschild zur Haldenführung



Halde Zielitz: Mitglieder des Bergmannsvereins führen interessierte Besucher auf die Halde Zielitz



Halde Neuhof-Ellers: Open-Air-Konzert im Sommer 2014 mit mehr als 3.000 Besuchern auf dem Haldenplateau [Fotos mit freundlicher Genehmigung von K+S KALI GmbH, Kassel, Deutschland]

Solche Konstrukte besitzen für die deutschen Kalistandorte wenig Substanz, da es für die in der Nachbetriebsphase erforderlichen Aufwendungen zum Erhalt und Betrieb der Beseitigungspfade auf Rückstellungen basierte Finanzierungsvereinbarungen gibt, wie es zum Beispiel auch der im vergangenen Jahr zwischen dem Hessischen Umweltministerium und K+S beschlossene Vier-Phasen-Plan zur Salzabwasserentsorgung für das Werra-Fulda-Kalirevier vorsieht (HLV 2014, /396/, HMUKLV 2014, /397/; K+S 2014a, /488/; 2015b, /491/).

Solche Öffentlichen Diskussionen um die Gewährleistung eines hinreichenden Gewässer- und Grundwasserschutzes bei der Kalidüngemittelproduktion reichen bis zum Ende des 19. Jahrhunderts zurück. Die damals in Mitteldeutschland gerade erst entstandene Kaliindustrie entsorgte ihre flüssigen aber auch Teile der festen Aufbereitungsrückstände, mehrheitlich in Fließgewässer an der Erdoberfläche, was zum Teil zu erheblichen Beeinträchtigungen der Qualität der Oberflächengewässer und des Grundwassers, besonders im Raum Staßfurt, führte (KALIWERK STASSFURT 1952, /498/; Aurada 1997, /31/; BV STASSFURT 2002, /142/; Aurada & Rödel 2005, /32/). Schon 1885 kamen erste Überlegungen zur Versenkung der flüssigen Rückstände in den Untergrund auf und führten letztlich zur Entwicklung geeigneter Methoden, wie sie in fortgeschrittener Form auch heute praktiziert werden (Prugger 1992, /785/; Rauche 2002b, /797/).

Der trockene Versatz von festen Aufbereitungsrückständen aus der Kalidüngemittelproduktion in ausgesalzene Abbauhohlräume unter Tage wurde zu Beginn der 1880er Jahre erstmalig durchgeführt. Hierbei spielte der Beseitigungsgedanke wenn überhaupt, dann höchstens eine sehr untergeordnete Rolle. Erforderlich wurde dieser Versatz allein aus gebirgsmechanischen Gründen, wurde er doch durch die Bergaufsichtsbehörden zur Stabilisierung der Grubenbaue und damit zum Schutze der hydrogeologischen Barrieren im Hangenden der Gewinnungshorizonte verordnet. Für das Einbringen von Versatz setzte sich jedoch letztlich für einen gewissen Zeitabschnitt der technischen Entwicklung der zu Beginn des 20. Jahrhunderts aus dem Kohlebergbau adaptierte Spülversatz im Kalibergbau Mitteldeutschlands durch. Auch während dieses Zeitraumes war die Motivation für das Versatzeinbringen eine geomechanische und der Zielstellung unterworfen, auf diese Weise wertvolle Rohsalzvorräte nicht als Abbauverluste in Pfeilertragelementen zu verlieren (▸ Abschnitt 5.1, Box 5.1).

Die Erfahrungstatsachen aus mehr als 150 Jahren industrieller Kalidüngemittelproduktion zeigen, wie sich die Methoden und Verfahren zur Beseitigung der festen und flüssigen Aufbereitungsrückstände sowie der infolge Aufhaldung der festen Rückstände durch Niederschlagseinwirkung am Haldenkörper anfallenden Salzlösungen weiterentwickelt haben. Ursächlich für diese Weiterentwicklung war zum einen der technische Fortschritt bei der Gewinnung und Aufbereitung, der infolge höherer Wertstoffausbeute und/oder besserer Verwertung beibrechender Minerale die spezifische Verringerung der zur Beseitigung anfallenden Stoffströme nach sich zog. Zum anderen wurden aber auch die technischen Methoden, Verfahren und Anlagen zur Bewirtschaftung und letztlich zur Beseitigung der bergbaulichen Abfälle verbessert. Triebkraft dafür war stets ein Geflecht von ökonomischen und ökologischen Zielstellungen. Höhere Wertstoffausbeute und ein breiteres Nebenproduktportfolio zielten auf höhere Deckungsbeiträge für die Betriebskosten bei der Kalidüngemittelproduktion (▸ Kapitel 7). Verbesserte Kriterien bei der Standortwahl für Halden, bessere technische Systeme zur Abdichtung von Haldengrundflächen und/oder zum Sammeln von Salzlösungen um den Haldenkörper, erweiterte Monitoringsysteme und anderes mehr sollten langfristig die Betriebs- und Folgekosten der Abfallbewirtschaftung mindern. Sie folgten aber ebenso dem seit der Frühzeit der Kaliindustrie und besonders in den letzten Jahrzehnten erwachsenem Umweltbewusstsein und den sich daraus entwickelten höheren Anforderungen des Umweltschutzes, wie sie nicht zuletzt auch heute durch die genehmigungsrechtlichen Rahmenbedingungen diktiert werden. So war es seit den 1970er beziehungsweise 1980er Jahren an den Produktionsstandorten Boulby in Großbritannien, New Brunswick im Osten Kanadas und Sergipe in Brasilien nicht erlaubt, feste Produktionsrückstände dauerhaft an der Erdoberfläche zu lagern (Prugger 1992, /785/; Rauche 2002b, /797/). Dieser genehmigungsrechtlichen Realität folgend, mussten diese küstennahen Standorte spezifische Beseitigungspfade für die festen und flüssigen bergbaulichen Abfälle finden und dabei insbesondere ihre lagerstättengeologischen, geografischen, infrastrukturellen und logistischen Randbedingungen oder auch die in unmittelbarer Nachbarschaft verfügbaren verhältnismäßig preiswerten Primärenergieträger ausnutzen (▸ Box 7.1).

Welchen rechtlichen Anforderungen die mineralgewinnende Industrie im Allgemeinen und die Kaliindustrie im Besonderen in der EU und auch in anderen Staaten bei der Bewirtschaftung von bergbaulichen Abfällen zu genügen hat, wurde bereits eingehend im Kapitel 1 erläutert. Im Folgenden wird daher nur in solchen Ausnahmefällen auf diese rechtlichen Rahmenbedingungen Bezug genommen, in denen es für das Verständnis der Ergebnisse der vergleichenden Analyse zu den an verschiedenen Standorten der Kalidüngemittelproduktion betriebenen technischen Methoden, Verfahren und Anlagen zur Entsorgung – als der Summe aus der Verwertung von Teilströmen der festen und flüssigen Gewinnungs- und Aufbereitungsrückstände und der Beseitigung der unvermeidbar verbleibenden bergbaulichen Abfälle – von Bedeutung ist. Auf die Aspekte der Verwertung solcher Teilströme von Gewinnungs- und Aufbereitungsrückständen wurde bereits ausführlich im vorangestellten Kapitel 7 eingegangen, so dass in diesem Kapitel 8 allein die Beseitigung im Vordergrund stehen soll.

Wie ebenfalls bereits im Kapitel 1 erwähnt, sind die veröffentlichten Informationen zu den an den einzelnen Standorten angewendeten technischen Methoden, Verfahren und Anlagen für die Beseitigung und Verwertung von Rückständen der Gewinnung und Aufbereitung von Kalirohstoffen zu Kalidüngemitteln insgesamt recht heterogen. Daher waren nicht für alle Produktionsstandorte gleichermaßen auch alle gewünschten Informationen in öffentlich zugänglichen Datenquellen auffindbar. Um insbesondere jedoch für die vergleichende Analyse zum Rückstandsmanagement eine für alle Standorte homogene Datengrundlage zur Verfügung zu haben, war es deshalb vereinzelt erforderlich, ausgehend vom recherchierbaren Faktengerüst, eigene Betrachtungen und Berechnungen anzustellen.

Art und Menge dieser Rückstände der Gewinnung und Aufbereitung von Kalirohstoffen werden vor allem von den für die einzelnen Produktionsstandorte unterschiedlichen, natürlich vorgegebenen lagerstätten- und hydrogeologischen oder klimatischen Randbedingungen und den darauf abgestimmten Methoden, Verfahren und Anlagen zur Rohstoffgewinnung und -aufbereitung bestimmt. Ferner werden Art und Menge und vor allem die Methoden zur Entsorgung – also sowohl der Möglichkeit der Verwertung als auch der Notwendigkeit der Beseitigung – dieser Rückstände durch die vom Menschen an den einzelnen Standorten geschaffenen infrastrukturellen sowie logistischen Randbedingungen beeinflusst. Wie sich dies synoptisch für die wichtigsten Standorte und die wesentlichen Verfahren der Kalidüngemittelproduktion darstellt, wie hoch die spezifischen Wertstoffverluste, die Verbrauchsmengen an Reagenzien und die dabei anfallenden spezifischen Mengen fester und flüssiger Aufbereitungsrückstände pro Tonne Produkt sind, wird im Kapitel 7 diskutiert. Die für die Beseitigung der Aufbereitungsrückstände genutzten Entsorgungswege und ihre Bedeutung in der weltweiten Kaliindustrie werden in Tabelle 31 gegenübergestellt.

Tabelle 31 Prozentuale Anteile der weltweit praktizierten Entsorgungswege für die festen Rückstände der Aufbereitung fester Kalirohsalze aus Bergmännischer Gewinnung an der Gesamtentsorgung im Jahr 2011 (rückgerechnet aus den Produktionsdaten der einzelnen Standorte)

Entsorgungsweg	Anteil an der Gesamtentsorgung [%]
Aufhalden der festen Rückstände	81
Versatz im Bergwerk	9
Vollständiges Auflösen und Lösungseinleitung in Fließgewässer und letztlich in ozeanische Gewässer bzw. Versenkung in den geologischen Untergrund und/oder partielles Auflösen und Suspensionstransport durch Rohrleitungen direkt in ozeanische Gewässer	10

Mit über 99 Prozent besteht der allergrößte Teil dieser festen und flüssigen Aufbereitungsrückstände aus natürlichen Mineralsalzen und aus Tonmineralen, die gesundheitlich unbedenklich sind, vielmehr sogar seit Jahrhunderten für balneologische oder auch therapeutische Zwecke Verwendung finden: Schon im ältesten deutschen Bäderbuch von Hans Folz[164] aus dem Jahre 1491, aber auch durch Paracelsus[165] wird auf derartige Anwendungen Bezug genommen. Die medizinische Wirkung der Mineralsalze, insbesondere des NaCl, ist im deutschsprachigen Raum mindestens seit den Studien Hufelands[166] unumstritten (Buschmann 1909, /139/; Carlé 1963, /144/; Harms 1981, /372/; Emons & Walter 1984, /238/; Kurlansky 2001, /572/; Walter 2006, /1089/).

164 Hans Folz, entweder 1435 oder 1440 in Worms geboren und im Januar 1513 in Nürnberg verstorben, war ein deutscher Barbier, Bader und Meistersinger und gilt als Verfasser des ersten Bäderbüchleins (Folz 1491, /278/).

165 Philippus Theophrastus Aureolus Bombastus von Hohenheim, vermutlich 1493 in Egg, Kanton Schwyz geboren und am 24. September 1541 in Salzburg verstorben, genannt Paracelsus, war Arzt und Philosoph und erläuterte in seinen Schriften bereits die heilende und belebende Wirkung von Mineralbädern.

166 Christoph Wilhelm Hufeland, am 12. August 1762 in Langensalza geboren und am 25. August 1836 in Berlin verstorben, war ein deutscher Arzt und Sozialhygieniker und befasste sich als einer der ersten deutschsprachigen Wissenschaftler mit den Ursachen der Heilwirkungen des Salzes (Hufeland 1801, /421/)

Aus dieser empirischen Kenntnis entwickelte sich in der Neuzeit die weltweit verbreitete medizinische Salztherapie (Horvath 1986, /416/; Chervinskaya & Ziber 1995, /153/; Chervinskaya et al. 1995, /154/; Krasnostein et al. 1996, /559/; Torokhtin, Chonka & Lemko 1998, /1024/; Krasnostein 1999b, /556/; Fainburg et al. 2002, /265/; Chervinskaya 2003, /152/; Horowitz 2010, /415/; NINEMSN 2012, /711/; NCBI 2014, /702/) und in jüngster Zeit eine auf der physiologischen Wirkung des NaCl fußende Wellness-Branche in fast industrieller Dimension (WELT 2008, /1108/; 2011, /1109/; WSJ 2010, /1136/).

Also ist das Problem dieser Rückstände nicht etwa die Toxizität ihrer Inhaltsstoffe, sondern allein ihre große Masse (Singewald 1983, /935/; Schultz et al. 2003, /903/; Stahl et al. 2005, /973/). Die Zusammensetzung des Rückstandes hängt naturgemäß von der Rohstoffquelle ab (▸Abschnitt 4.1 sowie Kapitel 6 und 7). Die festen Rückstände aus der Aufbereitung von Sylviniten bestehen hauptsächlich aus Halit, die aus der Hartsalzaufbereitung aus Halit und geringen Anteilen von Kieserit und solche aus der Aufbereitung carnallitischer Rohsalze wiederum aus Halit. In allen Fällen kommen geringe, bei der Aufbereitung von Carnallit erhebliche flüssige Aufbereitungsrückstände als wässrige Lösungen hinzu. Dies sind bei der Sylvinit- und Hartsalzaufbereitung NaCl-Lösungen, gegebenenfalls mit stets aber geringen Anteilen von $MgCl_2$. Bei der Aufbereitung carnallitischer Rohsalze sind es erhebliche Mengen von $MgCl_2$-Lösung, die bei der Abtrennung des Wertstoffes KCl und der damit verbundenen Freisetzung des Kristallwasseranteiles aus dem Carnallit unvermeidbar anfallen. Bei der flotativen Aufbereitung solcher festen Kalirohsalze, die relativ hohe Gehalte an unlöslichen (hauptsächlich Tonminerale) beziehungsweise schwerlöslichen (Anhydrit und zum Teil auch andere Sulfate) Bestandteilen aufweisen, fallen außerdem Suspensionen aus diesen feinkörnigen Feststoffen und den Flotationslösungen, die sogenannten Schlämme, als Rückstand an. Ferner fallen bei der Herstellung von K_2SO_4 aus KCl und $MgSO_4$ sowie bei den Waschprozessen von Rückständen aus der Hartsalzaufbereitung weitere NaCl- und $MgCl_2$-Lösungen an, soweit diese nicht einer anderen innerbetrieblichen Verwertung zugeführt werden können.

Keiner der aus den festen Rohsalzen beziehungsweise den natürlichen Lösungen stammenden Inhaltsstoffe der festen oder flüssigen Aufbereitungsrückstände stellt im Sinne der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV 2010, /316/) beziehungsweise der diesbezüglichen EU-Verordnung 1272/2008 (EKVvSG 2008, /234/) einen Gefahrstoff dar. Allein die aus verfahrenstechnischen Gründen für den Aufbereitungsprozess notwendigerweise hinzugefügten Additiva, die hauptsächlich bei flotativer Aufbereitung und dem ESTA®-Verfahren zum Einsatz kommen, gelten nach EU-Verordnung 1272/2008 (EKVvSG 2008, /234/) zwar teilweise als gesundheitsschädlich und umweltgefährdend, sind aber in den Rückständen der Kalidüngemittelproduktion nur in unbedenklichen Konzentrationen enthalten.

In einigen Kalilagerstätten sind an die Tonminerale im Rohsalz geringe Anteile von Schwermetallen gebunden, so zum Beispiel im Kaliwerk Boulby in Großbritannien (BGS 2006, /97/). Mit dem flotativen Aufbereitungsprozess wird diese Tonmineralfraktion in den sogenannten Schlammrückständen konzentriert, was zu zwangsläufig höheren Schwermetallgehalten als im Rohstoff führt und gesonderte Beseitigungswege für diese Schlämme erforderlich macht (▸Box 8.2).

Auch bei der Aufbereitung technischer oder natürlicher Salzlösungen zu Kalidüngemitteln fallen unvermeidbar feste und flüssige Rückstände an, deren Zusammensetzung sich nicht signifikant von den bereits diskutierten Rückständen aus der Aufbereitung fester Kalirohsalze unterscheidet. Wesentlicher Unterschied sind die weitaus geringeren Anteile unlöslicher oder schwerlöslicher Minerale.

An den Standorten der Kalidüngemittelproduktion werden traditionell 4 verschiedene Entsorgungspfade für die festen und flüssigen Gewinnungs- und Aufbereitungsrückstände sowie die Salzlösungen, die als Folge der Niederschlagseinwirkung auf die aufgehaldeten festen Aufbereitungsrückstände entstehen, genutzt:

(1) Aufhaldung von festen Gewinnungs- und Aufbereitungsrückständen in speziell dafür vorbereiteten Arealen an der Erdoberfläche;
(2) Versatz von festen Gewinnungs- und Aufbereitungsrückständen in ausgesalzenen Gewinnungshohlräumen unter Tage;
(3) Versenkung von flüssigen und/oder von vollständig aufgelösten festen Aufbereitungsrückständen sowie von Salzlösungen, die als Folge der Niederschlagseinwirkung auf die aufgehaldeten festen Aufbereitungsrückstände entstehen, in dafür geeignete Poren- und/oder Kluftspeichergesteine im tieferen geologischen Untergrund

und

(4) Einleitung von flüssigen und/oder von partiell oder vollständig aufgelösten festen Aufbereitungsrückständen sowie von Salzlösungen, die als Folge der Niederschlagseinwirkung auf die aufgehaldeten festen Aufbereitungsrückständen entstehen, in Fließgewässer mit dem Ziel des Transportes der Salzfrachten in ozeanische Gewässer oder direkte Einleitung in letztere.

BOX 8.2

Entsorgungspraxis im Kaliwerk Boulby, Borough of Redcar and Cleveland, Großbritannien

Spezifischer Referenzfall aufgrund der Schwermetallbelastung der Feinkornfraktion

Ein gewisser Sonderfall für die Rückführung eines speziellen Teiles der festen Aufbereitungsrückstände aus der Kalidüngemittelproduktion als Dickstoffversatz in untertägige Abbauhohlräume existiert im Kalibergwerk Boulby von CPL an der englischen Nordseeküste (Großbritannien). Ähnlich wie beim Spülversatzeinbringen in die Kuppenabbaue im Kalibergwerk Unterbreizbach von K+S steht hier einzig der Beseitigungsgedanke für diesen Teil der Rückstände im Vordergrund:

> Bis ins Jahr 2003 wurden alle Aufbereitungsrückstände – sowohl feste wie auch flüssige – des Kaliwerkes Boulby vollständig in die Nordsee eingeleitet, was aufgrund der Position des Produktionsstandortes unmittelbar an der Nordseeküste eine hier naheliegende Beseitigungsoption darstellte. Als Suspension wurden seinerseits lösliche und unlösliche Bestandteile gemeinsam beseitigt (▸ Abschnitt 8.2). Da die Aufbereitungsrückstände des Kaliwerkes Boulby jedoch Gehalte an Quecksilber und Cadmium enthalten, die durch ihr Haftvermögen an Tonmineralen hauptsächlich in den unlöslichen Bestandteilen enthalten sind, werden die etwa 180.000 Tonnen pro Jahr unlösliche Rückstände seit 2003 größtenteils nicht mehr mit den löslichen Bestandteilen der Aufbereitungsrückstände in die Nordsee verbracht, sondern in nicht mehr genutzte Bereiche des Bergwerkes versetzt (BGS 2006, /97/). Sie sind hier jedoch nicht zwingend zur Stabilisierung der Grubenhohlräume erforderlich, weshalb auch im bergrechtlichen Sinne keine Versatzpflicht besteht.

Im Mai 2003 wurde eine spezielle Versatzanlage in Betrieb genommen, mit deren Hilfe diese unlöslichen Bestandteile vor der Herstellung der Einleitungssuspension abgetrennt und als Dickstoffversatz im Bergwerk beseitigt werden. Die Errichtung der Versatzanlage und das vorausgegangene F/E-Vorhaben wurde zugunsten des britischen Kaliproduzenten CPL im Rahmen des sogenannten *LIFE Programme* der *Environment Initiative* über 4 Jahre durch die EU finanziell gefördert (EC 2002a, /222/; CPL 2004, /172/; Wilkins et al. 2004, /1119/).

Beseitigung der Aufbereitungsrückstände auf kurzem Wege größtenteils direkt in die Nordsee

Der weitaus größte Teil der unvermeidbar anfallenden festen und flüssigen Aufbereitungsrückstände wird jedoch auch an diesem britischen Produktionsstandort in ähnlicher Art und Weise wie an all den anderen Standorten der Kalidüngemittelproduktion beseitigt. Das Kaliwerk Boulby verbringt diese Rückstände als Suspension direkt in die unmittelbar benachbarte Nordsee, was in Abschnitt 8.2 näher ausgeführt wird.

Eine am Beginn des vergangenen Jahrzehnts von der Generaldirektion Umwelt[167] der Europäischen Kommission bei der britischen SYMONDS GROUP LTD. – im Zuge der seinerzeit angestrebten *Mining Waste Directive*, einer auf die Erstellung eines Referenzdokumentes für die Beste Verfügbare Technik (BVT) zur Rückstandsvermeidung und -entsorgung zielenden Initiative – beauftragte Studie (SYMONDS 2001, /996/) zur Praxis der Beseitigung von bergbaulichen Abfällen in den Mitgliedsstaaten der EU hatte sich unter anderem auch mit dem Rückstandsmanagement der beiden EU-Kalidüngemittelproduzenten CPL und der früheren KALI & SALZ GMBH (heute: K+S KALI GMBH) befasst und eben diese oben genannten grundsätzlichen Entsorgungswege bestätigt. Die an einem konkreten Standort praktizierten Entsorgungswege orientieren sich demnach nicht nur an der jeweiligen technischen Realisierbarkeit, sondern auch an der wirtschaftlichen Machbarkeit. Beide Kriterien, technische und wirtschaftliche Machbarkeit, hängen immer von den Randbedingungen am jeweiligen Produktionsstandort ab.

Die anonymen Autoren dieser Studie nehmen für sich auch in Anspruch, Auskunft über die seinerzeitigen Kosten für einzelne Entsorgungspfade zu liefern, schränken jedoch mit Bezug auf die Kaliindustrie ein, solche Kosten anhand von Abwasserentsorgungsgebühren selbst abgeschätzt zu haben, da ihnen keine für die seriöse Ermittlung erforderlichen Eingangsdaten vorlagen (SYMONDS 2001, /996/; S. 45). Obgleich die absoluten Größenordnungen auch unter Würdigung der seinerzeit andersartigen Kostenstrukturen völlig unzutreffend sind, soll dieser bereits früher publizierte Ansatz hier dennoch zitiert werden, da er die Relationen der Kosten unterschiedlicher Entsorgungspfade halbwegs treffend wiederzugeben in der Lage ist:

> Geht man davon aus, dass der Abstoß flüssiger Rückstände und/oder fester Rückstände in vollständig gelöster Form in Fließgewässer oder in partiell gelöster Form als Suspension direkt in das Meer (solche Entsorgungspfade werden im Abschnitt 8.2 behandelt) die kostengünstigste Option darstellt, dann verursachen die Versenkung flüssiger Rückstände und/oder fester Rückstände in gelöster Form in Poren- oder Kluftspeichergesteine im geologischen Untergrund (solche Entsorgungspfade werden im Abschnitt 8.2 behandelt) oder auch die Aufhaldung fester Rückstände an der Oberfläche (solche Entsorgungspfade werden im Abschnitt 8.1.2 behandelt) ungefähr 3 bis 4 mal höhere Kosten, der Versatz fester Rückstände in Gewinnungshohlräumen der sogenannten Steilen Lagerung (solche Entsorgungspfade werden im Abschnitt 8.1.1 behandelt) mindestens 10 bis 15 mal höhere Kosten und der Versatz fester Rückstände in Gewinnungshohlräumen der sogenannten Flachen Lagerung (solche Entsorgungspfade werden im Abschnitt 8.1.1 behandelt) mindestens 20 mal höhere Kosten.

Im Ergebnis der *Mining Waste Directive* wurde letztlich im Jahr 2009 für die gesamte Bergbauindustrie der EU ein Referenzdokument zur Besten Verfügbaren Technik (BVT) bei der Vermeidung und Beseitigung von bergbaulichen Abfällen (EC 2009, /226/) vorgelegt, das naturgemäß, da es für alle Bergbauzweige Anwendung finden sollte, in weiten Teilen sehr allgemein formuliert ist und nicht oder nur in Ausnahmefällen auf die spezifischen Belange der Kalidüngemittelproduktion einzugehen vermag. Welche Methoden zur Vermeidung und Beseitigung von bergbaulichen Abfällen zum Einsatz kommen, hängt nach diesem Referenzdokument im Wesentlichen von den entstehenden Kosten, den standortspezifischen Umweltrichtlinien und den vorhersehbaren Betriebsrisiken ab (EC 2009, /226/).

Das Referenzdokument beschreibt einmal mehr, dass der größte Teil der festen und flüssigen Rückstände der Kalisalzaufbereitung auf Rückstandsflächen als Halde oder in Lösungssammelbecken abgelagert werden. Ein geringerer Teil dieser Rückstände wird in Fließgewässer oder auch direkt in ozeanische Gewässer eingeleitet oder aber in geeignete Speichergesteine im geologischen Untergrund versenkt. Ferner wird in dem Referenzdokument hervorgehoben, dass lediglich geringe Mengen der weltweit anfallenden Rückstände als Versatz in die Bergwerke zurückgebracht werden. Diese Einschätzungen gelten bis heute, charakterisieren also die Entsorgungspraxis in der Mitte der zweiten Dekade des 21. Jahrhunderts noch immer treffend, was in den folgenden Abschnitten näher beleuchtet werden soll.

Wie in der früheren, unabhängigen Studie (SYMONDS 2001, /996/) kommt auch die Regulierungsinstanz der EU in ihrem Referenzdokument zur Besten Verfügbaren Technik (EC 2009, /226/) hinsichtlich der Vermeidung und der Beseitigung von Rückständen bei der Kalidüngemittelproduktion zu dem Schluss, dass die an einem konkreten Standort genutzten technischen Methoden, Verfahren und Anlagen ausschließlich von den dort herrschenden Randbedingungen abhängen (▸ Box 7.1), wobei als wesentlichste Einflussfaktoren wiederum natürliche geologische, wie

- der Wertstoffgehalt des Rohsalzes;
- die Dimension und auch die Tiefenlage der Lagerstätte;
- die hydrogeologischen und gebirgsmechanischen Bedingungen der Lagerstätte

und

- die seismologischen Verhältnisse des weiteren Umfeldes;

167 *Directorate-General for the Environment of European Commission*

von anthropogen geschaffenen logistischen und/oder infrastrukturellen, wie

- Nutzungseinschränkungen an der Oberfläche und Flächenverfügbarkeit

und

- naturräumlichen und sonstigen Umweltbedingungen des umgebenden Gebietes

zu unterscheiden sind. Solche Abhängigkeiten zwischen den an einem konkreten Standort praktizierten Verfahrensweisen und den dort herrschenden natürlichen und/oder vom Menschen geschaffenen Randbedingungen wurden bereits im Kapitel 4 exemplarisch erläutert und wurden in den weiteren Kapiteln auch in ihren Auswirkungen auf die Rohstoffgewinnung (▸ Kapitel 5) beziehungsweise die Rohstoffaufbereitung (▸ Kapitel 6) beschrieben. In gleicher Weise soll dies nun im Folgenden für die Methoden, Verfahren und Anlagen zur Beseitigung der festen und flüssigen Aufbereitungsrückstände der Kalidüngemittelproduktion sowie jener Salzlösungen, die als Folge der Niederschlagseinwirkung auf die aufgehaldeten festen Aufbereitungsrückständen entstehen, angewendet werden.

Die Frage nach der richtigen Verfahrensweise zur – im heutigen juristischen Sprachgebrauch der Bundesrepublik Deutschland und der EU – Beseitigung dieser Gewinnungs- und Aufbereitungsrückstände ist in der Geschichte der Kaliindustrie vielfach, teilweise auch kontrovers behandelt worden. Historisch bedingt, nahm Deutschland als Mutterland der Kaliindustrie in dieser Diskussion stets eine Vorreiterrolle ein (KFI 1944, /517/; 1970, /518/; Fulda, Gruchot & Michalzik 1966, /301/; Gimm 1968, /331/; Autenrieth 1969b, /36/; Jendersie 1969, /454/; Hoffmann 1972, /404/; Singewald 1980, /934/; KALIVEREIN 1988, /497/; Jeremic 1994, /455/; Garrett 1996, /315/; Emons 2001, /237/; Rauche 2002b, /797/; Bartl 2003a, /63/; Scherzberg 2003, /879/; Riesche 2004, /841/; Herrmann 2007, /391/). Wie bereits vorab ausführlich erläutert wurde (▸ Kapitel 7), hängt die Menge der bei der Kalidüngemittelproduktion unvermeidbar anfallenden Rückstände maßgeblich von der Zusammensetzung des Kalirohstoffes ab. Diese naturgegebenen Bedingungen sind für jede Lagerstätte sehr verschieden und somit existiert auch kein Standardmodell für die Gewinnung oder die Aufbereitung der Kalirohsalze und ebenso wenig für die Entsorgung der dabei unvermeidbar anfallenden festen und flüssigen Rückstände (EC 2009, /226/). Da die einzelnen Rohstoffkörper nur in engen Grenzen homogen aufgebaut und zusammengesetzt sind, ändern sich diese Randbedingungen auch im Laufe der Lebenszeit eines Kaliwerkes zum Teil derart drastisch, so dass früher erfolgreich angewendete Gewinnungs- und Aufbereitungsverfahren im späteren Nutzungsabschnitt einer Lagerstätte durch andersartige ersetzt werden müssen, was nicht selten auch unmittelbare Auswirkungen hinsichtlich Art und Menge der bergbaulichen Abfälle hat. Im früheren Südharz-Kalirevier wurde es zum Beispiel aufgrund zur Neige gehender Hartsalzvorräte und zur Verlängerung der Lebensdauer der Betriebe bereits ab den 1960er Jahren notwendig, höhere Anteile von Carnallitit in die Förderung zu bringen. Die Aufbereitung von solchen Carnallititrohsalzen führt aber naturgemäß zu großen Mengen an flüssigen Rückständen, in denen die Hauptsalzkomponente das $MgCl_2$ ist, und insgesamt auch zu einem spezifisch höheren Anteil flüssiger Rückstände als bei der früheren Hartsalzverarbeitung. Weiterentwicklungen der Methoden und Verfahren zur Aufbereitung der Kalirohsalze haben ebenfalls erhebliche Auswirkungen auf die Anteile von festen und flüssigen bergbaulichen Abfällen. Dies trifft in besonderem Maße für die elektrostatische Aufbereitung (ESTA®) zu (▸ Abschnitt 6.1.3), einem Aufbereitungsverfahren, welches an sich keine flüssigen Rückstände erzeugt. Durch Einführung dieser ESTA®-Aufbereitung in Hessen und Niedersachsen ist der Anteil von flüssigen Rückständen an der Gesamtmenge der Rückstände von 44 Prozent im Jahre 1974 auf 24 Prozent im Jahre 1988 gesunken (Singewald 1980, /933/; Fricke 1986, /292/; Walterspiel 1989, /1090/; Prugger 1992, /785/).

Die eingangs erläuterten Unterschiede zu den Beseitigungskosten und auch die ebenfalls bereits diskutierte Einflußnahme der an einem konkreten Standort herrschenden Randbedingungen vor Augen, verwundert es nicht, dass faktisch für alle zur Zeit in Planung befindlichen *greenfield* Projekte mit Bergmännischer Gewinnung auch die Applikation von Versatzoptionen geprüft wurde, diese aber in kaum einem heute als wirtschaftlich machbar darstellbaren Projekt zur Anwendung kommen. Selbst der für seine hohen Arbeitssicherheits- und Umweltstandards bekannte australisch-britische Bergbaukonzern BHP BILLITON PLC – das nach seiner Marktkapitalisierung größte Rohstoffunternehmen der Welt – wird in seinem, dann der Förderkapazität nach mit über 24 Millionen Tonnen Rohsalz pro Jahr wohl größtem Kalibergwerk der Welt, dem Jansen Projekt, Saskatchewan, Kanada, gleichfalls kein Versatzeinbringen von festen Aufbereitungsrückständen in ausgesalzenen Abbauen vornehmen. Auch der ergebnisoffene Entscheidungsprozess darüber, ob ein kleiner Teil der festen Aufbereitungsrückstände, die sogenannten Schlämme nach unter Tage beseitigt werden können, wurde in die Zeit nach Beginn der zukünftigen Produktionsphase vertagt (BHPB 2010, /99/). Diese Erfahrungstatsachen können insofern auch nicht verwundern, da sie doch gerade auch im Sinne der eingangs erwähnten Maxime Hermann Hesse‘ das in unserer heutigen ökologischen, ökonomischen, politischen und rechtlichen Wirklichkeit *Mögliche* abbilden, was es im Rahmen von Alternativenprüfungen – in Saskatchewan, Kanada, wie auch anderswo – vom zurzeit *Unmöglichen* abzugrenzen galt.

Die heutige, also in der Mitte der zweiten Dekade des 21. Jahrhunderts betriebene industrielle Praxis im Umgang mit den nicht weiter verwertbaren Stoffströmen soll im Folgenden ausführlich beschrieben und einer vergleichenden Analyse unterzogen werden. Die Entsorgung fester Aufbereitungsrückstände (▸Abschnitt 8.1) als trockener oder hydraulischer Versatz wird im Abschnitt 8.1.1 abgehandelt, die durch Aufhaldung im Abschnitt 8.1.2. Die Entsorgung der flüssigen Aufbereitungsrückstände durch Einleitung in Fließgewässer beziehungsweise an Produktionsstandorten nahe der Meeresküste direkt in den Ozean und/oder durch Versenkung in den geologischen Untergrund wird im Abschnitt 8.2 ausführlich erläutert. Ferner werden hier auch die an einigen Standorten betriebene partielle oder vollständige Auflösung der festen Rückstände und deren weitere Beseitigung in flüssiger Form oder als Suspension behandelt. In Form einer zusammenfassenden Übersicht geben die STANDORT-STECKBRIEFE in Kapitel 10 über die an den einzelnen Standorten der Kalidüngemittelproduktion praktizierten Beseitigungspfade Auskunft.

8.1 Beseitigung fester Gewinnungs- und Aufbereitungsrückstände

Feste Rückstände fallen einmal bei der Bergmännischen Gewinnung fester Kalirohsalze unter Tage und weiterhin bei der Rohstoffaufbereitung sowohl bei Nutzung fester Kalirohsalze aus Bergmännischer Gewinnung, als auch bei der Aufbereitung technischer Lösungen aus der Soltechnischen Gewinnung fester Kalisalzlagerstätten und ebenso bei der Aufbereitung natürlicher Lösungen an. An allen 67 Standorten der Kaliindustrie, wo die Aufbereitung der verschiedenen Kalirohstoffe zu Kalidüngemitteln erfolgt, und ebenso an den 4 Standorten, wo ausschließlich Bergmännische Gewinnung von Kalirohsalzen stattfindet, fallen feste Rückstände zur Beseitigung an. Eine Übersicht zu den Entsorgungspfaden für die festen Gewinnungs- und Aufbereitungsrückstände der weltweit insgesamt 71 Produktionsanlagen, die im Jahr 2014 im planmäßigen industriellen Betrieb zur Kalidüngemittelproduktion genutzt wurden, zeigt Tabelle 32.

Tabelle 32 Übersicht zu den Beseitigungspfaden für die an den Standorten der Kalidüngemittelproduktion anfallenden festen Gewinnungs- und Aufbereitungsrückstände (▸Tabelle 1)

Produzent/ Standort[5]	Feste Rückstände aus ...	Beseitigungspfade
URALKALI		
Solikamsk 3	... Bergmännischer Gewinnung und Flotation	Sofortversatz von Gewinnungsrückständen, Aufhaldung und Spülversatz von festen Aufbereitungsrückständen und Verbringen der unlöslichen Rückstände als Spülversatz in speziell aufgefahrene Abbaukammern im Steinsalz
Berezniki 4	... Bergmännischer Gewinnung, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	Sofortversatz von Gewinnungsrückständen, Aufhaldung der größten Anteile der festen Aufbereitungsrückstände und Verbringen der unlöslichen Rückstände als Spülversatz in speziell aufgefahrene Abbaukammern im Steinsalz
Solikamsk 2	... Bergmännischer Gewinnung und Flotation	Sofortversatz von Gewinnungsrückständen, Aufhaldung und Spülversatz von festen Aufbereitungsrückständen und Verbringen der unlöslichen Rückstände als Spülversatz in speziell aufgefahrene Abbaukammern im Steinsalz
Berezniki 3[168]	... Bergmännischer Gewinnung und Flotation	Aufhaldung der festen Aufbereitungsrückstände

168 Die im Kaliwerk Berezniki 3 aufbereiteten festen Kalirohsalze werden in den Kalibergwerken Berezniki 2 und Berezniki 4 gewonnen.

Produzent/ Standort[5]	Feste Rückstände aus ...	Beseitigungspfade
Berezniki 2	... Bergmännischer Gewinnung und Flotation	Sofortversatz von Gewinnungsrückständen, Aufhaldung der festen Aufbereitungsrückstände
Solikamsk 1	... Bergmännischer Gewinnung, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	Sofortversatz von Gewinnungsrückständen, Aufhaldung und Spülversatz von festen Aufbereitungsrückständen und Verbringen der unlöslichen Rückstände als Spülversatz in speziell aufgefahrene Abbaukammern im Steinsalz
PCS		
Lanigan	... Bergmännischer Gewinnung, Flotation, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	Sofortversatz von Gewinnungsrückständen, Aufhaldung von festen Aufbereitungsrückständen und Versenkung aufgelöster fester Aufbereitungsrückstände
Rocanville	... Bergmännischer Gewinnung und Flotation	Sofortversatz von Gewinnungsrückständen, Aufhaldung von festen Aufbereitungsrückständen und Versenkung aufgelöster fester Aufbereitungsrückstände
Allan	... Bergmännischer Gewinnung, Flotation, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	Sofortversatz von Gewinnungsrückständen, Aufhaldung von festen Aufbereitungsrückständen und Versenkung aufgelöster fester Aufbereitungsrückstände
Cory	... Bergmännischer Gewinnung, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation sowie Flotation	Sofortversatz von Gewinnungsrückständen, Aufhaldung von festen Aufbereitungsrückständen und Versenkung aufgelöster fester Aufbereitungsrückstände
New Brunswick[7]	... Bergmännischer Gewinnung, Flotation, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	Sofortversatz von Gewinnungsrückständen, Versatz aller festen Aufbereitungsrückstände als Trocken- und Spülversatz
Patience Lake	... Soltechnischer Gewinnung und natürlicher Kühlkristallisation	Verbleib ungelöster Bestandteile des festen Rohsalzes in den abgesoffenen Grubenhohlräumen, Aufhaldung von festen Aufbereitungsrückständen und Versenkung aufgelöster fester Aufbereitungsrückstände
MOSAIC		
Esterhazy K1	... Bergmännischer Gewinnung und Flotation	Sofortversatz von Gewinnungsrückständen, Aufhaldung von festen Aufbereitungsrückständen und Versenkung aufgelöster fester Aufbereitungsrückstände
Esterhazy K2	... Bergmännischer Gewinnung, Schweretrennung, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	Sofortversatz von Gewinnungsrückständen, Aufhaldung von festen Aufbereitungsrückständen und Versenkung aufgelöster fester Aufbereitungsrückstände

Produzent/ Standort[5]	Feste Rückstände aus ...	Beseitigungspfade
Belle Plaine	... Soltechnischer Gewinnung, technischer Eindampf-/Kühlkristallisation und natürlicher Kristallisation	Verbleib ungelöster Bestandteile des festen Rohsalzes in den ausgesalzenen Kavernen, Aufhaldung von festen Aufbereitungsrückständen und Versenkung aufgelöster fester Aufbereitungsrückstände sowie Rückführung fester Aufbereitungsrückstände als Versatz in ausgesalzene Kavernen
Colonsay	... Bergmännischer Gewinnung, Flotation, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	Sofortversatz von Gewinnungsrückständen, Aufhaldung von festen Aufbereitungsrückständen und Versenkung aufgelöster fester Aufbereitungsrückstände
Carlsbad	... Bergmännischer Gewinnung und Flotation	Sofortversatz von Gewinnungsrückständen, Aufhaldung von festen Aufbereitungsrückständen
Hersey[9]	... Soltechnischer Gewinnung, technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	Verbleib ungelöster Bestandteile des festen Rohsalzes in den ausgesalzenen Kavernen, Versenkung aufgelöster fester Aufbereitungsrückstände
BELARUSKALI		
Soligorsk 4	... Bergmännischer Gewinnung, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	Sofortversatz von Gewinnungsrückständen, vollständige Aufhaldung der festen Aufbereitungsrückstände
Soligorsk 3	... Bergmännischer Gewinnung und Flotation	Sofortversatz von Gewinnungsrückständen, vollständige Aufhaldung der festen Aufbereitungsrückstände
Soligorsk 2	... Bergmännischer Gewinnung und Flotation	Sofortversatz von Gewinnungsrückständen, vollständige Aufhaldung der festen Aufbereitungsrückstände
Soligorsk 1	... Bergmännischer Gewinnung und Flotation	Sofortversatz von Gewinnungsrückständen, vollständige Aufhaldung der festen Aufbereitungsrückstände
Soligorsk 5 (Krasnoslobodsky)	... Bergmännischer Gewinnung	KEINE Aufbereitung, NUR Gewinnung: Sofortversatz von Gewinnungsrückständen
Soligorsk 6 (Berezowsky)	... Bergmännischer Gewinnung	KEINE Aufbereitung, NUR Gewinnung: Sofortversatz von Gewinnungsrückständen
CHINA		
Mindestens 24 Standorte unterschiedlichster Größe	... solarer Evaporation und natürlicher Kristallisation, an einzelnen Standorten auch kombiniert mit Flotation und/oder technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	Rückführung der festen Aufbereitungsrückstände in die Salzseen

Produzent/ Standort[5]	Feste Rückstände aus ...	Beseitigungspfade
K+S		
Verbundwerk Werra, bestehend aus den Standorten:		
Wintershall	... Bergmännischer Gewinnung, Flotation, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation sowie ESTA®	Sofortversatz von Gewinnungsrückständen, vollständige Aufhaldung der festen Aufbereitungsrückstände
Hattorf	... Bergmännischer Gewinnung, Flotation, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation sowie ESTA®	Sofortversatz von Gewinnungsrückständen, vollständige Aufhaldung der festen Aufbereitungsrückstände
Unterbreizbach	... Bergmännischer Gewinnung, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation sowie Flotation	Sofortversatz von Gewinnungsrückständen, Spülversatz aller festen Aufbereitungsrückstände
Zielitz	... Bergmännischer Gewinnung, Flotation, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	Sofortversatz von Gewinnungsrückständen, vollständige Aufhaldung der festen Aufbereitungsrückstände
Neuhof-Ellers	... Bergmännischer Gewinnung, Flotation und ESTA®	Sofortversatz von Gewinnungsrückständen, vollständige Aufhaldung der festen Aufbereitungsrückstände
Sigmundshall	... Bergmännischer Gewinnung, Flotation, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation sowie ESTA®	Sofortversatz von Gewinnungsrückständen, teilweise Aufhaldung und teilweise Trockenversatz der festen Aufbereitungsrückstände
DSW		
Dead Sea	... solarer Evaporation und natürlicher Kristallisation, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation sowie Flotation	Rückführung der festen Aufbereitungsrückstände in das Tote Meer
ICL IBERIA S & S		
Súria	... Bergmännischer Gewinnung und Flotation	Sofortversatz von Gewinnungsrückständen, Aufhaldung von festen Aufbereitungsrückständen und Einleitung aufgelöster fester Aufbereitungsrückstände in das Mittelmeer
Cabanasas	... Bergmännischer Gewinnung	KEINE Aufbereitung, NUR Gewinnung: Sofortversatz von Gewinnungsrückständen

Produzent/ Standort[5]	Feste Rückstände aus ...	Beseitigungspfade
Sallent[169]	... Bergmännischer Gewinnung und Flotation	Aufhaldung von festen Aufbereitungsrückständen und Einleitung aufgelöster fester Aufbereitungsrückstände in das Mittelmeer
Villafruns	... Bergmännischer Gewinnung	KEINE Aufbereitung, NUR Gewinnung: Sofortversatz von Gewinnungsrückständen
CPL		
Boulby	... Bergmännischer Gewinnung, Flotation, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	Sofortversatz von Gewinnungsrückständen, Einleitung des größten Anteils der festen Aufbereitungsrückstände als Suspension in die Nordsee und Verbringen der unlöslichen Bestandteile in Abbaukammern als Dickstoffversatz
APC		
Safi	... solarer Evaporation und natürlicher Kristallisation, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation sowie Flotation	Rückführung der festen Aufbereitungsrückstände in das Tote Meer
AGRIUM		
Vanscoy	... Bergmännischer Gewinnung, Flotation, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	Sofortversatz von Gewinnungsrückständen, Aufhaldung von festen Aufbereitungsrückständen und Versenkung aufgelöster fester Aufbereitungsrückstände
SQM		
Salar de Atacama	... solarer Evaporation und natürlicher Kristallisation sowie Flotation	Rückführung der festen Aufbereitungsrückstände in den Salar de Atacama
INTREPID		
Carlsbad East	... Bergmännischer Gewinnung, Flotation, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	Sofortversatz von Gewinnungsrückständen, vollständige Aufhaldung der festen Aufbereitungsrückstände
Carlsbad West	... Bergmännischer Gewinnung und Flotation	Sofortversatz von Gewinnungsrückständen, vollständige Aufhaldung der festen Aufbereitungsrückstände
Moab	... Soltechnischer Gewinnung, solarer Evaporation und natürlicher Kristallisation sowie Flotation	Verbleib ungelöster Bestandteile des festen Rohsalzes in den ausgesalzenen Kavernen respektive Grubenhohlräumen, Aufhaldung von festen Aufbereitungsrückständen sowie Rückführung eines Teiles der fester Aufbereitungsrückstände als Versatz in ausgesalzene Kavernen
Wendover	... solarer Evaporation und natürlicher Kristallisation sowie Flotation	Rückführung der festen Aufbereitungsrückstände in den Great Salt Lake

169 Die im Kaliwerk Sallent aufbereiteten festen Kalirohsalze werden im Kalibergwerk Villafruns gewonnen.

Produzent/ Standort[5]	Feste Rückstände aus ...	Beseitigungspfade
VALE		
Taquari-Vassouras	... Bergmännischer Gewinnung und Flotation	Sofortversatz von Gewinnungsrückständen, Einleitung der festen Aufbereitungsrückstände als Suspension in den Südatlantik
COMPASS		
Great Salt Lake	... solarer Evaporation und natürlicher Kristallisation, Flotation sowie technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	Rückführung der festen Aufbereitungsrückstände in den Great Salt Lake
UZKIMYOSANAT		
Dechkanabad	... Bergmännischer Gewinnung und Flotation	Sofortversatz von Gewinnungsrückständen, Aufhaldung aller festen Aufbereitungsrückstände
DEUSA		
Kehmstedt/ Bleicherode	... Soltechnischer Gewinnung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	Verbleib ungelöster Bestandteile des festen Rohsalzes in den ausgesalzenen Kavernen, Rückführung der festen Aufbereitungsrückstände in die Kavernen als Versatz

Mengenmäßig überwiegen bei weitem solche Rückstände, die aus der Aufbereitung fester Kalirohsalze resultieren, da mit Hilfe dieser Verfahren etwa 70 Prozent der weltweiten Kalidüngemittelproduktion erfolgt (▸ Abschnitte 5.1 und 6.1). Bezogen auf das spezifische Verhältnis von Rückstands- zu Produktmenge entfallen auf diese Verfahren ebenfalls die höchsten Anteile (▸ Kapitel 7). Dies hat seine Ursache zum einen darin, dass bei der Bergmännischen Gewinnung der festen Rohsalze unter Tage aus maschinentechnischen und/oder bergbausicherheitlichen Gründen unvermeidbar auch wertstofffreie beziehungsweise -arme Gesteinsvolumina abgebaut werden und zumindest teilweise in den zur Aufbereitung geförderten Stoffstrom gelangen. Zum anderen sind alle soltechnischen Gewinnungsmethoden aufgrund der ihnen eigenen Lösekinetik in gewissem Maße stets selektiv ausgelegt, so dass es in der Produktionslösung zu einer gegenüber dem Lagerstätteninhalt inkongruenten Anreicherung der Wertstoffkomponente kommt. Wie sich dies synoptisch für die wichtigsten Standorte und die wesentlichsten Verfahren der Kalidüngemittelproduktion darstellt, wie hoch die spezifischen Wertstoffverluste, die Verbrauchsmengen an Reagenzien und die dabei anfallenden spezifischen Mengen fester und flüssiger Aufbereitungsrückstände pro Tonne Produkt sind, wurde bereits in Tabelle 30 quantitativ gegenübergestellt und im Kapitel 7 ausführlich erläutert.

Bei der Aufbereitung der festen Kalirohsalze zu Kalidüngemitteln wird der Wertstoff KCl vorwiegend aus den Mineralen Sylvin, Carnallit oder auch anderen Kalium-Trägern wie Kainit, Langbeinit oder Polyhalit separiert. Alle übrigen im jeweiligen Rohsalz enthaltenen Begleitminerale, zum überwiegenden Teil Halit, daneben Tonminerale und sulfatische Salze, gelangen dabei zwangsläufig in die festen beziehungsweise flüssigen Aufbereitungsrückstände. Diese sind zumeist grobkörnige Rückstände aus Löse- beziehungsweise Flotationsprozessen oder auch trockene feinkörnige Rückstände der elektrostatischen Aufbereitung und feinkörnigere und feuchte Schlämme aus Löse- beziehungsweise Flotationsprozessen. Reagenzien aus der Aufbereitung per Flotation oder elektrostatischer Sortierung sind in den Rückständen nur in vernachlässigbaren Mengen enthalten und stellen keine Umweltgefährdung dar (EC 2009, /226/).

Tabelle 31 fasst die im Jahr 2011 an den verschiedenen Standorten der Kalidüngemittelproduktion praktizierten Methoden zur Beseitigung der festen Aufbereitungsrückstände zusammen. Dabei ist auch angegeben, in welcher Relation die einzelnen Methoden zur Verbringung der festen Rückstände genutzt werden.

Rund 9 Prozent der weltweit bei der Kalidüngemittelproduktion unvermeidbar anfallenden festen Aufbereitungsrückstände werden nach dem über Tage stattfindenden Aufbereitungsprozess als Versatz in Bergwerke zurück nach unter Tage verbracht (▸ Abschnitt 8.1.1). Mehr als vier Fünftel der festen Aufbereitungsrückstände (rund 81%) werden an der Erdoberfläche durch Ablagerung auf sogenannte Großhalden beseitigt (▸ Abschnitt 8.1.2). Rund 10 Prozent der festen Rückstände werden in wässrigen Lösungen aufgelöst und über natürliche Fließgewässer oder auf kurzem Wege über Rohrleitungen direkt dem Meerwasser zugeführt beziehungsweise durch Versenkung in den geologischen Untergrund beseitigt (▸ Abschnitt 8.2).

Alle 3 Entsorgungspfade finden auch für die festen Aufbereitungsrückstände Anwendung, die bei der Aufbereitung von technischen Lösungen aus der Soltechnischen Gewinnung anfallen. Diese Rückstände werden zum Beispiel in Belle Plaine, Saskatchewan, Kanada, aufgehaldet oder auch gemeinsam mit einem Teil der flüssigen Rückstände in ausgesolte Kavernen zurückgeführt beziehungsweise im geologischen Untergrund versenkt.

Die bei der solaren Evaporation natürlicher Lösungen anfallenden festen Rückstände werden in der Regel im Umfeld der Evaporationsbecken abgelagert. Sie finden teilweise als Baumaterial bei der regelmäßigen Erweiterung der Dämme dieser großen Verdunstungsbecken Verwendung. Aufgrund der geringen Wertstoffgehalte der natürlichen Lösungen und der lösekinetisch kontrollierten Kristallisationsabfolge fallen auch hier erhebliche Mengen fester Rückstände an. Bei der solaren Evaporation der aus dem Toten Meer gewonnenen Salzlösungen sind es zum Beispiel 8,8 Tonnen NaCl pro Tonne Fertigprodukt.

Die nachfolgenden Abschnitte fokussieren sich auf den mengenmäßig größten Anteil fester Aufbereitungsrückstände, wie er bei der Aufbereitung fester Kalirohsalze aus Bergmännischer Gewinnung anfällt. Daher werden zunächst die Verfahren zum Versatz dieser festen Rückstände in Gewinnungshohlräumen (▸ Abschnitt 8.1.1) und im Anschluss die Aufhaldung der festen Aufbereitungsrückstände (▸ Abschnitt 8.1.2) synoptisch beschrieben. Im Abschnitt 8.1.3 werden schließlich die Methoden und Verfahren zur vollständigen oder partiellen Auflösung fester Aufbereitungsrückstände und deren meist gemeinsam mit den flüssigen Aufbereitungsrückständen betriebene Beseitigung behandelt.

8.1.1 Beseitigung fester Gewinnungs- und Aufbereitungsrückstände als Versatz

Die Tabelle 33 zeigt im Überblick, an welchen Standorten derzeit feste Gewinnungs- und Aufbereitungsrückstände als Versatz in untertägige Hohlräume eingebracht werden.

Die Gewinnungsrückstände, das heißt die beim Prozess der Rohstoffgewinnung unter Tage aus technischen und/oder bergbausicherheitlichen Gründen unvermeidbar mit abgebauten wertstofffreien beziehungsweise -armen Gesteinsvolumina, werden in nahezu allen heute weltweit 35 Kalisalzbergwerken bereits seit Jahrzehnten in Form von Sofortversatz unter Tage beseitigt. Dieses bei der Bergmännischen Gewinnung von Kalirohsalzen in aller Regel bei der Aus- und Vorrichtung der Lagerstätte anfallende Steinsalzhaufwerk verbleibt direkt unter Tage und wird als sogenannter Sofortversatz in ausgesalzene Abbaukammern eingebracht. Auf diese Weise wird vermieden, dass diese Stoffströme mit in die zur Aufbereitungsanlage zu fördernden Rohstoffströme gelangen und dort den durchschnittlichen Wertstoffgehalt verdünnen beziehungsweise die Förderkapazität belasten. In den Kalibergwerken mit schneidender Gewinnung im Langkammerabbau liegt der Anteil des Sofortversatzes an der gesamten jährlich geschnittenen Rohsalzmenge im Mittel um 2 Prozent.

In den mit Bohr- und Sprengtechnik betriebenen Kalibergwerken von K+S werden durchschnittlich mehr als 10 Prozent der jährlich gewonnenen Rohsalztonnage durch Sofortversatz unter Tage beseitigt, im Verbundwerk Werra sind es sogar über 15 Prozent. In diesen unterschiedlichen Zahlen zeigt sich auch der grundsätzlich verschiedenartige, durch die Lagerstättenstruktur vorgegebene Grubenzuschnitt: Während in Saskatchewan nur wenige Grubenbaue im wertstofffreien Steinsalz aufgefahren werden, ist man an der Oberen Kama, mehr noch in den deutschen Lagerstätten gezwungen, einen größeren Anteil der langlebigen Infrastrukturauffahrungen (Hauptförder- und -wetterstrecken, Werkstätten u.ä.) in die Steinsalzhorizonte zu verlagern. Zwangsläufig fällt demnach in Saskatchewan auch weniger Steinsalz zum Sofortversatz an.

In diesen enormen Unterschieden kommt einmal mehr die hohe Flexibilität der maschinentechnischen Kette beim Bohr- und Sprengbetrieb zum Ausdruck, die nicht nur einen effizienten Rohsalzabbau sondern auch den effektiven Sofortversatz durch selektive Zwischenförderung derart großer Haufwerkanteile ermöglicht. Nichtsdestotrotz sind aber auch dem Sofortversatz Grenzen aufgezeigt, die einmal im unzureichenden Hohlraumangebot bei Neuaufschlüssen von Feldesteilen und zum anderen durch zu große Wege für die Zwischenförderung bestehen. Ferner ist zu berücksichtigen, dass der für den Sofortversatz in alten Bergwerken respektive Feldesteilen zur Verfügung stehende ausgesalzene Abbauhohlraum, der sogenannte "Alte Mann", vielfach sehr lange Standzeiten erlebt hat und

damit hinsichtlich First- und Stoßsicherheit in der Regel sehr kritisch zu bewerten ist. Das Einbringen von Sofortversatz in diese alten Grubenbaue erfordert daher zunächst die Herstellung sicherer Firsten und Stöße, ist also mit zum Teil beträchtlichen Regulierungsarbeiten an der – nach den langen Standzeiten zum Teil erheblich – entfestigten Pfeilersubstanz verbunden, was aus arbeits- und bergbausicherheitlichen Gründen mitunter unmöglich ist. Insofern ist die Anwendung und das Ausmaß von Sofortversatz im Einzelfall ebenfalls von arbeitssicherheitlichen, betriebsorganisatorischen, bergtechnischen und nicht zuletzt betriebswirtschaftlichen Zwängen diktiert.

Tabelle 33 Beseitigung der festen Rückstände aus Bergmännischer Gewinnung mittels Versatz im Jahr 2011 für ausgewählte Kalidüngemittelproduzenten

						Prozentualer Anteil[170]	
Kalidüngemittelproduzent	**Land**	**Gewinnung[168] (Rohsalze und Sofortversatz)**	**Sofortversatz**	**Versatz von Aufbereitungsrückständen**	**Versatzmenge gesamt[169]**	**... an der gewonnenen Rohsalzmenge**	**... an dem durch die Rohsalzgewinnung geschaffenen Grubenhohlraum**
		[10^6 t]	**[10^6 t]**	**[10^6 t]**	**[10^6 t]**	**[%]**	**[%]**
URALKALI	Russland	44,71	0,58	7,81	8,39	18,8	24,6
PCS	Kanada	27,18	1,03	1,46	2,49	9,2	13,0
MOSAIC[171]	Kanada, USA	21,87	0,37	–	0,37	1,7	2,9
BELARUSKALI	Belarus	39,16	0,66	kein	0,66	1,7	2,6
K+S	Deutschland	43,57	5,54	1,72	7,26	16,7	23,5
ICL	Spanien, GB	5,49	0,09	0,25	0,34	6,2	7,5
AGRIUM	Kanada	5,59	0,09	kein	0,09	1,6	3,7

Der Versatz von über Tage anfallenden festen Aufbereitungsrückständen durch Rückführung nach unter Tage und Verbringen in die Abbauhohlräume wird hingegen weit seltener, weltweit in nur 8 Kalisalzbergwerken betrieben. Der Versatz von festen Aufbereitungsrückständen erfüllt derzeit in nur zwei – sehr spezifischen – Anwendungsfällen, dem Kalibergwerk Bouly, CPL und dem Kalibergwerk Unterbreizbach des Verbundwerkes Werra von K+S vordergründig die Zielstellung einer Beseitigung, worauf im Folgenden noch näher eingegangen wird. Aber selbst in diesen Fällen erfüllt der Versatz nach seinem Einbringen eine stabilisierende Wirkung, indem seine physikalischen Eigenschaften ausgenutzt werden. Diese Dualität von Abfallverwertung und Abfallbeseitigung kennzeichnet jedes Versatzeinbringen, weshalb hier beide Teile des aus dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG 2012, /568/) entlehnten Begriffes der Entsorgung erfüllt sind. Daher wird im Rahmen dieser Studie im Zusammenhang mit dem Versatz von Gewinnungs- und Aufbereitungsrückständen gewöhnlich auch der Begriff der Entsorgung genutzt, kann das Versatzeinbringen also nicht einseitig auf den Aspekt der Abfallbeseitigung reduziert werden.

170 Summe der gewonnenen Kalirohsalze einschließlich Verdünnung und Steinsalz aus Auffahrungen zur Aus- und Vorrichtung der Lagerstätte sowie zur Durchörterung von Vertaubungszonen (Sofortversatz)

171 Summe aus Sofortversatz aus Steinsalzauffahrungen und Versatz von festen Aufbereitungsrückständen

172 prozentualer Anteil der unter Tage versetzten Gesamttonnage bezogen auf gesamte Gewinnungstonnage

173 Die Menge des Versatzes aus Aufbereitungsrückständen konnte nicht recherchiert werden.

In allen anderen Anwendungsfällen ist der Versatz stets der geomechanischen Stabilisierung der Kammerpfeilersysteme und der Minimierung der Senkungen über Tage gewidmet und aus diesen Gründen auch bergbehördlich angewiesen, beziehungsweise in einem weiteren sehr spezifischen Anwendungsfall daneben auch verfahrenstechnisch notwendig, um ein für die dort herrschenden lagerstättengeologischen Verhältnisse optimiertes Abbauverfahren zu nutzen. Letzteres betrifft das bereits erwähnte Kaliwerk New Brunswick, Kanada, von PCS, dessen Entsorgungspraxis in Box 7.1 bereits ausführlich abgehandelt wurde.

Besonders beim Versatz von Aufbereitungsrückständen, letztlich aber theoretisch ebenfalls für den Sofortversatz von Gewinnungsrückständen, lassen sich die Methoden und Verfahren nach der Art des Transportes und des Einbringens des Versatzgutes in 2 Hauptgruppen unterscheiden:

- Einbringen von trockenem oder fabrikfeuchtem[174] Versatzgut, das mechanisch oder pneumatisch an den Versatzort transportiert wird. Diese Methoden und Verfahren werden oft als sogenannte Trockenversatzverfahren zusammengefasst und im Abschnitt 8.1.1.1 näher erläutert.
- Einbringen von feuchtem Versatzgut als Suspension, das mit Hilfe von Trägerflüssigkeiten hydraulisch an den Versatzort transportiert wird. Diese Methoden und Verfahren werden oft als sogenannte hydraulische Versatzverfahren zusammengefasst und in Abschnitt 8.1.1.2 näher erläutert.

Historisch war das Einbringen von festen Aufbereitungsrückständen als Versatz in die untertägigen Abbauhohlräume zumindest in Deutschland ein über Jahrzehnte erfolgreich praktiziertes Verfahren, worüber bereits im Abschnitt 5.1 ausführlicher berichtet wurde. Besondere Bedeutung kam und kommt dabei stets dem Spülversatzverfahren zu, das – aus dem oberschlesischen Steinkohlebergbau entlehnt – bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts auf die Besonderheiten des Kalibergbaus adaptiert wurde. In den 1950er und 1960er Jahren erreichte das Versatzeinbringen in Deutschland, insbesondere aber in dem für das Spülversatzverfahren aufgrund der lagerstättengeologischen und der seinerzeit herrschenden bergtechnischen Randbedingungen prädestinierten Südharz-Kalirevier einen gewissen Höhepunkt. Der vor Einführung der Bergbaugroßgeräte dort betriebene Langkammerabbau mit Schrapperförderung war durchaus in der Lage, einen räumlichen Abbauzuschnitt und eine zeitliche Abbaufolge zu ermöglichen, die einen sicheren Spülversatzbetrieb gewährleisteten. In diesem Zeitraum wurden im Südharz-Kalirevier mit insgesamt 10 Spülversatzanlagen jährlich zwischen etwa 60 und 80 Prozent des insgesamt angefallenen festen Rückstandes als Spülversatz in die Langkammerabbaue verspült. Mit der Einführung der Großgerätetechnik und dem dadurch erforderlichen Wechsel zum Kammerpfeilerabbau mit quadratischen Pfeilern war dies ab Ende der 1960er Jahre auch dort nicht mehr gegeben, so dass nahezu alle Versatzanlagen stillgelegt wurden oder aber doch mindestens in ihren Leistungen bei weitem nicht mehr in der Lage waren, den größten Teil der Aufbereitungsrückstände nach unter Tage einzubringen (Michalzik 2001, /649/). Die Einführung der Bergbaugroßgeräte folgte dem allgemeinen Trend in der Bergbauindustrie, der durch die Fortschritte in der Maschinentechnik möglich wurde und zu wesentlich höheren Gewinnungsleistungen führte. Spätestens in den 1960er Jahren verkörperte die Großgerätetechnik den allgemeinen Stand der Technik im Untertagebergbau. Diese seinerzeit fortschrittlichste Maschinentechnik brachte neben der für die Bergbautreibenden aus Gründen der Wettbewerbsfähigkeit wesentlichen Leistungssteigerung auch Vorteile für die Arbeitssicherheit und insbesondere die Verminderung des körperlichen Anteils der individuellen Arbeitsleistung der Beschäftigten unter Tage. Diese neue Maschinentechnik hatte aber auch den Verzicht auf den vormaligen Langkammerabbau und das eigens dafür konzipierte Spülversatzverfahren zur Folge. Für einen Spülversatzbetrieb in einem für den Kammerpfeilerabbau mit quadratischen Pfeilern ausgelegten Grubenzuschnitt resultierten gravierende Probleme für die Arbeitsabfolge sowie für die Arbeits- beziehungsweise Bergbausicherheit und nicht zuletzt auch für die Gewinnungsleistung (Fulda 1964, /297/; 1986, /299/; Fulda, Gruchot & Michalzik 1966, /301/; Duchrow & Schilder 1985, /213/; Duchrow 1990, /212/; Michalzik 2001, /649/).

Wegen der positiven gebirgsmechanischen Wirkung insbesondere des Spülversatzes ist es nicht verwunderlich, dass es bereits seit etwa 1912 auch Bestrebungen gab, die gebirgsmechanisch sehr positiven Erfahrungen bei der Anwendung des Spülversatzverfahrens auch in der Flachen Lagerung zur Senkung der Abbauverluste durch Verringerung der Pfeilerbreiten und/oder durch Pfeilerrückgewinnung anzuwenden (Gimm 1961, /330/; Höfer, Fulda & Seidl 1967, /403/; Miller 1983, /656/; Fulda, Jäger & Kutscha 1988, /303/; Roulston 1995, /852/; Rauche & Mierdel 2000, /806/; Michalzik 2001, /649/; Rauche, Fulda & Schwalm 2001, /813/; Rauche 2002b, /797/; Schilder 2003, /880/). In den Ausführungen zur historischen Entwicklung der Abbauverfahren, die im Abschnitt 5.1 gegeben werden. Im Abschnitt 5.1.1 wurden die dabei auftretenden Schwierigkeiten und die bis heute ungelösten Probleme bereits diskutiert (Fulda 1963, /296/; Michalzik 1966, /648/; Jendersie 1969, /454/; Lindloff & Klemmer 1999, /596/; Bartke 2008, /62/; Votjakov 2008, /1083/; Martens 2009, /621/).

174 Streng genommen sind auch diese Rückstände in der Regel feucht, enthalten jedoch mit 5 bis 10 % Restfeuchte wesentlich geringere Lösungsanteile als Spül- beziehungsweise Dickstoffversatzgemische (▸Abschnitt 8.1.1.2).

Der Versatz von Aufbereitungsrückständen erfüllt stets eine wichtige Funktion im Hinblick auf die nachhaltige Lagerstättennutzung, da auf diese Weise eine Verringerung der Abbauverluste möglich wird, ohne dass es zu einer Verminderung der Standsicherheit der Tragelemente kommt, die Bergbausicherheit also auf gleichem oder auf höherem Sicherheitsniveau gewährleistet wird. Darüber hinaus kommt es durch das Versatzeinbringen auch zur Verminderung der Verformungseinwirkungen auf die hydrogeologische(n) Schutzschicht(en) und zur Reduzierung der Senkungen an der Tagesoberfläche über den Grubenfeldern. Beides sind erwünschte Beiträge zur Bergbau- beziehungsweise zur öffentlichen Sicherheit und zur Minimierung der Umweltauswirkungen.

In aktiven Gewinnungsbergwerken wird beim Versatz von Aufbereitungsrückständen vor allem das Spülversatzverfahren angewendet, so an der Oberen Kama in Russland und auch – wie oben bereits beschrieben – im Carnallititkuppenabbau des Kalibergwerkes Unterbreizbach im deutschen Werra-Kalirevier. Trockenversatzverfahren finden in aktiven Bergwerken in der Steilen Lagerung in Kalibergwerk Sigmundshall, Deutschland, und im Kalibergwerk New Brunswick, Kanada, Anwendung. Im Kaliwerk Esterhazy K1/K2 in Saskatchewan, Kanada, wird durch den Betreiber MOSAIC sporadisch Spülversatz zur Stabilisierung von alten Feldesteilen im Umfeld von Salzlösungszuflüssen eingesetzt. Also auch dieser – gemessen an der Gesamtproduktion – sehr kleine Anwendungsfall von Versatz im kanadischen Kalibergbau resultiert allein aus geomechanischen Motiven. Die verfahrenstechnisch begründete Motivation für die Entsorgung der festen Rückstände aus der Kali- und Steinsalzaufbereitung im Kaliwerk New Brunswick als Trocken- und Spülversatz und deren Bedeutung für das an diesem Standort praktizierte Rückstandsmanagement wurde in Box 7.1 behandelt. Die Abbildung 70 verdeutlicht in einem Vertikalschnitt, wie dieses Einbringen von trockenem Versatzgut letztlich zur verfahrenstechnischen Voraussetzung für den Firstenstoßbau wird.

In der Steilen Lagerung kommt dem Versatz gleichfalls Bedeutung für die Verminderung der Abbauverluste zu. Für die hier anzutreffenden lagerstättengeologischen Randbedingungen wurden Abbauverfahren derart optimiert, dass erst das Versatzeinbringen in die Abbauhohlräume die geomechanische Standsicherheit und/oder die Effektivität der Gewinnungsmethode und -verfahren gewährleistet. In beiden heute in Steiler Lagerung bauenden Bergwerken, dem Kalibergwerk Sigmundshall und dem Kaliwerk New Brunswick werden solche Versatzverfahren genutzt.

Versatz wird von den Bergwerksbetreibern nur an einzelnen Standorten und dort meist auch nur in ausgewählten Feldesteilen betrieben, wo sie zur Gewährleistung der Arbeits- und Bergbausicherheit im weitesten Sinne aufgrund bergbehördlich verordneter Versatzpflichten dazu angehalten sind oder aber verfahrenstechnische Notwendigkeiten für das Versatzeinbringen bestehen. In keinem Falle ist die Versatzpflicht durch die Motivation zur Reduzierung von über Tage aufgehaldeten Aufbereitungsrückständen begründet, wenngleich diese mit dem Einbringen von Versatz verbundene Tatsache selbstverständlich willkommen ist.

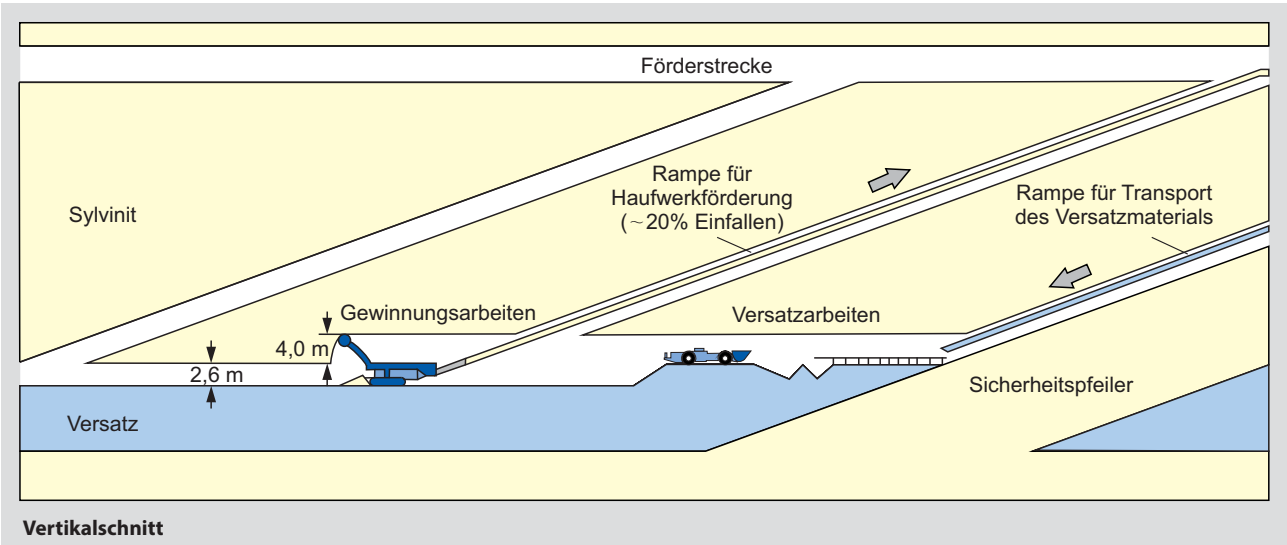


Abbildung 70 Firstenstoßbau mit Trockenversatz in der Steilen Lagerung im Bergwerk Penobsquis des Kaliwerkes New Brunswick, Kanada [nach Roberts 2001, /843/, modifiziert]

Nur in einem einzigen (Sonder-)Fall wird im Kaliwerk Unterbreizbach des Verbundwerkes Werra in Thüringen, Deutschland, unter den sehr spezifischen lagerstättengeologischen Randbedingungen des Carnallititkuppenabbaues durch K+S die Gesamtmenge der in der angeschlossenen Aufbereitungsanlage anfallenden Aufbereitungsrückstände durch Versatz unter Tage beseitigt, ohne dass hier eine aufgrund von Standsicherheitseinschränkungen bergbehördlich verordnete Versatzpflicht besteht.

An der Oberen Kama, Region Perm, Russland, mussten wegen entsprechender Schadensereignisse und mit einer ähnlichen geomechanischen Motivation wie im Werra-Kalirevier durch die zuständigen Bergbehörden für einzelne Kalibergwerke, in den Jahren 1986 im Bergwerk Berezniki 1 beziehungsweise 1995 im Bergwerk Solikamsk 2, umfangreiche Versatzmaßnahmen zur nachträglichen Sicherung von Abbauhohlräumen unter den Stadtgebieten verfügt werden. Ziel war es hier, eine Verringerung des offenen, reaktiven Abbauhohlraumes und der daraus resultierenden großen übertägigen Senkungen, besonders in den bebauten Arealen der Städte Berezniki und Solikamsk, zu erreichen. Auch hier wurde und wird das Spülversatzverfahren in seiner klassischen Weise angewendet und werden die umfangreichen Erfahrungen aus dem mitteldeutschen Kalibergbau in die Planungen einbezogen. Anders als bei den vergleichbaren Sicherungsmaßnahmen im Südharz-Kalirevier und im Bergwerk Merkers im Werra-Kalirevier wurden diese Versatzarbeiten in den Bergwerken an der Oberen Kama aber parallel zum laufenden Gewinnungsbetrieb durchgeführt.

Die Versatzarbeiten in stillgelegten beziehungsweise in Verwahrung befindlichen Kalibergwerken dienen grundsätzlich dem Zweck der Stabilisierung von unterdimensionierten Abbausystemen und sind deshalb nicht direkt vergleichbar mit dem Versatz in aktiven Gewinnungsbergwerken. Ein wichtiger Unterschied besteht darin, dass anders als in einem aktiven Kaliwerk hier keine aus der laufenden Kalidüngemittelproduktion anfallenden Aufbereitungsrückstände zur Verfügung stehen, das Versatzmaterial daher durch die kostenintensive Gewinnung in Bergemühlen[175] oder aber durch eine Verwertung von geeigneten industriellen Abfallstoffen bereitgestellt werden muss. In Deutschland werden diese Versatzmaßnahmen nicht selten als Untertageverwertung industrieller Abfälle (UTV) betrieben, wo die physikalischen Eigenschaften der Abfälle für die Erfüllung der Versatzaufgaben ausgenutzt werden. Solche UTV werden mit behördlich zugelassenen, speziell für diese Aufgabenstellungen geeigneten Abfallstoffen unter Anwendung eines modifizierten Spülversatzverfahrens in den ehemaligen Südharz-Kalibergwerken in Sondershausen durch die GSES GLÜCKAUF SONDERSHAUSEN ENTWICKLUNGS- UND SICHERUNGSGESELLSCHAFT MBH sowie in Bleicherode und in Sollstedt durch die NDH-E ENTSORGUNGSBETREIBERGESELLSCHAFT MBH, oder als Dickstoffversatzanlagen im Bergwerk Teutschenthal im Saale-Kalirevier durch die GTS GRUBE TEUTSCHENTHAL SICHERUNGS GMBH & CO. KG, sowie im Verbundwerk Werra von K+S betrieben.

In Tabelle 33 wurden die Gewinnung, Förderung und der Versatz sowie der prozentuale Anteil der Versatzmenge an der gewonnenen Rohsalzmenge für die wichtigsten Kalidüngemittelproduzenten der Welt gegenübergestellt. Mit etwa 19 Prozent der Rohsalztonnage realisiert URALKALI zur Zeit den höchsten Anteil an Versatz von Aufbereitungsrückständen, gefolgt von K+S mit einem prozentualen Anteil von etwa 17 Prozent.

Abgesehen von den lagerstättengeologischen und bergtechnischen Randbedingungen, die maßgeblich über eine technische Machbarkeit des Versatzes von Aufbereitungsrückständen in die Abbauhohlräume entscheiden, müssen selbstverständlich auch wirtschaftliche Aspekte in die ganzheitliche Wertung der Machbarkeit einfließen. Hier wird von den Bergwerksbetreibern vor allem auf die zum Teil erheblichen betriebswirtschaftlichen Auswirkungen des Versatzeinbringens verwiesen. Auch die Erfahrungstatsachen aus dem langjährigen Routinebetrieb der Spülversatzanlagen auf den Bergwerken im Südharz-Kalirevier belegen die mit den Versatzarbeiten verbundenen hohen Aufwendungen, die sich in den Bilanzen vor allem durch höhere Energie- und Personalkosten ausweisen. So verwundert es daher auch nicht, dass bei allen in jüngster Zeit geplanten *greenfield* Projekten zur Bergmännischen Gewinnung der Versatz der bei der Aufbereitung der festen Rohsalze unvermeidbar anfallenden festen Rückstände zwar stets mit untersucht wurde, in den seltensten Fällen jedoch Bestandteil der wirtschaftlich machbaren Option ist.

Im Einzelnen werden die Betriebskosten für das Versatzeinbringen jedoch sehr stark von den für einen konkreten Standort geltenden Randbedingungen bestimmt und variieren daher zum Teil auch erheblich. In der bereits zitierten Studie von SYMONDS (2001, /996/) zur Praxis der Beseitigung von bergbaulichen Abfällen in den Mitgliedsstaaten der EU wurde schon darauf verwiesen, dass die Möglichkeit einer Entsorgung von Aufbereitungsrückständen als Versatz unter Tage nicht nur von der jeweiligen technischen Realisierbarkeit, sondern auch von der wirtschaftlichen Machbarkeit abhängt.

175 Der bergmännische Begriff Bergemühle bezeichnet einen speziell angelegten Grubenhohlraum zum Zwecke der Gewinnung von Bergen, das heißt wertstofffreien/-armen Materials, für Versatzzwecke. Der bergmännische Begriff Berge bezeichnet das in der Regel bei der Gewinnung anfallende, unter bestimmten Umständen auch gezielt abgebaute wertstofffreie oder -arme Gestein, das für die Erzeugung von verkaufsfähigen Produkten nicht nutzbar ist.

Während in diesem Abschnitt bereits vorab eine Würdigung der lagerstättengeologischen und bergtechnischen Randbedingungen für die Möglichkeit eines Versatzbetriebes an einem konkreten Standort erfolgt ist, soll nunmehr auch die wirtschaftliche Zumutbarkeit anhand weniger, aber konkreter Zahlen zu den Betriebskosten für das Versatzeinbringen dargestellt werden. Da es kaum veröffentlichte Wirtschaftsdaten zu den Versatzbetrieben gibt, wurden auch hier eigene Abschätzungen für charakteristische Modellfälle angestellt. Grundlage der Abschätzung dieser spezifischen Betriebskosten bildeten die bereits jüngst im Zusammenhang mit der Entsorgungspraxis deutscher Kalisalzbergwerke vorgelegten Kostenschätzungen von ERCOSPLAN (2007a, /241/) und Martens (2009, /621/), die jedoch auf das Preisniveau von 2014 aktualisiert wurden. Tabelle 34 gibt für unterschiedliche Lagerungsformen und die dadurch bestimmten Grubenzuschnitte sowie bergtechnischen Verfahren Auskunft über die Betriebskosten für das Einbringen einer Tonne Versatzmaterial. Demnach variieren die Betriebskosten zwischen 5 und 46 Euro pro Tonne eingebrachten Versatz.

Tabelle 34 Betriebskosten für das Einbringen einer Tonne Versatz mit unterschiedlichen Verfahren unter verschiedenen lagerstättengeologischen und damit auch bergtechnischen Randbedingungen

Versatzverfahren	Betriebskosten [EUR/$t_{Versatz}$]	Quellen
Flache Lagerung mit geringen Abbaumächtigkeiten <3 m		
Sofortversatz von Gewinnungsrückständen	15 – 18	ERCOSPLAN 2015, /255/
Trockenversatz von festen Aufbereitungsrückständen	20 – 25	ERCOSPLAN 2007a, /241/
Spülversatz von festen Aufbereitungsrückständen	10 – 15	
Flache Lagerung mit geringen Abbaumächtigkeiten >5 m		
Sofortversatz von Gewinnungsrückständen	8 – 13	ERCOSPLAN 2015, /255/
Trockenversatz von festen Aufbereitungsrückständen	11 – 17	ERCOSPLAN 2007a, /241/
Spülversatz von festen Aufbereitungsrückständen	7 – 12	
Entwässerter Spülversatz von festen Aufbereitungsrückständen	9 – 15	ERCOSPLAN 2015, /255/
Pneumatischer Versatz	30 – 45	
Dickstoffversatz mit 10% Portlandzement	20 – 24	MARTENS 2009, /621/
Dickstoffversatz mit 6% – 11% MgO	38 – 46	
Flache Lagerung mit großen Abbaumächtigkeiten >25 m		
Spülversatz von festen Aufbereitungsrückständen im Kuppenabbau	5 – 8	ERCOSPLAN 2015, /255/

Unter allen möglichen Arten des Einbringens der Rückstände stellt das Spülversatzverfahren hinsichtlich der Betriebskosten das kostengünstigste Verfahren für alle untersuchten Modellfälle dar. Werden aber zu den Betriebskosten zusätzlich die theoretisch erreichbaren Versatzmengen für unterschiedliche Abbauhöhen und Versatzverfahren in die Bewertung einbezogen (ERCOSPLAN 2007a, /241/), ist die Wirtschaftlichkeit der Anwendung des Spülversatzes in Grubenbauen mit geringen Abbauhöhen beim Kammerpfeilerabbau mit quadratischen Pfeilern unter der Berücksichtigung des derzeitigen Preisniveaus für Kalidüngemittelprodukte nicht gegeben. Lediglich der Spülversatzbetrieb in den Systemkuppenhohlräumen im Kalibergwerk Unterbreizbach, wo die Abbauhöhen über 25 Meter liegen, kann als effiziente und auch wirtschaftlich machbare Option für die Beseitigung der festen Aufbereitungsrückstände angesehen werden.

In den folgenden Abschnitten sollen die Versatzverfahren anhand ausgewählter Fallbeispiele vorgestellt werden, wobei der Schwerpunkt auf solchen Beispielen liegen soll, die bei der aktiven Gewinnung von Kalirohsalzen Anwendung finden.

8.1.1.1 Verfahren zum Transport und zum Einbringen trockenen Versatzgutes

Bei diesem sogenannten Trockenversatzverfahren wird trockenes oder auch fabrikfeuchtes Versatzgut auf mechanische oder pneumatische Weise in die Abbauhohlräume oder Strecken eingebracht. Der Transport des Versatzgutes vom Entstehungsort, im Falle des Sofortversatzes oder auch des sogenannten Bergemühlenversatzes also vom Streckenvortrieb, im Falle von Aufbereitungsrückständen, also von der Aufbereitungsanlage unter oder über Tage, hin zum Versatzort erfolgt mit Hilfe von Ladetransportfahrzeugen oder Förderbändern und Rohrleitungen. Hinsichtlich der Verfahrensweise des mechanischen Einbringens des Versatzgutes in die Abbaukammern sind je nach örtlichen Gegebenheiten und dem Entwicklungsstand der Maschinentechnik historisch unterschiedlichste Varianten etabliert worden, die aber letztlich dem Prinzip der Abbildung 71 folgen. Bei ausreichender Kammerhöhe wird das eingebrachte Versatzgut anschließend einplaniert und durch Überfahren mit dem LTF verdichtet. Auf dieser unteren Lage Versatzgut wird, wenn möglich, eine weitere Lage eingebracht. Bei geringen Abbauhöhen von weniger als 3 Meter werden die Abbaue in einer Lage versetzt. Für den Fall, dass aus gebirgsmechanischen Gründen eine Erhöhung des Verfüllgrades angezeigt ist, wird der obere Firstbereich unter Verwendung eines Schiebeschildes aufgefüllt[176], welches an einer Beraubefahrzeug montiert ist. Die Einbringdichte liegt bei weniger als 1,6 Tonnen pro Kubikmeter und der Verfüllungsgrad bei maximal 60 Prozent (AKV 1998, /17/). Diese Verfahrensweise hat sich insbesondere bei der nachträglichen Sicherung und Stabilisierung geomechanisch sensibler Baufelder im Zuge der Verwahrung stillgelegter Bergwerke, so zum Beispiel im Südharz-Kalirevier in den Kalibergwerken Sondershausen, Sollstedt, Bischofferode und im Werra-Kalirevier im Kalibergwerk Merkers bewährt. In der Flachen Lagerung mit Kammerhöhen größer als 5 Meter lassen sich mit diesem Versatzverfahren relativ hohe Verfüllgrade von 75 bis 80 Prozent mit einer durchschnittlichen Versatzdichte von 1,6 bis 1,7 Tonnen pro Kubikmeter erreichen. In der Praxis werden diese Werte sowohl über- als auch unterschritten. Zur Verbesserung der Versatzdichte wird mitunter auch eine nachträgliche Befeuchtung des Versatzgutes durchgeführt.

Diese, an den einzelnen Standorten vielmals entsprechend der vorherrschenden Randbedingungen leicht modifizierte Verfahrensweise findet überall dort Anwendung, wo Sofortversatz betrieben wird und darüber hinaus auch in den folgenden Bergwerken, wo auf diese Art auch nennenswerte Mengen von Aufbereitungsrückständen entsorgt werden:

Im Kalibergwerk Sigmundshall, Deutschland, von K+S erfolgt die Gewinnung von Kalirohsalzen in der Steilen Lagerung im Weitungsbau mit nachfolgendem Versatzeinbringen (▸ Abbildung 41 in Kapitel 5.1.1.3). Als Versatz werden die über Tage anfallenden Rückstände aus der Aufbereitungsanlage beziehungsweise das aus der Aus- und Vorrichtung anfallende Steinsalz (Sofortversatz) genutzt. Die als Versatzmaterial genutzten Aufbereitungsrückstände fallen zum einen in der Heißverlösung und zum anderen in der Flotation an. Diese überwiegend halitischen Rückstände werden über Bandanlagen auf einem Kettenkratzförderer zu einer Schwingrinne und anschließend mittels Versatztrichter in die Schachtfallleitungen eingebracht und nach unter Tage transportiert. Mit einer Fallleitung sind maximale Förderströme von etwa 250 Tonnen pro Stunde möglich. Unter Tage werden die Rückstände in einem Behälter mit Pralltöpfen am Ende der Rohrleitung aufgefangen, danach mittels einer Austragsschurre auf eine Bandanlage aufgegeben und zu einem Versatzbunker transportiert. Anschließend erfolgt der Weitertransport des Versatzes zu den einzelnen Abbauen. Die ausgesalzenen Abbaue werden über eine darüber liegende Versatzstrecke von oben aus versetzt. Allein im Jahr 2014 wurden auf diese Weise mehr als 600.000 Tonnen Versatz eingebracht, wobei 56 Prozent von dieser Menge zurück nach unter Tage verbrachte Aufbereitungsrückstände gewesen sind.

176 Erfolgt nur bei der Notwendigkeit des Einbringens von Vollversatz (Verfüllgrad von 100 % wird angestrebt).

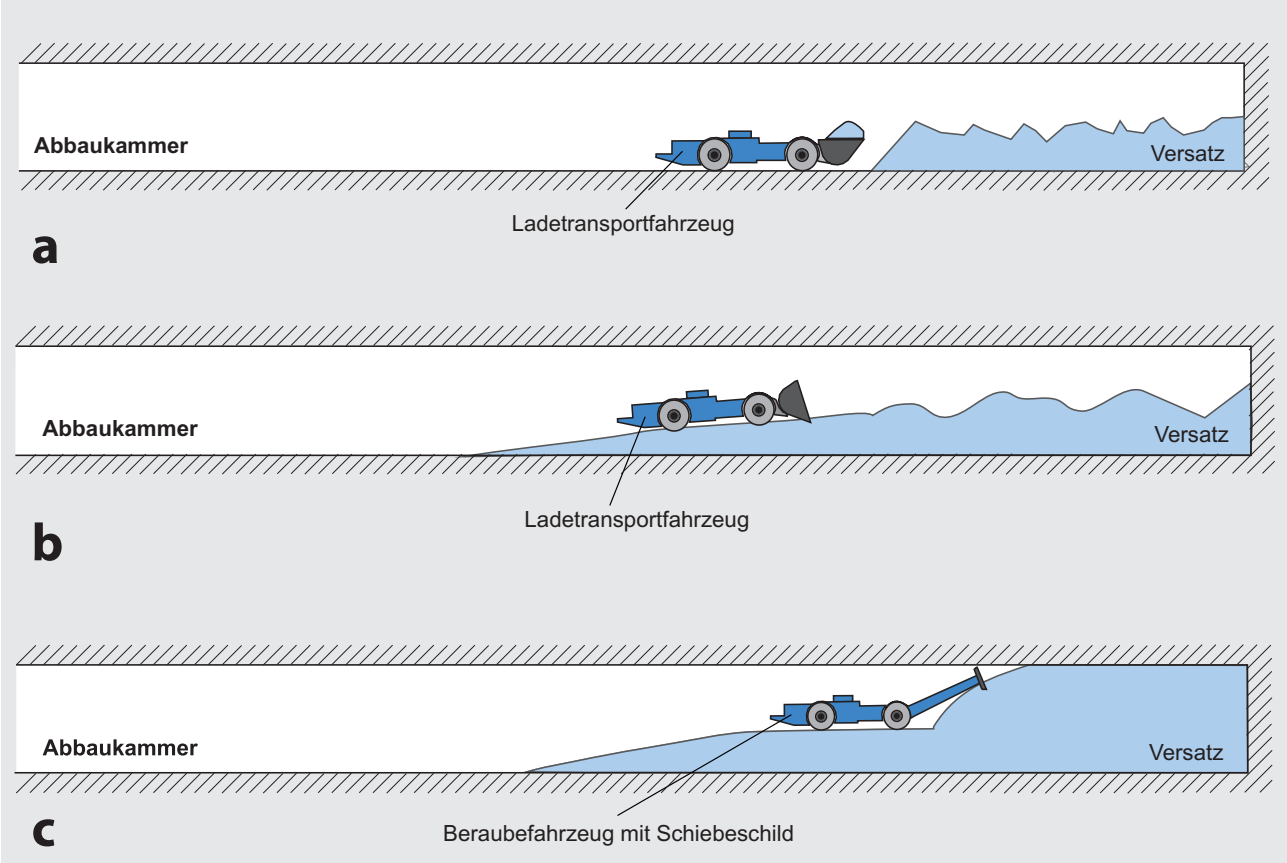


Abbildung 71 Einbringen von Trockenversatz; a – Einbau der unteren Lage Versatzgut in den Versatzhohlraum mittels Ladetransportfahrzeug; b – Planieren der unteren Lage Versatzgut und Verdichtung mittels Ladetransportfahrzeug; c – Zuschieben mit einem Beraubefahrzeug der oberen Bereiche des Versatzhohlraumes mit Schiebeschild

Im langjährigen Mittel seit den 1970er Jahren wurden im Bergwerk Sigmundshall mehr als 53 Prozent der insgesamt bei der Aufbereitung der Kalirohsalze unvermeidbar anfallenden festen Rückstände als Versatz nach unter Tage zurückgeführt, also weniger als die Hälfte aufgehaldet (ERCOSPLAN 2015, /255/).

Im Kalibergwerk Zielitz, Deutschland, von K+S wird eine ähnliche Verfahrensweise angewandt. Im Jahre 2009 wurde eine ESTA®-Anlage unter Tage zur Optimierung des Wertstoffdurchsatzes im Förderschacht errichtet. Die Anlage wird derzeit versuchsweise betrieben (K+S 2012i, /485/). Die Rückstände werden anschließend in nahe gelegene Grubenhohlräume versetzt.

Neben dem Weitungsbau mit Trockenversatz im deutschen Kalibergwerk Sigmundshall wird derzeit auch im kanadischen Kaliwerk New Brunswick ein modifizierter Firstenstoßbau mit Trockenversatz zur Gewinnung fester Kalirohsalze betrieben. Zusätzlich zur bergbausicherheitlichen Motivation für das Versatzeinbringen werden damit auch die über Tage zu entsorgenden Rückstandsmengen reduziert. Auf diese Dualität des Versatzeinbringens wird auch in den aktuellen Öffentlichen Diskussionen vielfach Bezug genommen. Im Falle des Kalibergwerkes Penobsquis, dessen Versatzregime bereits im Kontext der dort praktizierten Rückstandsentsorgung (▸ Box 7.1) behandelt wurde, erfüllt der in die Kaliabbaue eingebrachte, aus der Kali- und Steinsalzaufbereitung entstammende Trockenversatz eine ganz wesentliche verfahrenstechnische Aufgabe: In dieser speziell für die lagerstättengeologischen Randbedingungen des Kalibergwerkes Penobsquis entwickelten, sogenannten *cut and fill*-Methode[177] erfolgt der Abbau von einer tieferen Abbaugrundstrecke entgegen dem Einfallen nach oben (Roulston 1995, /852/; Webb 2010, /1102/).

177 Der Begriff *cut and fill* bezeichnet die Gewinnungsmethode des Schneidens und quasi zeitgleichen Auffüllens, also des der Schneidenden Gewinnung ohne größeren Zeitverzug in der gleichen Abbaukammer folgenden Versatzeinbringens, wie sie eigens für die im Kalibergwerk Penobsquis von der Natur vorgegebenen lagerstättengeologischen Randbedingungen entwickelt wurde und auch nur an dieser Lokation Anwendung findet.

Abgebaut wird ein mit durchschnittlich 38 Prozent KCl[148] sehr hochwertiges sylvinitisches Rohsalz mittels Schneidender Gewinnung. Erst dieses verfahrenstechnisch vom Versatz bestimmte Abbauverfahren ermöglicht es, die Abbauverluste derart zu minimieren, dass eine nachhaltige Nutzung dieser ausgesprochen hochwertigen Sylvinitlagerstätte gegeben ist. Das Versatzeinbringen folgt der Schneidenden Gewinnung mit einer nur geringen zeitlichen Verzögerung. Nachdem eine Schnitthöhe von etwa 7 Meter auf der gesamten Abbaulänge, die bis zu 900 Meter betragen kann, realisiert ist, ändert die Gewinnungsmaschine ihre Vortriebsrichtung um 180°, fährt über eine aus eingebrachtem Trockenversatz aufgeschüttete Rampe und schneidet die nächste Abbauscheibe in entgegensetzter Richtung. Ähnlich wie im Falle des früher in den Südharz-Kalibergwerken in der Flachen Lagerung praktizierten Langkammerabbaus mit Schrapperförderung sind auch im Kalibergwerk Penobsquis der gesamte Grubenzuschnitt und die Abbaumethode selbst auf das Versatzeinbringen ausgerichtet. Die aus der Aufbereitungsanlage anfallenden trockenen halitischen Aufbereitungsrückstände werden über eine Bandanlage zum Schacht und anschließend mittels Schachtfallleitung nach unter Tage transportiert. Unter Tage werden die Rückstände per Förderband über Versatzrampen in die Abbaue transportiert und dort verkippt. Anschließend wird der Trockenversatz einplaniert und mit entsprechender Technik verdichtet.

In den Kalibergwerken Berezniki 1, Solikamsk 1, 2 und 3 an der Oberen Kama, Russland, wurde beziehungsweise wird von URALKALI neben der Gewinnung der unteren sylvinitischen Kalilager AB und Krasnyj II auch das obere carnallitische Kalilager W abgebaut. Die im Lager W geschaffenen Abbaukammern müssen entsprechend den bergbehördlichen Verordnungen aus Standsicherheitsgründen binnen 2 Jahren nach dem Abschluss ihrer Auffahrung versetzt werden, was durch mechanisches Einbringen von festen Aufbereitungsrückständen oder auch durch Sofortversatz von Steinsalzhaufwerk aus der Aus- und Vorrichtung erfolgt. Der Abtransport zum Versatzort und das Einbringen erfolgt mittels Bunkerpendelwagen (▸ Abbildung 72). Auf diese Weise werden die Abbaukammern in mehreren Lagen bis auf einen verbleibenden Firstspalt versetzt (Borsakovskij 1980, /118/; 2001, /119/; Savich 1983, /874/).

Beim pneumatischen Versatzverfahren wird das Versatzgut unter einem bestimmten Luftdruck in einer geschlossenen Rohrleitung von über Tage nach unter Tage in die betreffenden Versatzhohlräume transportiert. Im ehemaligen Forschungsbergwerk Asse II, einem früheren Gewinnungsbergwerk für Stein- und Kalisalz, wurden in einem Zeitraum von 7 Jahren etwa 2,3 Millionen Tonnen Haldenmaterial von der Rückstandshalde des ehemaligen Kaliwerkes Ronnenberg als Versatz eingebracht:

Mittels einer pneumatischen Versatzanlage, deren wesentliches Element ein Verdichter der Firma INGERSOLL mit einer elektrischen Leistung von 1,2 Megawatt darstellte, erfolgte der Versatz der Abbaukammern (ERCOSPLAN 2015, /255/). Die maximale Transportleistung der Anlage lag bei 150 Tonnen pro Stunde, die maximale jährliche Versatzmenge bei maximal 400.000 Tonnen. Die Versatzleitung hatte eine Gesamtlänge von etwa 1,6 Kilometer, wobei die Länge der Schachtfallleitung etwa 500 Meter betrug. Aufgrund von Verstopfungen in der Schachtfallleitung (DN 200) wurde die Feuchte des Versatzmaterials von ursprünglich 3,5 Prozent auf weniger als 2,5 Prozent verringert. Die Körnung des Versatzhaufwerks lag zwischen 0,01 und 80 Millimeter (Kappei 2004, /500/). Wie in diesem Falle praktiziert, lassen sich in der Steilen Lagerung mit dem pneumatischen Versatz relativ hohe Verfüllungsgrade von 85 bis 90 Prozent mit einer durchschnittlichen Dichte von 1,5 Tonnen pro Kubikmeter erreichen (Reinshagen & Voss 1988, /827/). In der Flachen Lagerung wurde ein solches Versatzverfahren bisher nicht eingesetzt.

Dieses pneumatische Verfahren spielt im aktiven Kalibergbau zur Zeit keine Rolle.

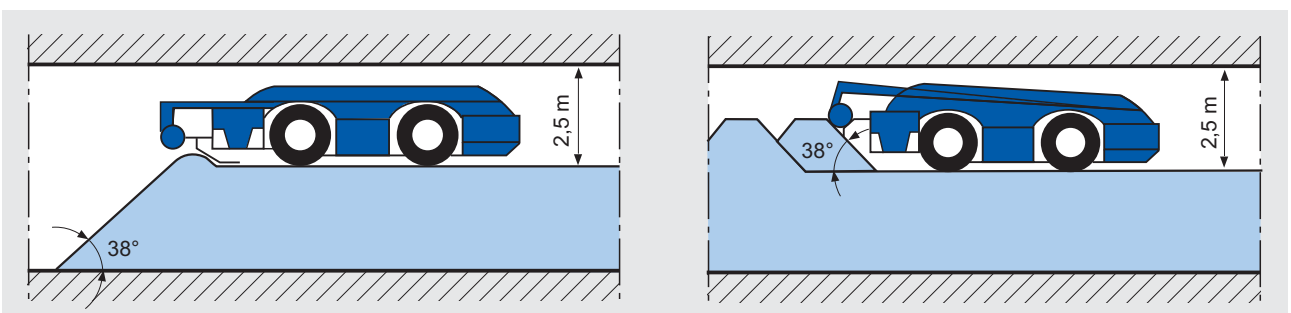


Abbildung 72 Einbringen des Trockenversatzes mittels Bunkerpendelwagen in den Kalibergwerken an der Oberen Kama, Russland
[nach Borsakovskij 2001, /119/, modifiziert]

Beim Schleuderversatz – der im aktiven Gewinnungsbergbau mengenmäßig kaum, jedoch bei der Untertageverwertung (UTV) von industriellen Abfällen eine große Rolle spielt – wird das Versatzgut ebenfalls durch eine Schachtfallleitung nach unter Tage transportiert und anschließend über Bandanlagen bis zum jeweiligen Versatzblock gefördert. Vor Ort wird das Versatzgut mittels eines mit einer hohen Umlaufgeschwindigkeit betriebenen Bandes in die Abbaukammern verschleudert. Mit diesem Verfahren lassen sich analog dem pneumatischen Versatz relativ hohe Verfüllgrade von 85 bis 90 Prozent mit einer durchschnittlichen Dichte von 1,5 Tonnen pro Kubikmeter erreichen (Rohlfing 1986, /849/). Das Schleuderversatzverfahren kommt überwiegend im Erzbergbau bei kleineren Versatzmengen zum Einsatz, da dort eine wirtschaftliche Gewinnung der Lagerstätten ohne Versatz in der Regel nicht möglich ist. Der Schleuderversatz wurde und wird in der deutschen Kali- und Steinsalzindustrie lediglich in der dort betriebenen Untertageverwertung industrieller Abfallstoffe für Versatzaufgaben zum Schließen der Spaltfuge zwischen *big bag* Gebinden und der Abbaufirste genutzt (▸ Abbildung 73).

Im Hinblick auf die Anwendung des Schleuderversatzverfahrens im aktiven Gewinnungsbergbau stellen die Kalibergwerke von BELARUSKALI eine gewisse Ausnahme dar: Wie im Kapitel 5 bereits ausführlich beschrieben, wird in den Kalibergwerken von BELARUSKALI überwiegend der Strebbruchbau angewandt. In den bauwürdigen sylvinitischen Kalilagern ist eine mehrere Dezimeter mächtige Steinsalzbank eingelagert. Ab einer Mächtigkeit von etwa 50 Zentimeter wird diese Steinsalzbank selektiv gewonnen und mittels einer Schleuder in den sogenannten "Alten Mann" versetzt (ERCOSPLAN 2015, /255/).



Abbildung 73 Versatzschleuder zur Verfüllung der Resthohlräume in der Untertageverwertung des Verbundwerkes Werra [Foto mit freundlicher Genehmigung von K+S KALI GmbH, Kassel, Deutschland]

8.1.1.2 Verfahren zum Transport und zum Einbringen von Versatz mit Hilfe von Trägerflüssigkeiten

Bei dem sogenannten hydraulischen Versatzverfahren werden die aus dem Aufbereitungsprozess feucht anfallenden festen Verarbeitungsrückstände oder aber auch andere Versatzmaterialien, wie zum Beispiel industrielle Abfallstoffe, mit einer Trägerflüssigkeit, in der Regel einem speziell konditionierten Teilstrom der flüssigen Aufbereitungsrückstände, zu einer Suspension angemischt und als solche über Rohrleitungssysteme unmittelbar zum Versatzort oder in dessen räumliche Nachbarschaft transportiert.

Der weitaus wichtigste Anwendungsfall dieser Verfahrensgruppe im Kalibergbau ist das klassische Spülversatzverfahren, wie es seit 1908 im deutschen Kalibergbau praktiziert wird und mittlerweile auch in anderen kaliproduzierenden Ländern Anwendung findet. Eine sehr spezifische Abwandlung dieser Methode, bei der das Versatzgut nach dem hydraulischen Transport und vor dem Einbringen in den zu versetzenden Abbauhohlraum aus geomechanischen Gründen zunächst zu entfeuchten ist, wurde in den vergangenen Jahren für einen besonderen Anwendungsfall im Werra-Kalirevier entwickelt und wird als sogenanntes Feuchtversatzverfahren bezeichnet. Das Feuchtversatzverfahren wurde bis Mitte 2012 im Kalibergwerk Unterbreizbach von K+S zum Einbringen von Versatz in einem nicht ausreichend standsicheren Feldesteil genutzt. Der Transport der Aufbereitungsrückstände bis in die Nachbarschaft des zu versetzenden Baufeldes erfolgte nach dem klassischen Spülversatzverfahren als Suspension. In einer sogenannten "Spülversatzentwässerungsstation" wurde dieser Suspension die Transportflüssigkeit, hier eine konzentrierte $MgCl_2$-Lösung, durch Zentrifugieren entzogen, so dass die den Aufbereitungsrückständen anhaftende Restfeuchte weniger als 4 Prozent erreichte. Der weitere Transport des feuchten Versatzgutes wurde mit Bandanlagen und LTF bis zu den einzelnen Abbaukammern realisiert. Dort wurde das Versatzgut in mehreren Lagen eingebaut und gleichzeitig durch Überfahren mit dem LTF verdichtet.

Auch der Dickstoff- oder Pumpversatz stellt eine Art des hydraulischen Versatzes dar, bei der das Versatzmaterial zur Herstellung der Transportfähigkeit mit einer Trägerlösung angemischt wird. Während beim Spülversatztransport das Volumenverhältnis von festem Versatzstoff zu Trägerflüssigkeit um 1:1 variiert, dominiert beim Dickstofftransport hingegen der Feststoff bei weitem über die fluide Phase. Daher muss beim Spülversatzverfahren der weitaus größte Teil der Transportlösung wieder gesammelt und zur weiteren Verwendung rückgeführt werden, wogegen beim Dickstoff die Lösungsanteile im Versatzmassiv verbleiben.

Beide, das Spülversatz- und das Dickstoffversatzverfahren, kommen in modifizierter Form auch bei der Verwertung bergbaufremder industrieller Abfälle für Versatzzwecke zum Einsatz.

Für die in diesem Abschnitt zur Rede stehende Entsorgung fester Aufbereitungsrückstände der Kalidüngemittelproduktion kommt allein dem Spülversatzverfahren eine herausragende Bedeutung zu, weshalb im Folgenden darauf näher eingegangen werden soll. Der bei der Kalidüngemittelproduktion unvermeidbar anfallende feste Rückstand wird von der Aufbereitungsanlage über Transportbänder in einen über Tage installierten Mischbehälter transportiert (▸ Abbildung 74). Hier erfolgt das Mischen des Rückstandes mit der Transportlösung, die einem hinsichtlich der Salzkonzentration speziell konditioniertem Teilstrom der flüssigen Aufbereitungsrückstände entspricht. Die Volumenanteile von Feststoff und Trägerflüssigkeit sind für jede einzelne Spülversatzanlage zu optimieren und werden insbesondere von der Korngrößenverteilung des Feststoffes bestimmt. Das Mischungsverhältnis wird automatisch überwacht und gesteuert. Über eine oder mehrere voneinander unabhängige Schachtfallleitungen wird die Spülversatzsuspension nach unter Tage transportiert und erreicht schließlich über dieses Rohrleitungssystem die zu verspülenden Abbaue.

Die Erfahrungen beim Betrieb derartig einfach aufgebauter Spülversatzanlagen zeigen, dass im routinemäßigen Betrieb mit einer vertikalen Höhendifferenz von etwa 500 Meter ein horizontaler Transport über mehrere Kilometer möglich ist, ohne dass es Zwischenpumpstationen bedarf. Die im Rohrleitungssystem erzeugte laminare Strömung verhindert eine Entmischung des Versatzgutes sowie eine gravitative Sortierung der Feststoffe, so dass eine gleichbleibende Qualität der Versatzstoffe während des Spülvorganges erreicht wird. Das Einbringen der Versatzstoffe erfolgt bei geneigten Grubenbauen in der Einfallsrichtung. Bei söhligen Abbauen erfolgt vor Beginn des Verspülens eine Abriegelung der Abbaue durch temporäre Dammbauwerke. Das für fluide Phasen durchlässige Dammbauwerk verhindert einen Austritt der Feststoffe und ermöglicht das Abfließen der Transportlösung in vorbereitete Sammelbecken. Diese Verfahrensweise ermöglicht eine besonders effektive und rasche Entwässerung des Versatzmassives.

Die Verfestigung des Versatzgutes erfolgt zunächst durch eine gravitative Trennung der Feststoffe von der Transportlösung. Nach Unterschreitung der für einen Transport notwendigen Strömungsgeschwindigkeit sinken die Feststoffe ab. Eine Sortierung erfolgt dabei lediglich in horizontaler Richtung.

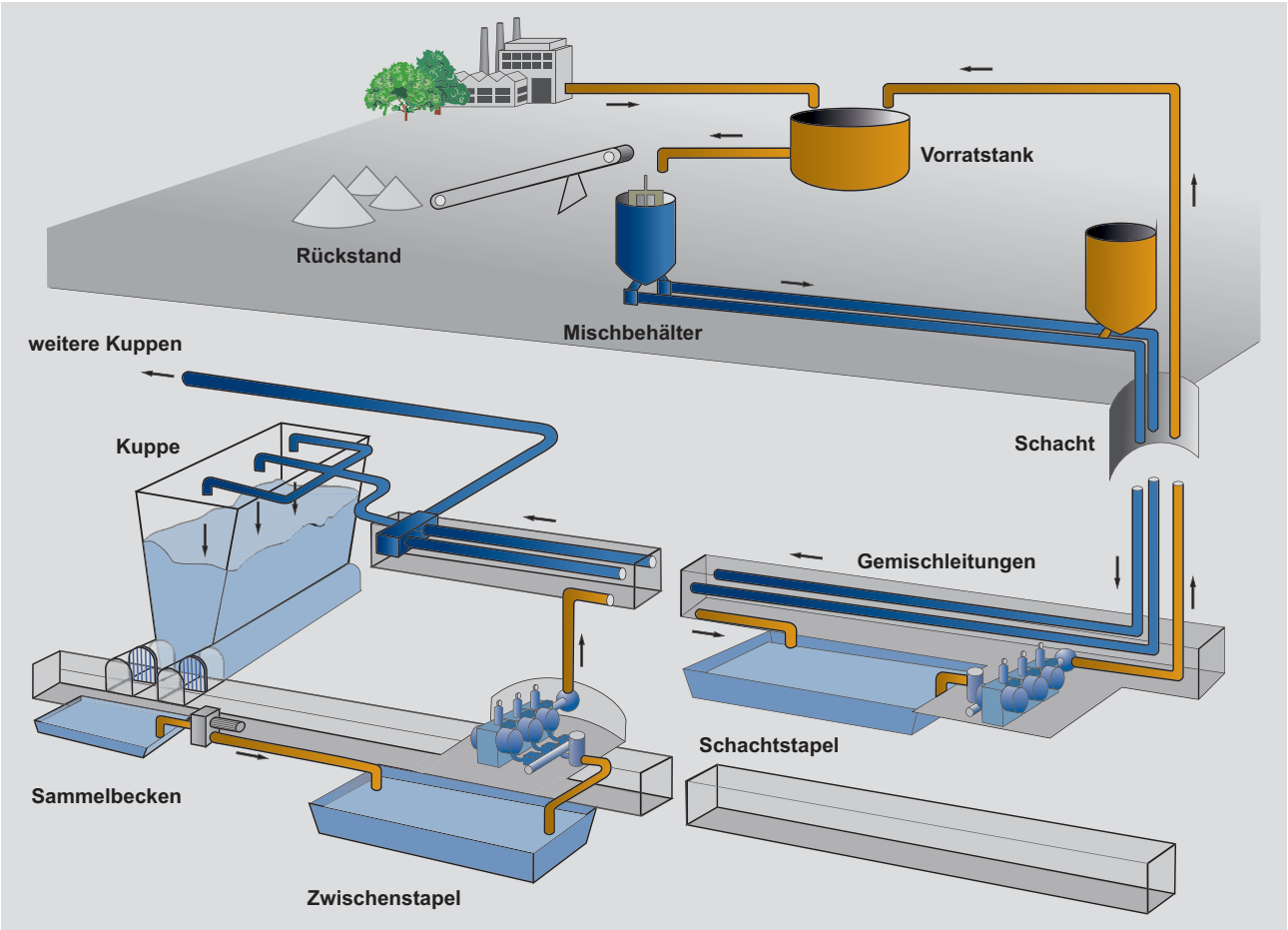


Abbildung 74 Spülversatzanlage im Kaliwerk Unterbreizbach von K+S, Deutschland, im vereinfachten Verfahrens- und Apparateschema [nach Schlotzhauer & Jacob 2005, /882/, modifiziert]

Eine Trennung der unterschiedlichen Kornfraktionen erfolgt dabei nur untergeordnet, so dass der verbleibende Porenraum im größten Teil des Versatzmassives relativ gering bleibt und nur unmittelbar an der Oberfläche eine höhere Porosität auftritt. Die überschüssige Transportlösung[178] sammelt sich zunächst in diesem Porenvolumen an der Oberfläche des Versatzmassivs, von wo sie aus dem versetzten Hohlraum und über ein Sammelsystem in Röschen[179] zu den peripher angelegten Sammelbecken und von dort in ein zentrales Lösungsvorratsbecken, welches in der Regel in Schachtnähe platziert ist, zurückgeführt wird. Am Lösungssammelbecken sind Pumpen installiert, die die gesammelte Transportlösung über ein weiteres Rohrleitungssystem wieder nach über Tage in den Vorratstank transportieren. Die Transportlösung wird auf diese Weise im Kreislauf geführt, weshalb nur ein gewisser Zusatz neuer Transportlösung in das Versatzsystem erforderlich ist, da verfahrensbedingt ein Teil der Transportlösung im Versatzmassiv zurückbleibt.

Die Dichte des endgültigen Versatzes ist abhängig von den Ausgangsmaterialien und den standortspezifischen Randbedingungen im Abbauhohlraum. Die Festigkeit des Versatzmassivs ist vom Grad der Porenraumreduktion abhängig, die zunächst vor allem durch mechanische Kompaktion und eine Kristallisation der in den Poren vorhandenen Restlösungen erfolgt (Eulenberger 2001, /258/; Sitz & Rauche 2003, /945/). Mit dem im Laufe der Zeit durch die Konvergenz der Grubenhohlräume bedingten Kraftschluss (▸ Abbildung 75) kommt es aber auch zu Drucklösungseffekten und zur dynamischen Rekristallisation im Korngefüge des Versatzmassives (Rauche & Mierdel 2000, /806/). Diese Prozesse verleihen dem Spülversatzmassiv nach mehrjähriger Standzeit eine Festigkeit, die mit der natürlicher Salzgesteine vergleichbar ist.

178 Als Transportlösung wird in der Regel eine $MgCl_2$-dominante Rückstandslösung aus der Aufbereitungsanlage mit einer Konzentration von etwa 280 g/l $MgCl_2$ genutzt.

179 Künstlich hergestellte Gräben beziehungsweise Schlitze werden im bergmännischen Sprachgebrauch als Röschen bezeichnet.

In der Flachen Lagerung bei geringen Abbauhöhen lassen sich mit dem Spülversatzverfahren im Regelbetrieb nur Verfüllgrade um 60 Prozent und Einbringdichten kaum höher als die Schüttdichte erreichen (AKV 1998, /17/). In der geneigten[180] Lagerung aber sind relativ hohe Verfüllgrade von 85 bis 95 Prozent mit einer durchschnittlichen Dichte von 1,8 bis 1,9 Tonnen pro Kubikmeter möglich (Fulda, Gruchot & Michalzik 1966, /301/; Jendersie 1969, /454/; Bartke 2008, /62/).

Im Folgenden sollen einige heute in Betrieb befindliche Referenzanlagen für das Spülversatzverfahren näher erläutert werden.

Im Kaliwerk Unterbreizbach, Deutschland, von K+S werden Aufbereitungsrückstände seit 1997 mittels Spülversatzverfahren in die vorhandenen Kuppenhohlräume[181] eingebracht. Wie bereits im Vorspann erwähnt, dient dies dem Ziel, eine deutliche Reduzierung der Salzfracht der Fließgewässer Ulster und Werra zu erreichen (Schütze 2000, /906/; Schlotzhauer & Jacob 2005, /882/). Durch das nur im Kalibergwerk Unterbreizbach praktizierte Verfahren Kuppenabbau entstehen große langgestreckte Abbaue mit bis zu einer Million Kubikmeter Hohlraumvolumen. Diese Grubenhohlräume ermöglichen ein wirtschaftliches Versatzverfahren zur Verbringung der gesamten Aufbereitungsrückstände nach unter Tage. Die Spülversatzanlage im Kaliwerk Unterbreizbach stellt eine komplexe Einheit dar (Schlotzhauer & Jacob 2005, /882/) und besteht im Einzelnen aus (▸ Abbildung 74):

- dem übertägigen Anlagenteil in der Aufbereitungsanlage;
- dem untertägigen Rohrleitungssystem auf der 1. Sohle (Kaliflöz Hessen)[182];

und

- Stapel- und Pumpensystemen mit mehreren Zwischenstapelbecken und einem Hauptstapelbecken sowie den dazu gehörigen Pumpen und Rohrleitungen zur Rückführung der Transportlösung auf der 2. Sohle (Kaliflöz Thüringen)[182].

Die Auslegung der Spülversatzanlage erfolgte für eine kontinuierliche Abnahme des anfallenden Rückstandes ohne Zwischenspeicherung im übertägigen Bereich. Bei Ausfall der Spülversatzanlage kann eine begrenzte Menge an Rückständen über Tage in einem Außenstapel zwischengespeichert werden (Schlotzhauer & Jacob 2005, /882/). In einem Rührbehälter wird der anfallende Rückstand aus der Aufbereitungsanlage mit der Transportlösung zu einer spülfähigen Spülversatzsuspension angemischt. Vom Rührbehälter wird die Spülversatzsuspension mittels geschlossener Rohrleitungen im freien Zulauf der Schachtfallleitung zugeleitet. Die Teufe von 700 Meter bedingt in der Schachtfallleitung einen statischen Druck von mehr als 100 bar, der letztlich auch den horizontalen Transport des Versatzgemisches ohne Zwischenpumpen bis hin zu den zu versetzenden Kuppenabbauhohlräumen ermöglicht. Um Störfälle zu vermeiden, ist die Spülversatzanlage weitestgehend als ein redundantes System ausgelegt worden. So stehen beispielsweise 2 separate Rohrleitungssysteme für die Verfüllung der Hohlräume zur Verfügung.

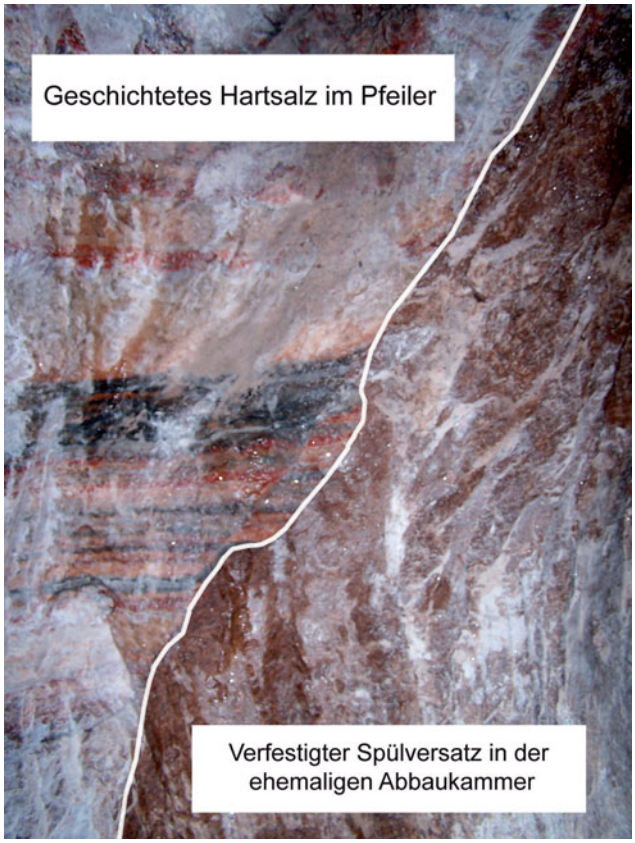


Abbildung 75 Kammer mit eingebrachtem Spülversatz nach einer Standzeit von mehr als 50 Jahren im ehemaligen Kalibergwerk Sollstedt (Foto mit freundlicher Genehmigung von Hartmut Kießling, Greiz, Deutschland)

180 Flache Lagerungsverhältnisse bis 18° Einfallen, wie sie in den ostdeutschen Kalibergwerken des Südharz- und des Saale-Unstrut-Kalireviers vorkommen, werden im Kalibergbau auch als geneigte Lagerung bezeichnet. Solche sind nicht vergleichbar mit den steilen Lagerungsverhältnissen, wie sie beispielsweise im Kalibergwerk Sigmundshall beziehungsweise im geplanten Hartsalzwerk Siegfried-Giesen vorherrschen.

181 Zur näheren Erläuterung der Kuppenstrukturen vergleiche Abschnitt 5.1.1.2.

182 Im Werra-Kalirevier werden das Kaliflöz Hessen (1. Sohle/obere Sohle) und das Kaliflöz Thüringen (2. Sohle/untere Sohle) abgebaut. Zwischen beiden Kaliflözen liegt das Mittlere Werra-Steinsalz mit einer Mächtigkeit von durchschnittlich 50 m.

Um eine Auflösung der anstehenden Carnallititrohsalze und damit eine Reduzierung des Tragelementvolumens zu verhindern, muss eine nahezu vollständig an $MgCl_2$ gesättigte Transportlösung zum Einsatz kommen. Solche Lösungen sind jedoch gegenüber herkömmlichen Rohrleitungsstählen extrem korrosiv, weshalb spezielle Stahlrohrleitungen genutzt werden müssen, die auf den Innenseiten mit Schmelzbasalt ausgekleidet sind. Auf diese Weise kann die Korrosion der Rohrleitungen und auch das Auskristallisieren von Salzen bei Übersättigung der Trägerlösungen verhindert beziehungsweise wirkungsvoll minimiert werden (Schlotzhauer & Jacob 2005, /882/).

Die zu versetzenden Kuppenabbaue werden auf der 1. Sohle durch Bohrungen angeschlossen. Auf der 2. Sohle werden diese Hohlräume in den Zufahrten durch drainagefähige Dammbauwerke abgeriegelt (▸ Abbildung 76). Die Dammbauwerke müssen zum Schutz des Betriebes und vor allem der Belegschaft gegen ein Versagen einer Spülkuppe, das heißt unplanmäßiges Auslaufen des Spülversatzes aus dem Kuppenhohlraum, errichtet werden.

In der Nähe der einzelnen Spülversatzkuppen werden Zwischenstapelbecken eingerichtet, wohin die austretende Transportlösung über Entwässerungsgräben eingeleitet wird. Anschließend erfolgt der weitere Transport der Lösung von den Zwischenstapelbecken zum Hauptstapelbecken auf der 2. Sohle. Diese Stapelbecken haben ein Fassungsvermögen von 500 bis 1.000 Kubikmeter. Zur Förderung der Lösung vom Hauptstapelbecken der 2. Sohle in das Hauptstapelbecken der 1. Sohle sowie zur Förderung von dort aus nach über Tage werden Kolbenmembranpumpen eingesetzt (Schlotzhauer & Jacob 2005, /882/).

Für die Lösungsrückführung kommen überwiegend PE-Leitungen zum Einsatz. Ist dies aufgrund der Druckstufen nicht möglich, werden für diese Rohrleitungsabschnitte Stahlleitungen mit Vetco-Beschichtung eingesetzt. Als Schachtsteigleitung kommt ebenfalls eine Stahlleitung mit Vetco-Beschichtung zum Einsatz. Für die Lösungsrückführung nach über Tage werden Kolbenmembranpumpen und Kreiselpumpen in verschiedenen Bauausführungen eingesetzt (▸ Abbildung 77).

Für einen sicheren Betrieb der Spülversatzanlage und für eine gleichbleibende Lösungsmenge ist die Einhaltung einer nahezu konstanten Gemischdichte erforderlich, da jede Schwankung der Gemischdichte eine Änderung der Lösungsbilanz zur Folge hat, welche bei einer konstanten Förderleistung der Hauptpumpen nur über die Lösungsstapelbecken gepuffert werden kann (Schütze 2000, /906/; Schlotzhauer & Jacob 2005, /882/). Zurzeit werden bis zu 1,2 Millionen Tonnen Aufbereitungsrückstände pro Jahr von der 1. Sohle aus in die Kuppenhohlräume der 2. Sohle eingebracht (K+S 2009, /469/).



Abbildung 76 Spülversatzdamm am Zugang zum Kuppenhohlraum im Kalibergwerk Unterbreizbach von K+S, Deutschland [Foto mit freundlicher Genehmigung von K+S KALI GmbH, Kassel, Deutschland]



Abbildung 77 Pumpenanlage zur Rückführung der Transportlösung des Spülversatzgemisches nach über Tage im Kalibergwerk Unterbreizbach von K+S, Deutschland [Foto mit freundlicher Genehmigung von K+S KALI GmbH, Kassel, Deutschland]

Außerdem kommt im Kalibergwerk Unterbreizbach und auch in dem in Stilllegung befindlichen Kalibergwerk Merkers ein sogenannter Feuchtversatz unter wiederum sehr speziellen Randbedingungen zur Anwendung: Wie bereits erwähnt, existieren als Altlasten des ehemaligen DDR-Kalibergbaues im Kalibergwerk Unterbreizbach wie auch im benachbarten Kalibergwerk Merkers lokal einzelne Feldesteile, die nach den heutigen Dimensionierungsvorschriften von Kammerpfeilersystemen keine ausreichenden Standsicherheiten aufweisen. Die zuständige Bergbehörde hat daher zur Gefahrenabwehr eine nachträgliche Stabilisierung dieser bereits seit Jahrzehnten ausgesalzenen unterdimensionierten Abbaufelder angeordnet. Allerdings eignet sich das klassische Spülversatzverfahren hierfür nicht, da die damit verbundenen, relativ großen Flüssigkeitsmengen zu einer zusätzlichen Destabilisierung der Tragelemente[183] führen würden (Fulda 1963, /296/; Pforr & Michalzik 1966, /757/; Jendersie 1969, /454/; Lukas 2011, /609/). Aus diesem Grund finden ein speziell für diesen Zweck entwickeltes Feuchtversatzverfahren und das auch in anderen Bergbauzweigen praktizierte Dickstoffversatzverfahren Anwendung. Beide Sonderverfahren des hydraulischen Versatzes, der Dickstoff- wie auch der Feuchtversatz, würden allerdings in einem laufenden Gewinnungsbetrieb eines Kalibergwerkes in dieser Form keine Anwendung finden können.

Darüber hinaus werden im Kalibergwerk Unterbreizbach in den sogenannten Untertageversatzanlagen auch speziell dafür zugelassene, bergbaufremde industrielle Abfallstoffe als Versatzbaustoffe genutzt. Letztere werden bei Erfordernis in die sogenannten Einzelkuppenabbaue als Dickstoffversatz eingebracht und tragen auch hier zur Reduzierung des reaktiven Hohlraumes bei. Das Prinzip einer solchen Anlage ist in Abbildung 78 schematisch dargestellt.

In den Kalibergwerken Berezniki 1[184] und 4 sowie Solikamsk 1, 2 und 3, Obere Kama, Russland, werden von URALKALI auf bis zu 3 Sohlen sylvinitische und carnallitische Rohsalze gewonnen. Seit den 1940er Jahren wird in den Bergwerken in unterschiedlichem Umfang Versatz in die Abbaukammern eingebracht. Anfangs wurden nur die Abbaue im Carnallitit versetzt. Mit dem intensiven Abbau vor allem der sylvinitischen Kalilager seit den 1960er Jahren wurde auch für diese Kalilager "Abbau mit anschließendem Versatz" (VNIIG et al. 2008, /1075/) eingeführt. Die Abbaue im Carnallitit wurden in der Regel innerhalb von 2 Jahren nach Auffahrung versetzt. Beim Mehrflözabbau sind neben den zuvor genannten Carnallititabbauen auch diejenigen im Sylvinit zu versetzen, wobei

- unter städtischer Bebauung alle Abbaue

sowie

- bei Drei-Flöz-Abbau außerhalb der städtischen Bebauung Abbaue in mindestens 2 Kalilagern

zu versetzen sind (VNIIG et al. 2008, /1075/).

Neben dem Trockenversatz, der hauptsächlich im Carnallititlager eine Rolle spielte, kommt in den beiden abgebauten Sylvinitlagern vor allem das Spülversatzverfahren zur Anwendung:

> Bei annähernd söhlig aufgefahrenen Kammern werden vom darüber liegenden Kalilager bzw. aus darüber liegenden Steinsalzstrecken Einleitbohrungen in die Kammern gestoßen. Bei geringem Einfallen werden die Kammern aus der Kopfstrecke heraus abschnittsweise versetzt. Das Einbringen des Versatzes beginnt am tiefsten Punkt und wird abschnittsweise bis zum höchstgelegenen Teil der Kammer fortgesetzt (Borsakovskij 2001, /119/) (▸ Abbildung 79).

183 Salzgesteine erfahren bei der Hohlraumschaffung im Gebirge aufgrund ihrer visko-elasto-plastischen Materialeigenschaften einen Verformungsprozess, der zu einer zeitabhängigen Entfestigung führt und eine Abnahme der Tragfähigkeit von Pfeilern bewirkt. Das mit dem Flüssigkeitseintrag initiierte sogenannte Feuchtekriechen bewirkt eine Zunahme der Kriechverformungsrate in den Pfeilersystemen, was zu einer Beschleunigung dieses Entfestigungsprozesses führt (Menzel & Schreiner 1977, /642/; 1978, /643/; Minkley 1997, /660/; Günther & Salzer 2007, /357/; Minkley & Mühlbauer 2007, /666/).

184 Das Kalibergwerk Berezniki 1 ist im Jahre 2006 abgesoffen. Da in diesem Bergwerk zuvor umfangreiche Versatzmaßnahmen erfolgten, wird es hier zur Vollständigkeit mit angeführt.

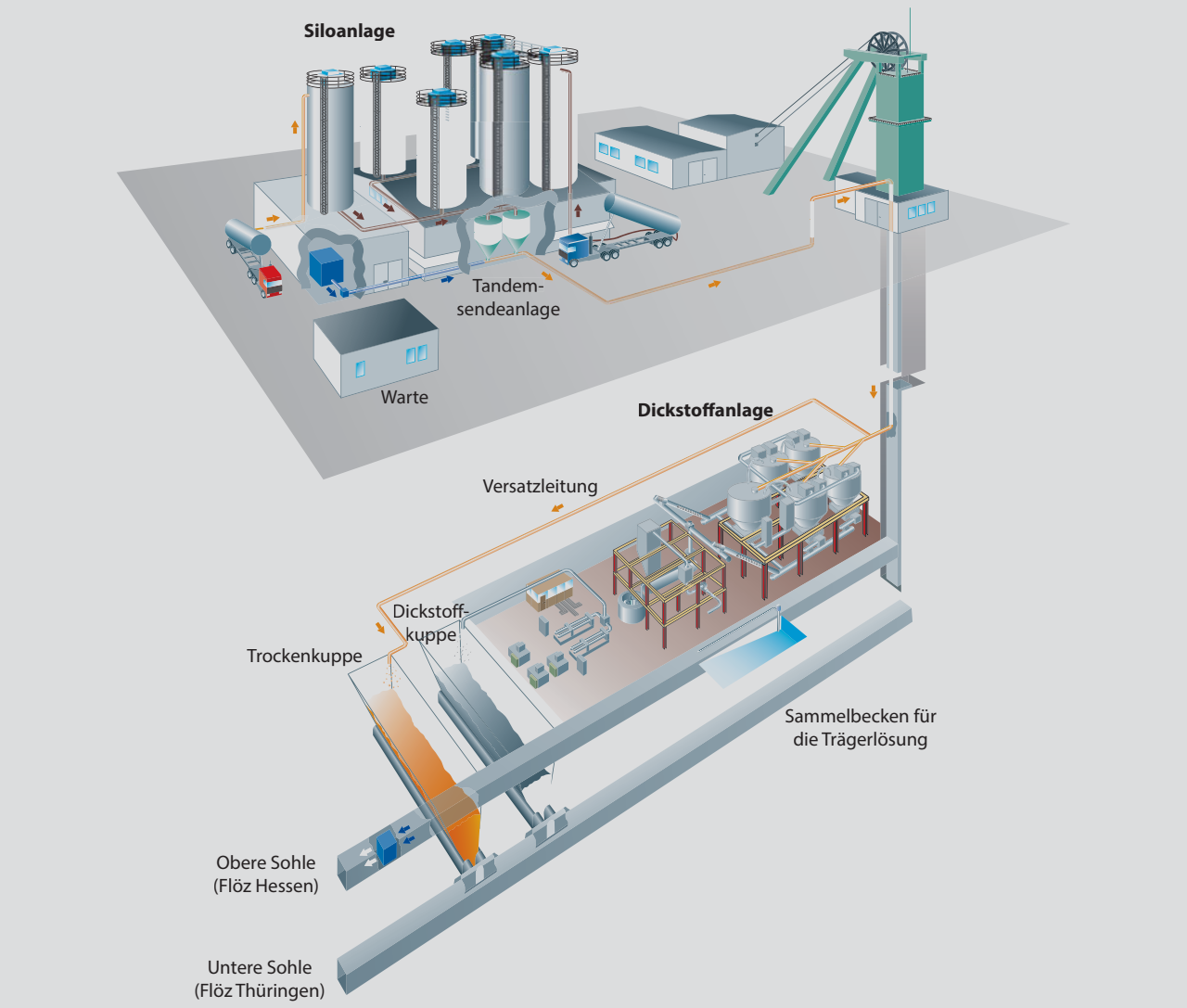


Abbildung 78 Dickstoffversatzanlage des Kaliwerkes Unterbreizbach von K+S, Deutschland, im vereinfachten Verfahrens- und Apparateschema [nach Lukas 2011, /609/, modifiziert]

Seit Anfang der 1990er Jahre bis zum Absaufen des Kalibergwerkes Berezniki 1 im Jahr 2006 wurde in diesem Bergwerk unter dem Stadtgebiet von Berezniki Spülversatz eingebracht. Von den dort im Jahr 2005 insgesamt aufgehaldeten 4,34 Millionen Tonnen feuchter Aufbereitungsrückstände wurden 2,68 Millionen Tonnen, also etwa 62 Prozent, als Spülversatz nach unter Tage versetzt. Außerdem wurden mit der gleichen Anlage noch 190.000 Tonnen Schlammrückstände nach unter Tage versetzt. Im Kalibergwerk Berezniki 1 wurden bis zum Ersaufen insgesamt etwa 57 Millionen Kubikmeter Spülversatz eingebracht (ERCOSPLAN 2015, /255/). Das Versatzeinbringen ist schematisch in Abbildung 79 dargestellt.

Am Standort Solikamsk, Obere Kama, Russland, von URALKALI wird seit 1974 im Kalibergwerk Solikamsk 1, seit 1984 im Kalibergwerk Solikamsk 2 und seit 1990 im Kalibergwerk Solikamsk 3 Spülversatz mit dem Ziel der Minimierung des reaktiven Abbauhohlraumes und zur Verringerung der Senkungen über Tage eingebracht. Wie aus Abbildung 80 ersichtlich ist, betrugen die jährlichen Gesamtversatzmengen zwischen 6 und 8 Millionen Tonnen.

Für das Jahr 2011 plante URALKALI in allen 3 Standorten Solikamsk insgesamt etwa 7,5 Millionen Tonnen Spülversatz, was etwa 26 Prozent der festen Rückstände entsprach (SRK 2011, /968/). Seit Inbetriebnahme der Versatzanlage im Kaliwerk Solikamsk 1 wurden insgesamt etwa 50 Prozent des seit dem Produktionsbeginn im Jahre 1934 aufgefahrenen Grubenhohlraumes versetzt.

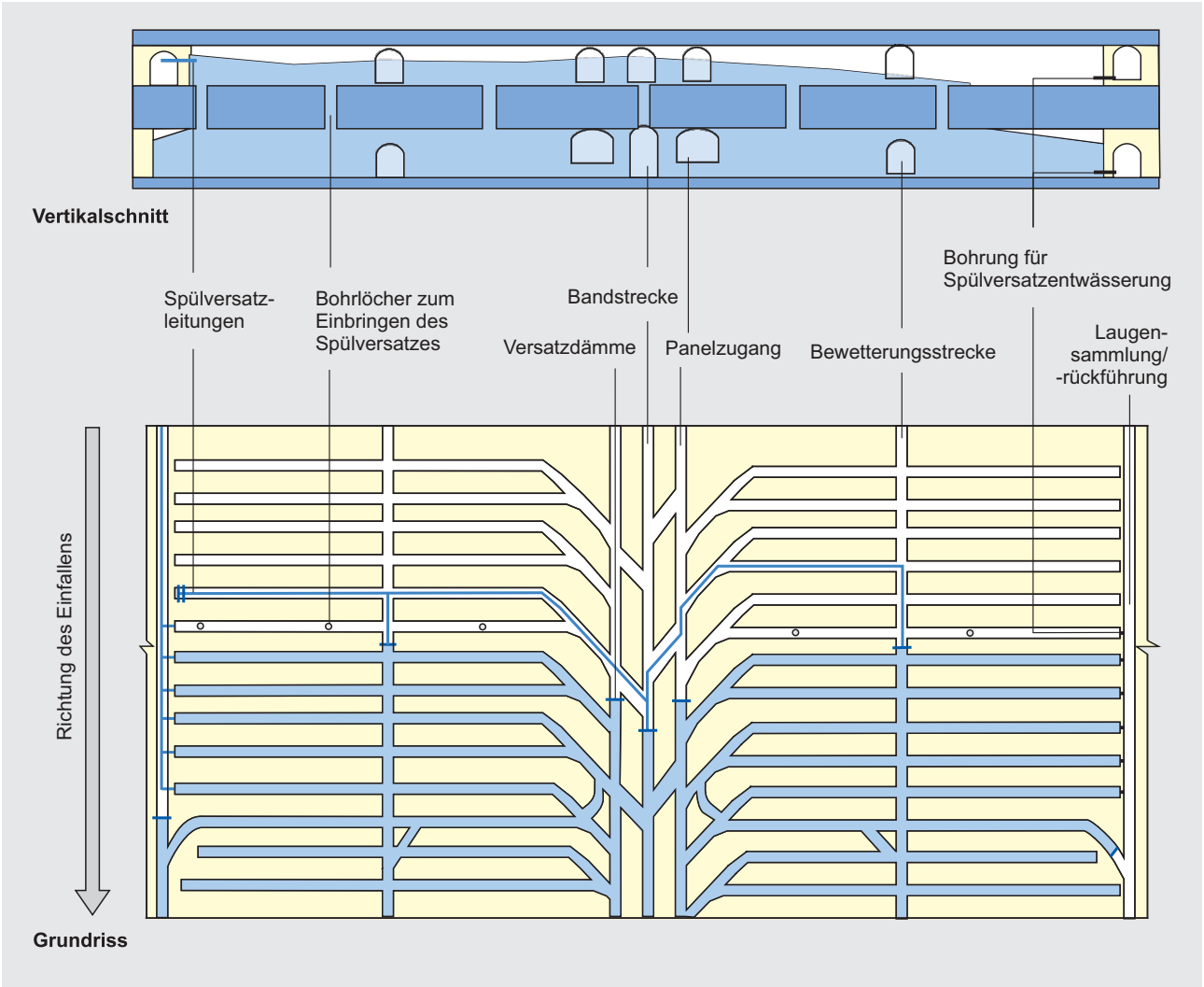


Abbildung 79 Einbringen des Versatzmaterials in einen Spülversatzblock in den Kalibergwerken an der Oberen Kama, Russland
[Borsakovskij 1980, /118/; 2001, /119/]

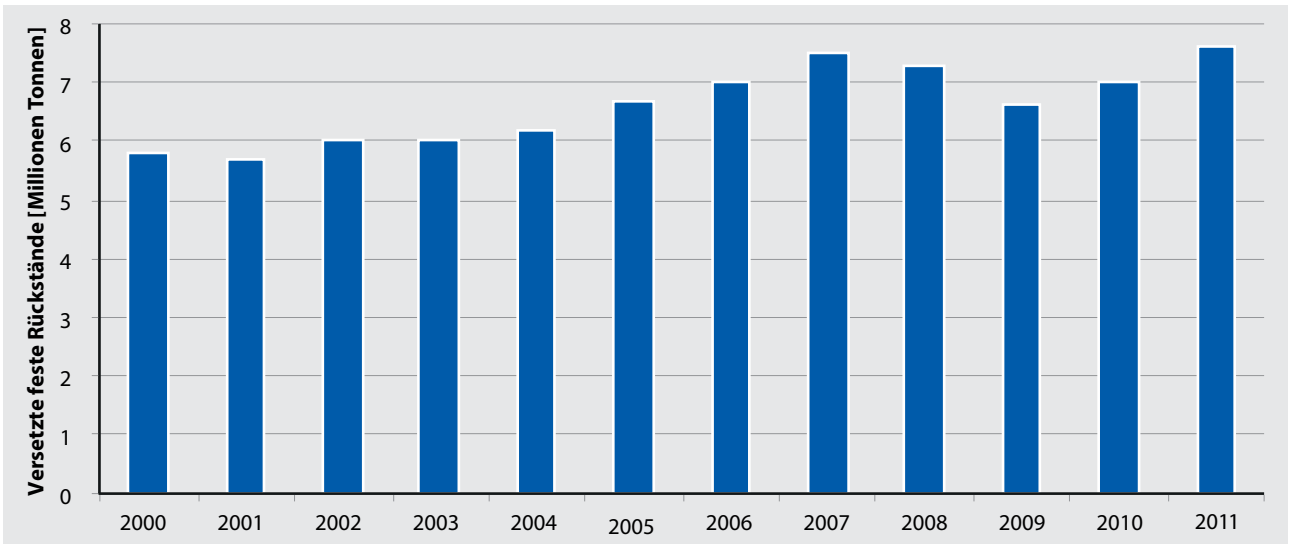


Abbildung 80 Jährliche Gesamtversatzmengen der Kaliwerke Solikamsk 1, 2 und 3

Weiterhin werden auch im Bergwerk Berezniki 4 Schlammrückstände aus dem Aufbereitungsprozess mittels Spülversatz unter Tage entsorgt.

In den kanadischen Kalibergwerken mit Flacher Lagerung wird üblicherweise kein Versatz eingebracht. Das Kalibergwerk Esterhazy K2, Saskatchewan, Kanada, von MOSAIC bildet dabei eine Ausnahme:

Zur Stabilisierung von Bereichen, welche aufgrund der seit den 1980er Jahren herrschenden Lösungszutritte beeinträchtigt sind, wurde aus geomechanischen Erfordernissen in begrenztem Umfang Spülversatz eingebracht. Dazu wurden die Versatzareale mit flüssigkeitsdurchlässigen Dammbauwerken abgetrennt. Die Versatzsuspension wurde über Tage angemischt und über Versatzbohrungen unmittelbar in die entsprechenden Versatzbereiche eingespült. Nach Entwässerung und Konsolidierung des Versatzkörpers wurde größtenteils die erwartete Stützwirkung erreicht. In Bereichen entlang des Hauptströmungspfades der zutretenden Lösungen wurde dem Versatz Zement beigemischt. Damit sollte der Auflösung des Versatzmassives entgegengewirkt werden (Kaskiw, Morgan & Ruse 1989, /501/; van Sambeek 1992, /1059/; 1993, /1060/; MOSAIC 2012b, /682/).

Außerdem wurden für die großen Kalibergwerke in Saskatchewan (Strathdee 1989, /985/; 1992, /986/) und auch für jene an der Oberen Kama (URALKALI 2009, /1044/) auch eine Rückführung der aufgehaldeten festen Rückstände nach Einstellung des Gewinnungsbetriebes diskutiert, jedoch bislang nirgendwo praktiziert.

8.1.2 Beseitigung der festen Aufbereitungsrückstände durch Aufhaldung

In Tabelle 32 wurden alle heute praktizierten Entsorgungspfade für feste Gewinnungs- und Aufbereitungsrückstände für alle weltweit 71 Standorte der Kalidüngemittelproduktion aufgeführt. In dieser Tabelle ist bereits ersichtlich, dass an 40 Produktionsstandorten feste Kalirohsalze im geologischen Untergrund durch bergmännische oder soltechnische Verfahren abgebaut werden und dort auch eine klassische Aufhaldung der festen Aufbereitungsrückstände betrieben wird. An 29 weiteren Standorten, wo natürliche Lösungen aus Salzseen oder oberflächennahen Grundwasserleitern als Rohstoff für die Kalidüngemittelproduktion dienen, werden die auch dort unvermeidbar anfallenden festen Aufbereitungsrückstände an der Erdoberfläche unmittelbar in den Gewinnungsanlagen beziehungsweise in nächster Nähe zu diesen abgelagert, was letztlich der klassischen Aufhaldung durchaus ähnlich ist.

Diese vergleichende Analyse zeigt, dass der mengenmäßig wichtigste Entsorgungsweg für die bei der Aufbereitung von Kalirohstoffen unvermeidlich anfallenden festen Rückstände die Aufhaldung an der Erdoberfläche war und auch heute noch ist (Schroth 1973a, /896/; Singewald 1983, /935/; 1990a, /936/; Tallin & Pufahl 1983, /997/; Scharf 1990, /875/; Haug & Reid 1991, /376/; Haug, Wong & Reid 1991, /377/; Reid & Maki 1991, /826/; Strathdee 1992, /986/; UNIDO 1998, /1043/; UNEP & IFA 2001, /1042/; Schultz et al. 2003, /903/; Schwalm 2003, /907/; Stahl et al. 2005, /973/; Lekhov 2007, /587/; Brown, Heebner & Howe 2009, /129/; URALKALI 2011c, /1047/).

Tabelle 35 gibt einen Überblick zu allen Standorten, an denen die Entsorgung der festen Aufbereitungsrückstände durch Aufhaldung praktiziert wird und zeigt auch die dabei bereits heute verbrauchte beziehungsweise genehmigte Flächeninanspruchnahme. Welche enormen Flächen in den bedeutenden Kalibergbauregionen dafür bereits in der Vergangenheit in Anspruch genommen worden und auch zukünftig noch erforderlich sind, wurde bereits am Beginn des Kapitels 8 erwähnt. Im Rahmen dieser einleitenden Diskussion wurden ebenfalls die maßgeblichen Umweltauswirkungen erläutert, die aus der Aufhaldung von festen Aufbereitungsrückständen an der Erdoberfläche resultieren. Es sind dies vor allem die sehr große Flächeninanspruchnahme und die damit verbundene Veränderung der natürlichen Landschaftsmorphologie und -nutzung. Außerdem bestehen vielfach grundsätzliche Besorgnisse hinsichtlich einer möglichen Beeinträchtigung von Oberflächengewässern oder auch des Grundwassers durch von den Haldenkörpern abfließende oder durch sie penetrierende Salzlösungen. Solche – vielfach auch als Haldenwässer bezeichneten – mineralisierten Lösungen entstehen infolge von Niederschlägen, die auf den Haldenkörper einwirken, was ausführlicher im Abschnitt 8.3 behandelt werden soll.

Ferner bestehen Besorgnisse dahingehend, dass von den Ablagerungen der festen Rückstände an der Erdoberfläche ausgehende Staubemissionen oder instabile Haldenkörper die Umwelt beeinflussen können. Alle diese spezifischen Umwelteinflüsse reichen aufgrund der relativ langen Lebensdauer einer Halde weit über den Zeitraum der aktiven Abbautätigkeit hinaus, so dass auch nach dem Zeitpunkt der Einstellung des Ablagerns bergbaulicher Abfälle eine Instandhaltung der vielfältigen Vorsorge- und Schutzeinrichtungen dauerhaft gewährleistet werden muss. Eine Renaturierung im Sinne einer weitestgehenden Wiederherstellung des Ursprungszustandes der Umwelt ist zumindest für die Großhalden kaum möglich. Eine Rekultivierung wurde hingegen an verschiedenen Orten bereits für kleinere als auch in jüngster Zeit für Großhalden erfolgreich durchgeführt.

Für den heutigen Stand der Technik zur Beseitigung der festen Aufbereitungsrückstände durch Aufhaldung an der Erdoberfläche sind die Verfahrensweisen in der Vergangenheit nur mittelbar von Interesse. Dennoch sei darauf verwiesen, dass sich auch hinsichtlich der strategischen Konzepte zur Aufhaldung bergbaulicher Abfälle in der Geschichte der Kaliindustrie maßgebliche Veränderungen vollzogen haben: Seit der Frühzeit der Kalidüngemittelproduktion bis hin zum drastischen Zuwachs der Produktionskapazitäten durch Einführung der Bergbaugroßgeräte in den 1960er und 1970er Jahren wurden Halden mit einem relativ kleinen Volumen in der Nähe der Verarbeitungsanlagen betrieben, wo die Rückstände auf kurzem Wege beseitigt wurden. Wohl erfolgte hierbei eine Standortwahl nach geologischen Kriterien, auf Basisabdichtungen oder Entwässerungssysteme wurde jedoch weitgehend verzichtet. Erst der vermehrte Anfall großer Rückstandsmengen und die damit absehbaren Umweltauswirkungen verpflichteten zur Flächenoptimierung sowie auch zu umfassenden wasserbaulichen Maßnahmen für den Schutz von Oberflächengewässern sowie des Grundwassers und des Bodens. Die heute in den verschiedenen Kalirevieren betriebenen Großhalden erfüllen diese Anforderungen überall entsprechend den jeweils geltenden Rechtsnormen und Regelwerken, wie sie den für einen Betrieb von bergbaulichen Abfallbeseitigungsanlagen erforderlichen Erlaubnissen und Zulassungen in den einzelnen Ländern zugrunde liegen (▸ Kapitel 1) .

Insbesondere im Mutterland der Kaliindustrie, in Deutschland, wurden aufgrund der Erschöpfung der Rohsalzvorräte oder auch aus wirtschaftlichen Gründen, wie zuletzt nach der deutschen Wiedervereinigung, einst leistungsstarke Kaliwerke stillgelegt. In Bezug auf die während der Betriebszeit beseitigten Rückstände bedeuten solche Stilllegungen immer auch, dass große Haldenstandorte ihren Betrieb eingestellt haben und in diesem Zusammenhang auch Rekultivierungsmaßnahmen an den Rückstandshalden durchgeführt wurden, ganz gleich welcher Art diese waren und welchen Umfang sie auch einnahmen. Nicht zuletzt daraus erwuchsen Erfahrungen, die heute wiederum die Konzepte für die Beseitigung fester Rückstände durch Aufhaldung dahingehend beeinflussen, dass zum Beispiel unter speziellen Randbedingungen die Abdeckung und Begrünung von Haldenkörpern im laufenden Ablagerungsbetrieb möglich werden kann. Auch hierbei nehmen die Kaliindustrie in der Bundesrepublik Deutschland (Schmeisky & Lenz 1998, /885/; Scheer 2001, /877/; Niessing 2005, /709/; Gerling 2009, /323/; 2014c, /326/; K+S 2011d, /476/; 2014b, /489/; Jahn 2014, /449/) beziehungsweise auch die, die früheren DDR-Kaligroßhalden bewirtschaftenden Nachsorgeunternehmen und deren ingenieurtechnische Berater im internationalen Maßstab eine innovative Vorreiterrolle ein (Minnich 1996, /674/; Lücke 1997, /607/; K-UTEC 2001, /463/; Trautvetter & Kottmeyer 2001, /1025/; K-UTEC 2002, /464/; Schwalm 2003, /907/; Pfeifer & Stude 2011, /756/) und gestalten in dieser Weise den Stand der Technik aktiv mit.

Tabelle 35 Übersicht zu den weltweit 32 Haldenstandorten der Kalidüngemittelproduktion (▸ Tabelle 1)

Produzent/Standort[5]	Feste Rückstände aus ...	Haldengrundfläche [ha]
URALKALI		
Solikamsk 3	... Bergmännischer Gewinnung und Flotation	140
Berezniki 4	... Bergmännischer Gewinnung, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	100
Solikamsk 2	... Bergmännischer Gewinnung und Flotation	110
Berezniki 3	... Bergmännischer Gewinnung und Flotation[168]	140 [185]
Berezniki 2	... Bergmännischer Gewinnung und Flotation	210
Solikamsk 1	... Bergmännischer Gewinnung, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	37

185 Diese Fläche schließt die bislang genehmigte Haldenerweiterungsfläche ein.

Produzent/Standort[5]	Feste Rückstände aus ...	Haldengrundfläche [ha]
PCS		
Lanigan	... Bergmännischer Gewinnung, Flotation, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	220
Rocanville	... Bergmännischer Gewinnung und Flotation	210
Allan	... Bergmännischer Gewinnung, Flotation, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	230
Cory	... Bergmännischer Gewinnung, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation sowie Flotation	250
Patience Lake	... Soltechnischer Gewinnung und natürlicher Kühlkristallisation	90
MOSAIC		
Esterhazy K1	... Bergmännischer Gewinnung und Flotation	220
Esterhazy K2	... Bergmännischer Gewinnung, Schweretrennung, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	160
Belle Plaine	... Soltechnischer Gewinnung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation sowie natürlicher Kristallisation	130
Colonsay	... Bergmännischer Gewinnung, Flotation, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	520 [185]
Carlsbad	... Bergmännischer Gewinnung und Flotation	760 [186]
BELARUSKALI		
Soligorsk 4	... Bergmännischer Gewinnung, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	180
Soligorsk 3	... Bergmännischer Gewinnung und Flotation	223
Soligorsk 2	... Bergmännischer Gewinnung und Flotation	180
Soligorsk 1	... Bergmännischer Gewinnung und Flotation	200

186 Diese Fläche schließt die Einspülbecken für die Feststoffsuspension und die Ablagerungsfläche der entwässerten Substrate ein.

Produzent/Standort[5]	Feste Rückstände aus ...	Haldengrundfläche [ha]
K+S		
Verbundwerk Werra, bestehend aus den Standorten:		
Wintershall	... Bergmännischer Gewinnung, Flotation, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation sowie ESTA®	92
Hattorf	... Bergmännischer Gewinnung, Flotation, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation sowie ESTA®	81
Zielitz	... Bergmännischer Gewinnung, Flotation, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	192
Neuhof-Ellers	... Bergmännischer Gewinnung, Flotation und ESTA®	83
Sigmundshall	... Bergmännischer Gewinnung, Flotation, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation sowie ESTA®	50
ICL IBERIA S & S		
Súria	... Bergmännischer Gewinnung und Flotation[169]	Insgesamt 100
Sallent	... Bergmännischer Gewinnung und Flotation	
AGRIUM		
Vanscoy	... Bergmännischer Gewinnung, Flotation, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	370
INTREPID		
Carlsbad East	... Bergmännischer Gewinnung, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	240
Carlsbad West	... Bergmännischer Gewinnung und Flotation	120
Moab	... Soltechnischer Gewinnung, solarer Evaporation und natürlicher Kristallisation sowie Flotation	30
UZKIMYOSANAT		
Dechkanabad	... Bergmännischer Gewinnung und Flotation	keine Angabe

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die verschiedenartigen Methoden, Verfahren und Anlagen erläutert, wie sie heute, in der Mitte des zweiten Jahrzehntes des 21. Jahrhunderts, zur Beseitigung der festen Aufbereitungsrückstände durch Aufhaldung an der Erdoberfläche an den verschiedenen Standorten betrieben werden. Dazu sollen vorab die zwei deutlich verschiedenen Arten der Ablagerung, die daraus resultierenden Typen der Spülhalden (▸ Abbildung 81a) beziehungsweise der kompakten Schüttguthalden (▸ Abbildung 81b) und der damit verbundene spezifische Flächenbedarf (▸ Abschnitt 8.1.2.1) sowie die ebenfalls dadurch bestimmten Prozesse zur weiteren Konsolidierung des Haldenkörpers und der Veränderung seiner Mantelbereiche durch einwirkende Niederschläge (▸ Abschnitt 8.1.2.2) diskutiert werden. Anschließend werden die wesentlichsten Kriterien zur Auswahl und die Maßnahmen zur Vorbereitung des Haldenstandortes sowie die grundsätzlichen Anforderungen an das Monitoring zur Zustandsdokumentation vor dem Beginn der Errichtung des Haldenstandortes, während des Haldenbetriebes und in der Nachbetriebsphase behandelt (▸ Abschnitt 8.1.2.3). Abschließend werden die in Deutschland besonders in den vergangenen drei Jahrzehnten durch gezielte F/E-Arbeiten gelungenen Erfolge bei der Abdeckung von Rückstandshalden der Kaliindustrie und deren Begrünung angesprochen (▸ Abschnitt 8.1.2.5), ohne aber im Detail auf diese heute außerhalb Deutschlands noch nicht allgemein verbreiteten Methoden und Verfahren einzugehen.

8.1.2.1 Art der Ablagerung und daraus resultierender Flächenbedarf

Die Konditionierung der festen Aufbereitungsrückstände vor ihrer Ablagerung wird an den individuellen Standorten entsprechend den dort herrschenden Randbedingungen in unterschiedlicher Art und Weise vorgenommen. Ein wesentlicher, letztlich auch die Architektur, den internen Bau und die weitere Entwicklung des Haldenkörpers sowie seine sich dabei vollziehenden Gefügeveränderungen bestimmender Unterschied besteht im Fluidgehalt der Rückstände zum Zeitpunkt ihrer Ablagerung:

- Vor allem in Nordamerika, aber für einzelne Abfallströme auch in Russland und in Belarus erfolgt der Transport der festen Aufbereitungsrückstände zum Ort ihrer Beseitigung vielfach hydraulisch als von Salzlösungen getragene Feststoffsuspension. Entsprechend hoch ist zum Ablagerungszeitpunkt auch der Fluidgehalt, der im Regelfall bei 40 bis 50 Volumenprozent liegt (Hart 1985, /373/; Beddoes, Roulston & Streisel 1989, /82/; Fredlund & Mittal 1989, /287/; Haug & Reid 1991, /376/; Strathdee 1992, /986/; Fredlund, Zhang & Macdonald 1993, /288/; Sveinson 1999, /993/; GOLDER 2006, /339/; Brown, Heebner & Howe 2009, /129/). Die als Transportmedium verwendeten Salzlösungen stellen Teilströme der flüssigen Aufbereitungsrückstände dar, die auf diese Art zumindest teilweise gemeinsam mit den festen Rückständen beseitigt werden.
- Anderenorts, so auch in Deutschland, werden die festen Rückstände vor ihrer Ablagerung durch Zentrifugieren und Filtern derart entwässert, dass sie als rieselfähiges Schüttgut über Förderbänder zum Beseitigungsort transportiert werden können. Auch diesem Schüttgut haften noch Salzlösungsanteile an, die hier aber mit einer Restfeuchte von 3 bis 10 Volumenprozent des Schüttgutes deutlich geringer sind (KK 1983b, /527/; Schroth 1990, /898/; Schreiber 1997, /894/; Stahl et al. 2005, /973/; Burak & Pozniak 2007, /137/; Vostretsov 2009, /1082/; K+S 2010c, /472/; K+S 2011c, /475/; K+S 2012d, /480/; K+S 2012e, /481/). Besonders die dem Verfahren der trockenen elektrostatischen Aufbereitung entstammenden Rückstände liegen eher an der unteren Schranke dieses Feuchtegehaltintervalles.

Demnach sind also die Fluidgehalte bei Ablagerung als Feststoffsuspension oder als rieselfähiges Schüttgut deutlich verschieden, was natürlich zunächst auch die Art der Partikelsedimentation und daraus folgend auch die geometrische Form des Haldenkörpers bestimmt.

Die auf die Spülhalden aufgebrachten Feststoffsuspensionen breiten sich fließend über größere Flächen aus und setzen dabei sukzessive große Teile der Trägerlösung frei, die dann weitestgehend über die Oberfläche der langsam sedimentierenden festen Rückstände abfließt. Auf diese Weise wird eine weitflächige horizontale Verteilung der abzulagernden Rückstände erreicht. Der vertikale Zuwachs des Haldenkörpers pro Spülvorgang ist dabei auf wenige Dezimeter beschränkt, erhöht die Auflast nur geringfügig, weshalb mechanische Kompaktionsprozesse hier a priori weit geringer und außerdem noch durch den hohen Porenfluiddruck im Partikelstrom blockiert sind (▸ Abbildung 82). Zum Sammeln der Transportlösungen werden am Rand der Spülareale Grabensysteme und Speicherbecken angelegt, in denen diese Lösungen zunächst von ihrem Schwebstoffanteil geklärt und je nach Bedarf wieder in den Kreislauf der Transportlösungen zurückgeführt werden können (EC 2004, /225/; RESCAN 2008, /829/). Dadurch entstehen großflächige Spülhalden, deren Zuwachs naturgemäß vor allem in der horizontalen Ausdehnung erfolgt. Um dennoch ein vertikales Anwachsen in der Höhe zu erreichen, werden zum einen die Einspülpunkte über dem höchsten Punkt der Ablagerungsfläche angesiedelt sowie zum anderen auch Dämme an den Rändern der Spülhalden errichtet, die das weitere subhorizontale Abfließen blockieren und im Laufe der Haldenbewirtschaftung sukzessiv erhöht werden müssen (▸ Abbildung 83). Besonders in Saskatchewan, Kanada, sind solche Spülhalden mit sehr großen Rückstandsvolumina angelegt worden (Wong 1985, /1129/; Wong, Barbour & Fredlund 1988, /1130/), wobei die Art des Aufspülens jedoch nur geringe Höhen, in der Regel weniger als 50 Meter ermöglicht und eine sehr große Flächeninanspruchnahme bedingt (▸ Abbildung 84).



Abbildung 81 Aufhaldung von Rückständen aus der Aufbereitung fester Kalirohsalze: a – in Form einer Spülhalde im Kaliwerk Lanigan, Saskatchewan, Kanada, von PCS; b – in Form einer kompakten Schüttguthalde im Kaliwerk Súria, Katalonien, Spanien, der ICl Iberia S & S, beides im Luftbild

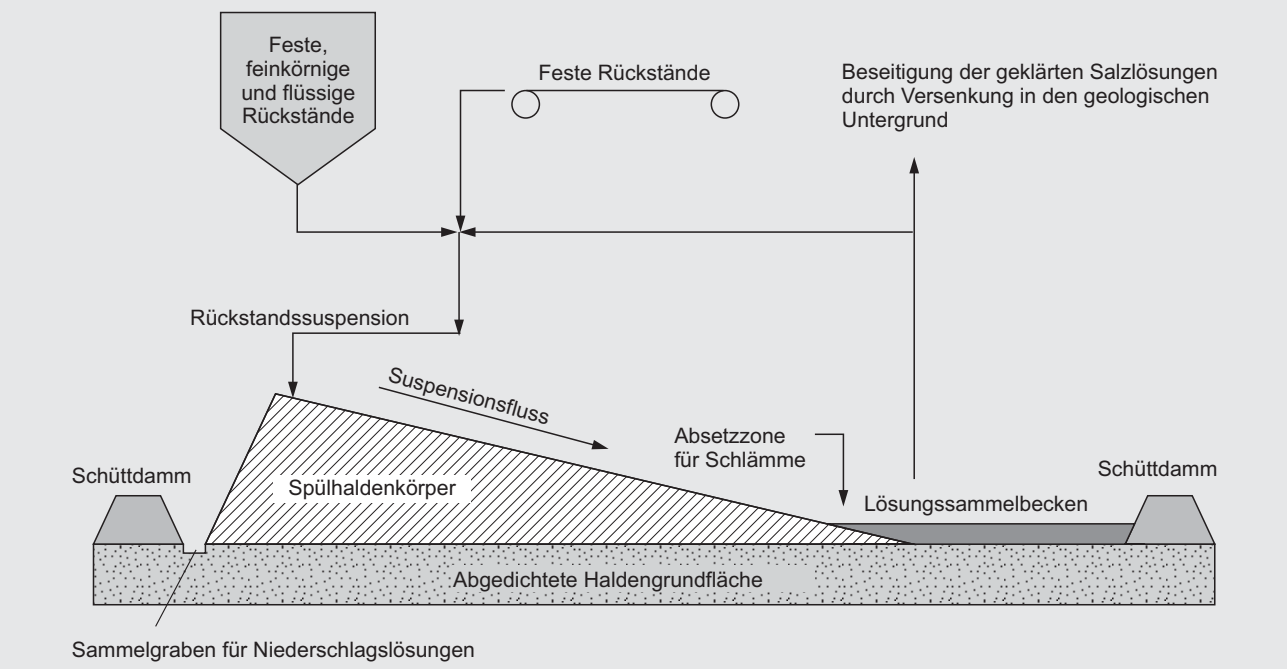


Abbildung 82 Spülhalde mit Salzlösungssammelbecken im vereinfachten Verfahrens- und Apparateschema, wie sie in Saskatchewan, Kanada, Anwendung findet [Reid & Getzlaf 2004, /823/; modifiziert]

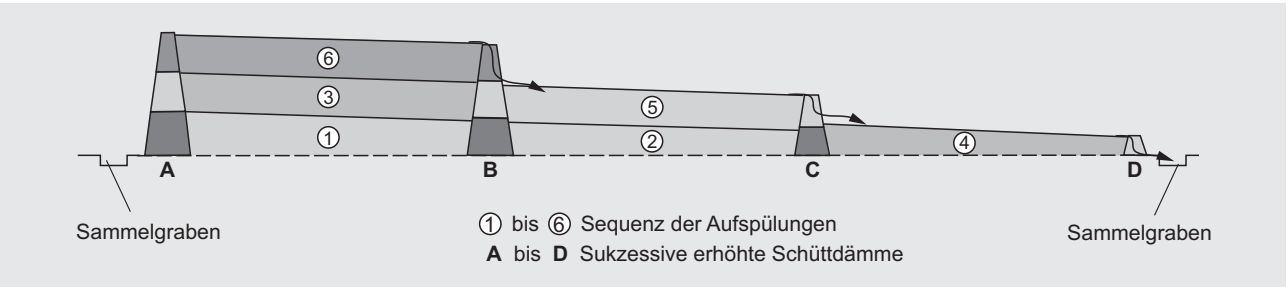


Abbildung 83 Aufspülfolge der als Suspension abgelagerten festen Aufbereitungsrückstände in Saskatchewan, Kanada [GOLDER 2006, /339/; modifiziert]

Die Kapazität dieser Rückstandsflächen ist vor allem durch das Festigkeitsverhalten der aufgespülten Rückstände begrenzt, so dass durch weiteres vertikales Wachstum des Spülkörpers die Auflast materialspezifische Grenzwerte übersteigt und Standsicherheitsprobleme die Folge sein können. Im Kaliwerk Esterhazy K2 von MOSAIC wird es zum Beispiel in absehbarer Zeit zur Erschöpfung der nutzbaren Ablagerungsflächen kommen, weshalb bereits in den vergangenen Jahren ein neues Spülareal von etwa 55 Hektar vorbereitet wurde (MDHES 2008, /630/). Die Rückstände sollen hier wie bisher als Suspension auf die Rückstandsfläche gepumpt und damit aufgehaldet werden. Die abfließenden Salzlösungen werden in Gräben aufgefangen und in Lösungsbecken gelagert. Die Rückstandsflächen werden auch hier durch Dämme von der angrenzenden Umgebung getrennt, wodurch ein Lösungszutritt in die Umgebung verhindert werden soll.

Die großen Standorte der Kalidüngemittelproduktion an der Oberen Kama, Region Perm, Russland, in der Region Soligorsk, Belarus und in Saskatchewan, Kanada, die den weitaus größten Teil ihrer Produktion durch Flotationsprozesse erzeugen (▸ Kapitel 6), nutzen vielfach auch eine getrennte Ablagerung. Dabei kommen die grobkörnigen Flotationsrückstände letztlich getrennt von den feinkörnigen Rückständen zur Ablagerung. Wie bereits für Saskatchewan beschrieben, resultiert die dort nur unscharfe Trennung beider aus dem Entmischungsprozess der Suspensionen auf den flach modellierten Spülhalden (Fredlund & Mittal 1989, /287/; Fredlund 1991, /286/; Landine, Barbour & Reeves 1992, /288/; Strathdee 1992, /986/; Fredlund, Zhang & Macdonald 1993, /288/; Landine 1993, /582/; Reid & Klein 1994a, /824/; 1994b, /825/; Sveinson 1999, /993/).



Abbildung 84 Rückstandshalde des Kaliwerkes Esterhazy K1/K2 von MOSAIC, Saskatchewan, Kanada



Abbildung 85 Halden und Schlammteiche der Kaliwerke Soligorsk 2 und 3 von BELARUSKALI im Satellitenbild

An der Oberen Kama sowie in Soligorsk werden die grobkörnigeren Flotationsrückstände hingegen auf kompakten Schüttguthalden abgelagert und die feinkörnigen unlöslichen Rückstände als Suspension in sogenannte Schlammteichen eingeleitet (▸ Abbildung 85), welche sich in unmittelbarer Nachbarschaft der Schütgguthalden befinden (URALKALI 2011c, /1047/; ERCOSPLAN 2015, /255/). In diesen Kalirevieren ist auch mit fortschreitender Ausdehnung der Rückstandshalde das spätere Überschütten oder auch Überspülen abgetrockneter Schlammteiche erfolgreich praktiziert worden.

Die durch Bandtransport den kompakten Schüttguthalden zugeführten und bereits weitgehend entwässerten Schüttgutströme hingegen werden durch Bandabscheider oder auch spezielle Absetzer als feuchter, aber stets noch rieselfähiger Feststoff unmittelbar im vorgesehenen Ablagerungsraum platziert oder aber an dafür eingerichteten Kippstellen zwischengelagert und mittels mobiler Schiebetechnik bis zum Ort ihrer Bestimmung verbracht. Dadurch entstehen Schüttguthalden, deren horizontaler und vertikaler Zuwachs weitestgehend gesteuert werden kann, was erhebliche Vorteile für die Flächeninanspruchnahme des entstehenden Haldenkörpers besitzt. Die vorherige Entwässerung der Rückstände und Schlämme, wie es bei der Kalisalzaufbereitung in Deutschland üblich ist, bietet daneben auch den entscheidenden Vorteil, die benötigten umlaufenden Betriebslösungen kontrolliert und verlustarm unmittelbar im Aufbereitungskreislauf verfügbar zu halten (Schroth 1973a, /896/; Pufahl 1983, /789/; Singewald 1983, /935/; Pufahl & Fredlund 1988, /790/; Scharf 1990, /875/; Stahl et al. 2005, /973/). Diese Art der Aufhaldung ermöglicht einen gemeinsamen Transport der entwässerten Rückstände mit ihren feinkörnigen Anteilen zur Halde und die gemeinsame Ablagerung beider als Partikelgemisch, was zusätzlich auch die Materialeigenschaften und damit die Festigkeit der zu beseitigenden bergbaulichen Abfälle im geschütteten Haldenkörper entscheidend verbessert. Mit vorher entwässerten und gemischten Rückständen gelingt es, platzsparende Haldenkörper mit Hangneigungen von 36° bis 38° zu schütten und dabei Schütthöhen von deutlich über 100 Meter zu erreichen, ohne dass Standsicherheitsprobleme zu besorgen sind. Auf diese Weise gelingt es auch, die Flächeninanspruchnahme erheblich zu reduzieren.

An den Haldenstandorten in Deutschland transportieren steigende Förderbänder bis zu 1.200 Tonnen pro Stunde festen Aufbereitungsrückstand auf den Haldenkörper. Die Absetzbänder sind dabei schwenkbar und, wo es erforderlich ist, auch höhenverstellbar. Die verbliebene Restfeuchte verhindert weitgehend die Staubentwicklung. Die Schüttung selbst kann als sogenannte Blockschüttung oder als Flankenschüttung erfolgen, was an den einzelnen Halden auch abwechselnd betrieben werden kann (Wachter 2009, /1085/; Wachter & Katzenbach 2009, /1086/; Katzenbach et al. 2010, /507/; 2011, /506/; 2013, /508/; Wachter, Katzenbach & Leppla 2010, /1087/; Katzenbach & Leppla 2012a, /502/; 2012b, /503/; Katzenbach, Leppla & Seip 2012a, /504/; 2012b, /505/; Leppla 2012, /590/;). Das Blockschüttverfahren sieht ein an der Erdoberfläche beginnendes Aufschütten der Halde vor, so dass lagenweise Blöcke in definierten Abmessungen aufgeschüttet werden und das Wachstum der Halde in allen Raumrichtungen erfolgt, die Halde also sukzessiv sowohl in Länge und Breite als auch in der Höhe anwächst. Dagegen führt das Flankenschüttverfahren zu einem Wachstum der Halde in Länge und Breite, nicht oder nur weniger in der Höhe, indem die fortschreitende Aufschüttung vom Haldenplateau aus erfolgt, so dass die Haldenflanke lagenweise um weitere Segmente anwächst. Nach solchen Verfahren werden zum Beispiel im Werra-Kalirevier jährlich etwa 11 Millionen Tonnen feste Rückstände an 2 kompakten Schüttguthalden an den Standorten Wintershall und Hattorf aufgehaldet. Tabelle 36 gibt vergleichend die Rückstandsmengen wieder, die an den Standorten der Rohsalzaufbereitung beziehungsweise von den Produzenten jährlich gefördert und aufgehaldet werden.

Nicht grundsätzlich verschieden, jedoch an die dort von der Natur vorgegebenen bzw. vom Menschen geschaffenen infrastrukturellen Randbedingungen angepasst, erfolgt die Aufhaldung der grobkörnigen Flotationsrückstände auch in den dünn besiedelten Kalibergbauregionen an der Oberen Kama in Russland und auch im Raum Soligorsk in der Republik Belarus. An der Oberen Kama in Russland produzierten die 4 Kaliwerke von URALKALI am Standort Berezniki im Jahr 2005 in 3 Flotationsanlagen und 2 Heißverlösungsanlagen aus einem sylvinitischen Rohsalz mit mehr als 30 Prozent KCl und relativ hohen Gehalten an unlöslichen Ton- und Anhydritanteilen mehrheitlich MOP und untergeordnet auch Industriekali. In diesem Produktionsjahr fielen etwa 15,4 Millionen Tonnen feste, halitische Rückstände an, davon etwa 2,3 Millionen Tonnen tonhaltige Schlämme an. 85 Prozent der halitischen Rückstände wurden aufgehaldet und etwa 70 Prozent der feinkörnigen Schlämme dauerhaft in Schlammteichen abgelagert. Kleinere Restmengen dieser Schlämme wurden unter Tage beseitigt. Die halitischen Rückstände werden auch hier vollständig entwässert, die tonhaltigen Schlämme dagegen als Suspension in die Absetzteiche eingebracht. Die kompakten Schüttguthalden werden an der Oberen Kama in der Regel mit einem Schüttwinkel von 35° bis 38° und mit einer maximalen Schütthöhe von 100 Meter betrieben. Zur Sammlung der Haldenlösungen sind auch hier Grabensysteme rund um die Haldenkörper und zentrale Salzlösungssammelbecken errichtet worden. Die gesammelten Haldenlösungen werden sporadisch zur Verwertung als Prozesslösungen den Aufbereitungsanlagen zurückgeführt. Bei bestimmungsgemäßem Betrieb der Halde sollte kein Lösungsüberschuss auftreten.

Tabelle 36 Masseverhältnisse zwischen bergmännisch gewonnenem und gefördertem festen Rohsalz und den mittels Aufhaldung beseitigten festen Aufbereitungsrückständen für ausgewählte Kalidüngemittelproduzenten im Jahr 2011

Kalidüngemittel-produzent	Land	Rohsalzgewinnung [10^6 t]	Aufhaldung [10^6 t]	Anteil Aufhaldung an Rohsalzgewinnung [%]
URALKALI	Russland	44,71	22,89	51,2
PCS	Kanada	27,18	11,76	43,3
MOSAIC	Kanada, USA	21,87	8,89	40,6
BELARUSKALI	Belarus	39,16	27,05	69,1
K+S	Deutschland	43,57	22,86	52,5
ICL	Spanien, Großbritannien	5,49	0,88	16,0
AGRIUM	Kanada	5,59	2,78	49,7

Eine nahezu identische Bewirtschaftung der festen Aufbereitungsrückstände erfolgt beim Produzenten BELARUSKALI in der Nähe von Soligorsk, Republik Belarus. Neben der Ablagerung der festen Rückstände auf klassischen Schüttguthalden werden an 4 Haldenstandorten die feinkörnigen Schlämme als Suspension in Schlammteiche gepumpt. Die Flächen für die Schlammteiche werden zuvor mit geeigneten Folien abgedichtet. Um die Schüttguthalden und um die Schlammteiche herum sind Gräben errichtet, die der Sammlung von Salzlösungen dienen, die durch die Niederschlagseinwirkung entstehen. Die Schlammteiche sind für die dauerhafte Lagerung der Ton-Salz-Suspensionen konzipiert. Aufgrund des mit der Produktionsdauer zunehmenden Schlammvolumens in diesem industriellen Absetzbecken müssen die Dämme sukzessive erhöht werden, um den Flächenverbrauch so gering wie möglich zu halten (▸ Abschnitt 8.3).

Der Flächenverbrauch für aufgehaldete feste Rückstände ist, abgesehen von der absoluten Menge, wesentlich von der Hangneigung des Haldenkörpers abhängig. Je steiler das Material aufgehaldet werden kann, umso geringer ist auch der spezifische Flächenverbrauch pro Volumeneinheit. Wie bereits erwähnt, sind die Flankenwinkel großer deutscher Rückstandshalden der Kalidüngemittelproduktion, auf denen die Rückstände als entwässerte Schüttgüter abgelagert wurden, etwa 35° und auch steiler (RPK 2007, /854/). Im Vergleich zu diesen Halden besitzen die für das kanadische Kalirevier in Saskatchewan typischen Spülhalden einen wesentlich größeren Flächenverbrauch, weil die festen Rückstände dort nicht als weitgehend entwässerter feuchter Feststoff aufgehaldet, sondern als Suspension in durch Dämme abgeschlossene Becken eingespült werden. Nach Abfließen der Lösungen bleiben daher wesentlich weniger stark geneigte Feststoffhalden zurück. Es entstehen dabei langgezogene Haldenflächen mit zwar ebenfalls etwa 35° Neigung am steilen oberen Ende, allerdings im besten Falle lediglich 5° Neigung am langen unteren Ende. Diese keilförmige Architektur entspricht weitgehend dem natürlichen Ausfließwinkel der aufgespülten Suspension (Tallin & Pufahl 1983, /997/; Fredlund & Mittal 1989, /287/; Prugger 1992, /785/; Fredlund, Zhang & Macdonald 1993, /288/; Landine 1993, /582/; Sveinson 1999, /993/; GOLDER 2006, /339/). Zur Veranschaulichung der Flächeninanspruchnahme für die Grundfläche einer Halde in Abhängigkeit vom Böschungswinkel lässt sich ein vereinfachter quantitativer Vergleich durchführen:

> Eine Halde entspricht geometrisch näherungsweise einem Pyramiden- oder Kegelstumpf. Um den Einfluss der Böschungsneigung auf den Flächenverbrauch zu betrachten, ist es hinreichend, das Grundflächen/Volumenverhältnis einer vollständigen Pyramide oder eines vollständigen Kegels zu diskutieren. Für den Vergleich werden beispielhaft 2 Pyramiden mit quadratischer Grundfläche angenommen, einer mit dem Neigungswinkel von 20° und eine andere mit dem Neigungswinkel von 35°. Sollen beide Pyramiden das gleiche Volumen aufnehmen, dann nimmt die Grundfläche der Pyramide mit einem Neigungswinkel von 20° eine 1,55fach größere Grundfläche ein, als jene mit dem Neigungswinkel von 35°[187].

[187] Pyramidenvolumen $V=(1/3)a^2h$, Grundfläche $A=a^2$, Höhe $h=(a/2)\tan\alpha$, $A_{20°}(\tan 20°)^{2/3}=A_{35°}(\tan 35°)^{2/3}$

Bei einer Verringerung des Böschungswinkels von 35° auf 20° erhöht sich also der Flächenverbrauch um 55 Prozent.

Während der Flächenverbrauch für die mitteleuropäische Kulturlandschaft mit ihrer relativ hohen Bevölkerungsdichte ein wesentliches Kriterium für die Raumordnung darstellt, wiegen die damit verbundenen Aspekte des Umweltschutzes unter den anderen siedlungsgeografischen und infrastrukturellen Randbedingungen in den Flächenländern Kanada, hier besonders in der Provinz Saskatchewan, oder auch Russland und Belarus weniger schwer.

Tabelle 37 zeigt vergleichend die Dimensionen der heute in Deutschland in Betrieb befindlichen Halden der Kalidüngemittelproduktion.

Tabelle 37 Dimensionen zur Zeit betriebener Rückstandshalden der Kaliindustrie in Deutschland 2013 [K+S 2012a, /477/; ERCOSPLAN 2015, /255/]

Standort	Höhe [m]	Fläche [ha]	Masse [10^6 t]	Hauptbestandteil
Wintershall	110 – 260	92	190	NaCl
Hattorf	165 – 230	81	140	NaCl
Zielitz	75 – 120	192	271	NaCl
Neuhof-Ellers	max. 190	83	114	NaCl
Sigmundshall	max. 120	50	42	NaCl

Diese Zustandsbeschreibungen zeigen, wie die äußere Form und die Architektur des Haldenkörpers durch diese heute zur Anwendung kommenden zwei grundsätzlich verschiedenen Ablagerungsarten in vielfältiger Weise bestimmt werden. Dies gilt aber auch für den internen Bau, weil auch die im Zeitablauf auf die Ablagerung folgenden Prozesse nicht identisch verlaufen und der resultierende strukturelle des Haldenkörpers und in der Folge auch seine Veränderung durch auftreffende Niederschläge unterschiedlich zu bewerten ist.

8.1.2.2 Entwicklung der Haldenkörper und struktureller Bau

Nach der Sedimentation der in unterschiedlicher Materialkonsistenz und auf unterschiedliche Art abgelagerten festen Aufbereitungsrückstände finden in diesen Gefügeveränderungen statt, die hauptsächlich durch mechanische Kompaktions- aber auch durch Lösungs- und Kristallisationsprozesse getragen sind und in deren Entwicklung ein monolithischer Haldenkörper entsteht. Diese Prozesse bestimmen nicht zuletzt wichtige physikalische Eigenschaften des Haldenmaterials und damit auch die Standfestigkeit sowie die Verwitterungsresistenz. Neben der unterschiedlichen Überlagerungshöhe beider Haldentypen spielen hierbei wiederum der initiale Fluidgehalt aber auch und insbesondere für die Mantelbereiche des Haldenkörpers nachträglich durch Niederschläge einwirkende Wässer eine große Rolle.

Auf den kompakten Schüttguthalden zeigt das frische Rückstandssalz anfänglich eine granulare, kohäsionslose Struktur und hat direkt nach der Aufhaldung eine Schüttdichte von etwa 1,4 Tonnen pro Kubikmeter. Unter dem Einfluss der Restfeuchte, des klimatisch bedingten, wiederholten Eintrages von Niederschlägen auf die Mantelfläche und deren Verdunstung, vor allem aber infolge des wachsenden Überlagerungsdruckes im Zuge der weiteren Aufhaldung verändert sich das heterogene Korngefüge durch fortschreitende mechanische Kompaktion[188] und Drucklösung[189] aber auch durch Kristallisationsprozesse im Porenraum erheblich, so dass im Haldenkern ein nahezu kompaktes Salz mit hoher Festigkeit entsteht (Ankes 1972, /24/). Den unlöslichen Bestandteilen, deren Anteil lagerstättengeologisch bedingt, von wenigen bis über 10 Prozent wechseln kann, kommt bei dieser Gefügeveränderung gleichfalls Bedeutung zu. Im Ergebnis zeigen die kompakten Schüttguthalden eine Kriechverformung, die auch zu veränderten Lastbedingungen für den unterlagernden Baugrund führt. Durch ihre visko-elasto-plastischen Materialeigenschaften sind diese Schüttguthalden dauerstandsicher (Katzenbach et al. 2011, /506/).

Der auf die geschilderte Art und Weise im Laufe der Produktionsgeschichte anwachsende Haldenkörper weist deutliche Unterschiede gegenüber den Deponiekörpern oder Halden anderer Bergbauzweige, wie zum Beispiel des Kohle- und Erzbergbaus, auf. Die Rückstandshalden der Kaliindustrie besitzen eine aufgrund langzeitiger Kompaktions- und Kristallisationseffekte massive Kernzone, die von durchlässigeren, durch Lösungs- und Auswaschungsprozesse beeinflussten Mantelbereichen umhüllt wird.

188 Mechanische Kompaktion bezeichnet die räumliche Reorganisation des Korngefüges als Folge der wachsenden Auflast, bei der vor allem der Porenraum durch eine dichtere Packung der Partikel eine Verringerung erfährt.

189 Drucklösung bezeichnet den Verformungsmechanismus des Lösungs-Ausfällungs-Kriechens, der auch als Riecke'sches Prinzip bekannt ist.

Diese Prozesse finden allerdings zeitlich begrenzt statt, so lange im Haldenmantel noch lösefähiges Material ansteht. Im Anschluss besteht der Mantelbereich nur noch aus unlöslichen Bestandteilen, so dass der Abfluss über die Grenzzone zum kompakten Haldenkern erfolgen wird. Naturgemäß durchlaufen die einzelnen Volumenanteile einer Halde aufgrund der fortschreitenden Aufschüttung in dynamischer Folge alle diese Prozesse, wobei je nach zeitlicher Aufschüttfolge einzelne Segmente mehr oder weniger lange von Niederschlagseinwirkungen betroffen sind. Aufgrund der mit den Lösungs- und Auswaschungsprozessen verbundenen Schaffung von sekundärem Porenraum besitzen die Randbereiche häufig sehr gute Durchlässigkeiten wie auch Speicherkapazitäten und werden daher in der Regel partiell lösungsführend angetroffen. Dieser sekundäre Porenraum ist das Ergebnis der Auflösung der löslichen Bestandteile des Aufbereitungsrückstandes durch die zutretenden ungesättigten Niederschlagswässer und daneben auch der mechanischen Erosion durch meteorische Einflüsse. Die fortschreitende mechanische Kompaktion erfasst natürlich auch diesen sekundären Porenraum und führt letztlich zu einer auflastbedingten Eigenverdichtung des Haldenkörpers.

Aufgrund der morphologischen Exposition der Rückstandshalden findet der Wind entlang des Haldenmantels Angriffspunkte für Abrasion[190] und Erosion des Haldenmaterials, was sich zum Beispiel in horizontalen, der vorherrschenden Windrichtung folgenden Lösungskanälen zeigt. Aus diesen Auflösungs- und Abrasionsprozessen resultiert die Tatsache, dass die Haldenoberfläche stets sehr unregelmäßig geformt, von unterschiedlich starken Setzungen betroffen, von Lösungshohlräumen korrodiert sowie durch Karren und Schratten[191] charakterisiert ist. Messergebnisse und andere Erfahrungstatsachen belegen aber, dass es hierbei nicht zu weiträumigen Materialumlagerungen zum Beispiel in Form von Abwehungen kommt.

Die aktive Salzauflösung durch zutretende Niederschlagswässer findet ausschließlich an der Kontaktzone zwischen diesen Randbereichen und dem darunter befindlichen, mehr oder minder kompakten Kern statt (▸ Abschnitt 8.3): Niederschläge lösen zwar ständig Haldenmaterial, allerdings geschieht dies in sehr langen Zeiträumen. Durch die innere Verfestigung infolge Kristallisation gelangt Niederschlagswasser nur in einen Randbereich des gesamten Haldenkörpers. Wasser und resultierende Lösungen fließen in diesem Randbereich des Haldenkörpers ab und eine innere Zone bleibt von Wasserzutritt weitgehend unberührt. Durch den schnellen Abfluss von Niederschlagswasser besitzen die abfließenden Lösungen in der Regel nur einen geringen Sättigungsgrad (EC 2009, /226/). Nur dort, wo die Verweildauer der Niederschlagswässer entlang der Fließwege im Mantelbereich höher ist, werden auch nennenswerte Salzfrachten abgeführt. Um einen Zutritt von diesen Salzlösungen zum Grundwasser zu vermeiden, können vor einer Aufhaldung der Boden abgedichtet werden und die Salzlösungen von der gesamten Haldenfläche über Drainagen und Gräben abgeleitet werden. Zum Teil werden diese Salzlösungen im Aufbereitungsprozess wieder verwertet oder sie werden in Gänze beseitigt (▸ Abschnitt 8.3).

All diese Beobachtungen beruhen auf Erfahrungstatsachen, wie sie in der mehr als 100 Jahre umfassenden Geschichte der Aufhaldung von Aufbereitungsrückständen in Deutschland sowie aus Zustandsdaten von derzeit in Betrieb befindlichen Halden der Kalidüngemittelproduktion abgeleitet worden sind (UNEP & IFA 2001, /1042/; EC 2004, /225/). Besonders wertvolle Ergebnisse zum Haldenaufbau und zu den mechanischen wie auch hydrogeologischen Materialeigenschaften der verschiedenen Bereiche des Haldenkörpers wurden bei der Rekultivierung großer Rückstandshalden im Südharz-Kalirevier (Heinze, Fiedler & Liebmann 1984, /382/; ERCOSPLAN 1997, /239/; Lücke 1997, /607/; Trautvetter & Kottmeyer 2001, /1025/; K-UTEC 2002, /464/; Parnieske-Pasterkamp 2003, /729/; Schwalm 2003, /907/; DGFZ e.V. 2005, /197/; Dunger 2006, /217/; Pfeifer & Stude 2011, /756/) aber auch durch die seitens K+S in den letzten Jahren eigens durchgeführten oder bei unabhängigen Forschungseinrichtungen beauftragten Untersuchungen (Hofmann 2003, /405/; Niessing 2005, /709/; Katzenbach et al. 2010, /507/; 2011, /506/; 2013, /508/; Wachter, Katzenbach & Leppla 2010, /1087/; Katzenbach, Leppla & Seip 2012a, /504/; 2012b, /505/; Leppla 2012, /590/; Jahn 2014, /449/; K+S 2014b, /489/) gesammelt. Für diese Forschungsarbeiten kam ein sehr breit gefächertes methodisches Inventar zur Anwendung, das von der Probenahme an der Haldenoberfläche, in Bohrungen und Schürfen, über geomechanische und hydrogeologische in situ Untersuchungen bis hin zu allen Facetten der Analytik reichte. Ein sehr wesentlicher Erkenntniszuwachs war zweifellos durch die bergmännische Durchörterung des Haldenkerns der Rückstandshalde des ehemaligen Kaliwerkes Bleicherode möglich geworden (Pfeifer & Stude 2011, /756/). Im ehemaligen deutschen Südharz-Unstrut-Kalirevier gehörte die Aufhaldung der festen Rückstände von Anfang an zur Produktionsgeschichte, obgleich auch frühzeitig Teilströme der festen Aufbereitungsrückstände als Versatz unter Tage zur Stabilisierung der Abbauhohlräume verwendet wurden. Die bereits in den Jahren 1897 bis 1911 angelegten 6 größeren

190 Abrieb oder Abschliff von Festkörpern durch in Wasser oder Luft enthaltene Feststoffteilchen

191 Als Karren und Schratten bezeichnet man in den Geowissenschaften Oberflächenformen in verkarsteten, das heißt von chemischen Auflösungsprozessen betroffenen Gesteinen (Karst). Die Namen Karren und Schratten stammen aus den nördlichen Kalkalpen in Österreich, wo diese Begriffe für die unterschiedlich intensiven Zerfurchungen der Oberfläche von Kalksteinen verwendet werden.

kompakten Schüttguthalden wurden seit der Einstellung der Produktion in dem Südharz-Kalirevier Anfang der 1990er Jahre durch vielfältige Maßnahmen zur Rekultivierung überprägt.

Die größten Erweiterungen erfuhren diese Halden seit der durch die Einführung der Großgerätetechnik möglichen, sprunghaften Kapazitätserhöhung und der darauf folgenden Einstellung des Spülversatzbetriebes in den Jahren 1971 bis 1985. Bis zur Stilllegung der Südharz- und Unstrut-Kaliwerke in den Jahren 1991 bis 1993 wurden auf insgesamt etwa 320 Hektar mehr als 178 Millionen Kubikmeter summiertes Haldenvolumen, an den 6 Standorten jeweils zwischen 17 und 53 Millionen Kubikmeter, mit einer Höhe zwischen 70 und 140 Meter abgelagert. Ihr Stoffbestand ist durchaus charakteristisch für Rückstandshalden der deutschen Kalidüngemittelproduktion mittels Heißlöseverfahren und umfasst im Mittel 69 Prozent NaCl, 15 Prozent CaSO, 7 Prozent $MgSO_4$ und daneben auch noch geringe Anteile von KCl, $MgCl_2$, K_2SO_4 sowie von unlöslichen Tonmineralen. Anderenorts, wo auch die $MgSO_4$-Wertstoffe genutzt werden und neben den Löseverfahren auch Flotation und/oder elektrostatische Aufbereitungsverfahren Anwendung finden, kann der NaCl-Anteil auch über 90 Prozent liegen. Mit umfangreichen Sicherungs- und Rekultivierungsarbeiten wird seit der Stilllegung an einer umweltgerechten Verwahrung dieser Standorte und auch erfolgreich an der Abdeckung und Begrünung der Rückstandshalden gearbeitet (K-UTEC 2001, /463/; TMLNU 2002, /1020/; Pfeifer & Stude 2011, /756/), was in den Abschnitten 8.1.2.3 und 8.1.2.5 noch vertieft behandelt werden soll.

Für die auf großflächigen Spülhalden abgelagerten Aufbereitungsrückstände verläuft die Gefügeveränderung im Anschluss an den Aufspülvorgang andersartig. Die mit dem Austritt aus der Spülleitung einhergehende Querschnittserweiterung im Spülstrom bedingt eine Verminderung der Strömungsgeschwindigkeit der Partikel, was eine gravitative Materialsonderung zur Folge hat. Auf diese Weise lagern sich grobkörnige und spezifisch schwerere Rückstandspartikel bevorzugt um die Austrittsbereiche der Spülleitungen ab, während feinkörnigere und leichtere Partikel mit der abfließenden Trägerflüssigkeit noch weiter transportiert werden und erst mit dem weiteren Verlangsamen der Fließgeschwindigkeit sedimentieren. Durch das Wechseln der Austrittslokationen kommt es zwar zu Überschneidungen derart sortierter Sedimentlagen, dennoch herrscht innerhalb dieser ein sehr homogenes Korngefüge vor. Im Querschnitt solcher Spülhalden gehen solche homogenen Domänen einzelner Korngrößengruppen in horizontaler Richtung ineinander über, sind randlich horizontal wie auch vertikal miteinander verzahnt. Am weitesten werden die Tonmineral-Partikel transportiert, die sich letztlich erst in den Klärteichen gravitativ von der Trägerflüssigkeit separieren. Da die keilförmigen Spülhalden insgesamt keine großen Höhen erreichen und ihre größten Volumenanteile in den flachen Abschnitten lagern, finden die vom Überlagerungsdruck gesteuerten Gefügeveränderungen durch mechanische Kompaktionsprozesse bei weitem nicht im gleichen Umfang wie bei den bis über 200 Meter hohen kompakten Schüttguthalden statt. In der Folge weisen die auf den Spülhalden abgelagerten Rückstände auch deutlich geringere Festigkeiten auf.

8.1.2.3 Auswahl und Vorbereitung des Haldenstandortes

Die Aufhaldung der festen Aufbereitungsrückstände erfordert bereits eine umsichtige Planung in Bezug auf die Auswahl des Haldenstandortes, insbesondere hinsichtlich des Schutzes von Oberflächengewässern und des Grundwassers. Zunächst sollte die Auswahl eines geeigneten Haldenstandortes auch das Vorhandensein von oberflächennahen Aquicluden oder Aquitarden berücksichtigen, die als natürliche geologische Barrieren einen Schutz des Grundwassers dauerhaft ermöglichen können. Dies wurde in Deutschland auch für viele Haldenstandorte bereits vor vielen Jahrzehnten praktiziert (Pavilonski 1982, /730/; KK 1983b, /527/; Lenz 1983, /589/; Schroth 1990, /898/; Lücke 1997, /607/; K-UTEC 2001, /463/; 2002, /464/; Hofmann 2003, /405/; Schwalm 2003, /907/; Eulitz, Müller & Sommer 2005, /259/; Dunger 2006, /217/; Siefert, Büchel & Lebküchner-Neugebauer 2006, /930/; TLUG 2006, /1017/; Lekhov 2007, /587/; Pfeifer & Stude 2011, /756/; Sommer & Hartung 2012, /957/; Jahn 2014, /449/;).

In modernen Planungskonzepten wird neben einer solchen, vom geologischen Unterbau geprägten Standortwahl für die Rückstandshalde auch ihre spätere Eingliederung in das Landschaftsbild berücksichtigt (K+S 2014b, /489/). Die Transportdistanz für die aufzuhaldenden Rückstände von ihrem Entstehungsort an der Aufbereitungsanlage bis zu ihrem Ablagerungsort wirkt sich hierbei in zweierlei Hinsicht limitierend aus: zum einen erfordern lange Transportwege auch eine entsprechend größere Flächeninanspruchnahme für die zu installierenden Bandanlagen oder Rohrleitungen für den Transport der Rückstände. Zum anderen sind mit wachsender Entfernung auch steigende Betriebskosten für die Haldenbewirtschaftung verbunden. Deshalb wird die Wahl eines Haldenstandortes stets aus einem Optimierungsprozess heraus zu entscheiden sein.

Ferner werden hier in Deutschland, in mehr oder minder ähnlicher Weise auch in anderen kalidüngemittelproduzierenden Ländern, den wasser-, umwelt- und baurechtlichen Regelwerken (▸ Kapitel 1) entsprechend, bauliche Vorbereitungsmaßnahmen für die Grundfläche des späteren Haldenkörpers durchgeführt, die nach Art und Umfang wiederum den am konkreten Standort bestehenden Randbedingungen anzupassen sind (▸ Abschnitt 4.1, 4.2, 4.3).

Diese beinhalten in der Regel eine Vergleichmäßigung der Oberfläche, die meist durch mechanische Verdichtung und Befeuchtung erreichte Verfestigung des Bodens, eine zumindest in Abschnitten ausgeführte Abdichtung des Untergrunds und vor allem den Aufbau eines entsprechenden Entwässerungssystems, das den finalen Dimensionen des Haldenkörper angemessen sein (KK 1983b, /527/; Hart 1985, /373/; Schroth 1990, /898/; Haug & Reid 1991, /376/; Prugger 1992, /785/; EC 2004, /225/; 2009, /226/; Brown, Heebner & Howe 2009, /129/), aber auch die im Zuge der Aufhaldung zu erwartenden Einwirkungen auf den natürlichen Baugrund berücksichtigen muss (Fredlund & Mittal 1989, /287/; Fredlund 1991, /286/; Fredlund, Zhang & Macdonald 1993, /288/; GOLDER 2006, /339/; Katzenbach et al. 2010, /507/; 2011, /506/; K+S 2011d, /476/; Katzenbach, Leppla & Seip 2012b, /505/). Die Abdichtung kann durch mineralische Dichtungen, unter speziellen Voraussetzungen einzelner Haldentypen auch durch den Einbau von Kunststoffdichtungsbahnen (KDB) aus HDPE-Materialien[192] oder unter Umständen, je nach Standortbedingungen und Haldentyp, auch durch die Kombination beider erfolgen (▸ Abbildung 86).

Bei den auch im Haldenkern noch über lange Zeit nach der Ablagerung durchlässigen Spülhalden und insbesondere den Absetzbecken für Schlämme ist es Ziel für diese Maßnahmen, eine technisch dichte Barriere zu schaffen, die das Eindringen von Salzlösungen in den geologischen Untergrund verhindern soll. Für die im Haldenkern nach wenigen Jahren durch die bereits erläuterten Prozesse faktisch impermeablen Kompakthalden steht diese Zielstellung nicht im Vordergrund. Aufgrund der sehr gering durchlässigen massiven Kernbereiche der Schüttguthalden wird es hier vielfach als ausreichend angesehen, lediglich die Grundflächen entlang den peripheren Bereiche des Haldenkörpers, also jene Abschnitte, wo der durchlässigere Haldenmantel der Erdoberfläche aufsitzt, auch qualifiziert abzudichten.

Um das Aufspülen der Aufbereitungsrückstände als Suspension zu ermöglichen, bedarf es der Spülhalde selbst als Ablagerungsraum der granularen Feststoffe, sowie des Absetz- und Sammelbeckens für die Klärung und mindestens temporäre Speicherung der Transportlösungen, was ausführlich in Abschnitt 8.1.2.1 erläutert wurde. Die geometrische Konfiguration der Spülhalde einerseits und die Kombination mit den erforderlichen Absetz- und Sammelbecken andererseits sorgen dafür, dass eine weitaus größere Fläche für diese Art der Ablagerung in Anspruch genommen wird, als dies bei einer kompakten Schüttguthalde für die gleiche Masse an festen Aufbereitungsrückständen der Fall wäre. Eine vollständige Abdichtung der gesamten Grundfläche von Spülhalden und den mit ihnen unmittelbar verbundenen Absetzbecken mit Kunststofffolien wäre wegen dieser sehr großen Flächen auch mit sehr hohen Kosten verbunden und wurde bei den heute in Betrieb befindlichen Spülhalden daher nicht durchgeführt. Am relativ jungen Standort Rocanville, Saskatchewan, Kanada, wurden jedoch erstmals alle Sammelbecken für Rückstandslösungen mit Kunststoffdichtungsbahnen abgedichtet, um den Zutritt von Lösungen in den Boden dauerhaft zu vermeiden.



Abbildung 86 Abdichtungs- und Bauarbeiten für das Entwässerungssytem in einer Haldenerweiterungsfläche, a – Vorbereitungsarbeiten für eine Basisabdichtung der Haldengrundfläche im Kaliwerk Rocanville von PCS; b – Einbringen von HDPE-Dichtungsbahnen zur Abdichtung der Grabensysteme an der Haldenperipherie der Halde Heringen des Kaliwerkes Wintershall von K+S [Foto b mit freundlicher Genehmigung von K+S KALI GmbH, Kassel, Deutschland]

192 *High Density Polyethylen*; auf Deutsch: Polyethylen hoher Dichte

Dazu wurden die betreffenden Teile der Grundfläche geotechnisch derart vorbereitet, dass die primär heterogene Bodenschicht vergleichmäßigt und verdichtet wurde, um die Folie selbst vor unverträglichen mechanischen Beanspruchungen zu schützen.

Wie oben bereits erwähnt, erfolgte dann der Auftrag einer weiteren vergleichmässigenden Schicht von ersten Rückständen, bevor in der Folge die Ablagerungen im Spülbetrieb vorgenommen wurden.

In jüngerer Zeit wurde dazu übergegangen, nach der Ertüchtigung der gesamten Ablagerungsgrundfläche und vor dem Beginn des Aufhaldungsbetriebes zunächst eine gleichmäßige Überschüttung der Grundfläche, meist in mehreren Haldenparzellen nacheinander vorzunehmen, so dass ein Schutz der wie auch immer ausgeführten Basisabdichtung und/oder der verdichteten Bodenschichten vor witterungsbedingter Erosion und Rissbildung gewährleistet ist und zum anderen auch differentielle Setzungen in der Dichtungsschicht ausgeschlossen beziehungsweise auf ein tolerierbares Maß minimiert werden können.

8.1.2.4 Haldenbewirtschaftung sowie Anforderungen an das Haldenmonitoring

Unabhängig vom Typus der Ablagerung hat die Haldenbewirtschaftung vor allem zwei maßgebliche Aspekte, den Ablagerungsbetrieb selbst sowie das Sammeln und Speichern der durch Niederschlagseinwirkung am Haldenkörper auftretenden, meist gering mineralisierten Salzlösungen sicherzustellen. Während der Ablagerungsbetrieb und die damit verbundene Entwicklung der beiden Grundtypen von Rückstandshalden der Kaliindustrie in den beiden vorangestellten Abschnitten (▸ Abschnitt 8.1.2.2 und 8.1.2.3) erläutert worden ist, soll nunmehr auf die Bewirtschaftung der Salzlösungen eingegangen und sollen auch die daraus resultierenden Anforderungen für das Haldenmonitoring erläutert werden. Wie bereits erwähnt, sind Art und Aufbau der erforderlichen Entwässerungseinrichtungen durchaus den konkreten Standortbedingungen angepasst, erfüllen aber stets die Aufgaben einer Ableitung der Salzlösungen von der Haldenoberfläche, ihres Sammelns und ihrer zumindest temporären Speicherung. Die Speicherung der Salzlösungen ist vor allem eine notwendige Voraussetzung für ihre anschließende Beseitigung (▸ Abschnitt 8.3) oder auch für die in geringem Umfang an einigen Standorten betriebene Verwertung durch Rückführung in die Lösungskreisläufe der Aufbereitungsanlagen (▸ Kapitel 7).

An den Produktionsstandorten der BELARUSKALI auf der Starobinsker Kalilagerstätte, Republik Belarus (Burak & Pozniak 2007, /137/; Peshchenko & Mychko 2008, /749/), dem Grundprinzip nach aber an allen anderen Standorten ähnlich, erfolgt die Sammlung der durch die Aufhaldung fester Aufbereitungsrückstände (▸ Abschnitt 8.1.2) anfallenden Salzlösungen in abgedichteten Gräben am Rande der Halden. Die Salzlösungen werden von den Gräben kommend zu einem durch Asphalt abgedichteten Vorlagebecken oder einer Pumpstation geleitet. Von dort werden die Salzlösungen in Absetzbecken – die sogenannten Schlammteichen – gepumpt, wo sich die mitgeführten Schwebstoffe, hauptsächlich Tonminerale und auch feinkörnige Sulfate, absetzen. Die Grundflächen der Schlammteiche werden mit geeigneten Kunststofffolien abgedichtet, ebenso wie um die Schlammteiche herum Dämme errichtet werden. Ähnlich wie an den Standorten der Kalidüngemittelproduktion in Saskatchewan auch, sind die Schlammteiche der Kaliwerke um Soligorsk, Belarus, für die dauerhafte Lagerung der Ton-Salz-Suspensionen und der von den Haldenkörpern abfließenden Niederschlagswässer konzipiert und wachsen über die Produktionszeit in ihrer Größe an, was zu einer weiteren Flächeninanspruchnahme zusätzlich zum Haldenkörper selbst führt.

An den großen Standorten der Kaliindustrie in Saskatchewan, Kanada, sind die dort betriebenen Spülhalden flach geneigt und besitzen eine vergleichsweise sehr große Grundfläche (▸ Abschnitt 8.1.2.1), was auch zu einer vergleichsweise großen Kontaktfläche zwischen Niederschlag und Haldenkörper führt. Das kontinentale Klima sorgt hier aber ebenso wie an der Oberen Kama in der Region Perm, Russland, für nur geringe Niederschlagsmengen (▸ Abschnitt 4.3). Die durch die Niederschlagseinwirkung am Haldenkörper entstehenden Salzlösungen werden beiderorts über Entwässerungssysteme den Sammelbecken zugeleitet. In Saskatchewan findet dieses Sammeln und Zwischenspeichern in den Absetzbecken der Rückstandssuspensionen (▸ Abschnitt 8.1.2.1) statt, wo die Salzlösungen auch von ihrem Schwebstoffanteil geklärt werden. An der Oberen Kama sind dies nach Bau und Funktion ähnliche Klärteiche, die hier aber für die separat abgelagerten feinkörnigen Schlammrückstände betrieben werden. Hier kommt es auch zu einer Vermischung der Salzlösungen von den Halden mit den hochmineralisierten Trägerlösungen der Schlammsuspensionen. Die Salzlösungen werden hier zum Teil über längere Zeiträume gespeichert.

Erfahrungstatsachen aus der viele Jahrzehnte währenden Bewirtschaftung von kompakten Rückstandshalden in den verschiedenen Kalirevieren der Welt, darunter auch in Deutschland, belegen, dass die aktive Salzauflösung durch die zutretenden Niederschlagswässer an der räumlich begrenzten Kontaktzone zwischen den Flanken und dem darunter befindlichen, mehr oder minder kompakten Haldenkern stattfindet (▸ Abschnitt 8.1.2.2). Die abströmenden Salzlösungen werden in einem am Fuß der Halde angelegten Grabensystem gesammelt und letztendlich auf der Grundlage behördlicher Genehmigungen kontrolliert beseitigt. Diese Erfahrungstatsachen zeigen auch, dass die aus dem Haldenkörper austretende Menge der Salzlösungen grundsätzlich von den auf die Haldenoberfläche (Haldenkopf und Haldenflanken) einwirkenden Niederschlägen kontrolliert wird.

Die Verweilzeiten der Niederschläge bis zu ihrem Austritt unterliegen dabei Schwankungen, die von der Haldenform, aber auch von der Menge der auftreffenden Niederschläge pro Regenereignis kontrolliert werden. Teilströme, seltener die gesamte Menge dieser gesammelten Salzlösungen, werden an den verschiedenen Produktionsstandorten im Aufbereitungsprozess bei der Herstellung von Kalidüngemitteln verwertet, was bereits im Kapitel 7 anhand ausgewählter Beispiele illustriert wurde.

Das Umweltmonitoring beginnt in der Regel bereits vor dem eigentlichen Ablagerungsbetrieb in einem frühen Stadium der Planungsphase und reicht auch weit über den Zeitraum der Aufhaldung bis in die Nachbetriebsphase. Zumindest gilt dies für die in den vergangenen drei Jahrzehnten neu entwickelten oder auch erweiterten Haldenstandorte und ist auch heutzutage in allen kaliproduzierenden Ländern durch entsprechende wasser-, umwelt-, bau- und/oder bergrechtliche Gesetze, Verordnungen beziehungsweise andere Regelwerke verbindlich vorgeschrieben (▸Kapitel 1). Das Monitoring der Ablagerungsfläche und des Haldenkörpers sowie der im Einwirkungsbereich angesiedelten Schutzgüter zielt grundsätzlich auf die systematische Beobachtung von Umweltauswirkungen und dient der Überwachung solcher Kenndaten, die eine Erkennung der Übereinstimmung oder eben auch der Abweichung von im Planungszeitraum getroffenen Prognosen ermöglichen. Die mit dem Monitoring während des Haldenbetriebes gewonnenen Erkenntnisse bilden letztlich die objektive Entscheidungsgrundlage für die dauerhafte Fortsetzung des bestimmungsgemäßen Betriebes oder für die Einleitung von Veränderungen in der Betriebsführung bis hin zur Einstellung beziehungsweise auch für die Durchführung anderer technischer Maßnahmen.

Dem Monitoring vor Maßnahmebeginn kommt dabei die Aufgabe einer Beweissicherung zu, die den vor Baueingriff und lange vor dem Start des Ablagerungsbetriebes tatsächlich bestehenden Ausgangszustand dokumentiert.

In aller Regel umfasst das Monitoring an den Standorten der Kalidüngemittelproduktion die folgenden Aufgaben:

- Überwachung der vom Einwirkungsbereich erfassten im Einzugsgebiet vorhandenen Grundwasserressourcen und den Haldenstandorten benachbarten Oberflächengewässer, insbesondere im Hinblick auf ihre mögliche Beeinflussung durch am Haldenkörper aufgrund von Niederschlagseinwirkungen zur Entsorgung anfallende Salzlösungen, wozu chemische, physikalische und biologische Kenndaten zur Wasserbeschaffenheit erhoben werden;
- Überwachung der Luft im Umfeld des Haldenkörpers, insbesondere im Hinblick auf ihre mögliche Beeinflussung durch Staubemissionen, wozu chemische und physikalische Kenndaten, auch solche nach meteorologischen Grundsätzen, zur Luftbeschaffenheit erhoben werden;
- Überwachung der Standsicherheit und damit auch der Gebrauchstauglichkeit der Halde als Ablagerungskörper, insbesondere der Haldenböschungen und der Baugrundverhältnisse entlang der Haldenperipherie, wozu morphologische und bodenphysikalische Kenndaten erhoben werden;

sowie

- Überwachung von Lärm infolge des Haldenbetriebes, insbesondere dort, wo Siedlungsgebiete im Einwirkungsbereich liegen, wozu wiederum physikalische Kenndaten erhoben werden.

Art und Umfang wie auch die Genauigkeiten dieser messtechnischen Überwachungsaufgaben variieren natürlich zwischen den drei grundsätzlich zu unterscheidenden Phasen, dem Planungs- und Genehmigungszeitraum vor Beginn der Baumaßnahmen und des Ablagerungsbetriebes, dem eigentlichen Betriebszeitraum der Rückstandshalde und deren Nachbetriebsphase (KK 1983b, /527/; Hart 1985, /373/; Schroth 1990, /898/; Haug & Reid 1991, /376/; Prugger 1992, /785/; ERCOSPLAN 1997, /239/; EC 2004, /225/; 2009, /226/; TMLNU 2005a, /1021/; 2005b, /1022/; TLUG 2006, /1017/; Brown, Heebner & Howe 2009, /129/; K+S 2014b, /489/).

Die Beweissicherung zur Charakterisierung des Ausgangszustandes dient vor allem der Dokumentation, welche natürlichen Schwankungsbreiten für die relevanten Kenndaten vorliegen, so dass im späteren Betrieb möglicherweise auftretende nachteilige Veränderungen rechtzeitig erkannt und erforderlichenfalls auch entsprechende Gegenmaßnahmen eingeleitet werden können. Während des Aufhaldungsbetriebs dient das Monitoring dem rechtzeitigen Erkennen solcher Beeinträchtigungen von relevanten Schutzgütern, die im Planungsstadium nicht vorhersehbar gewesen sind und zielt darüber hinaus darauf, die erfassten Kenndaten auf ihre Übereinstimmung mit prognostizierten Toleranzbereichen zu überwachen, um daraus Rückschlüsse zum bestimmungsgemäßen, also auch umweltverträglichen Betrieb der Abfallbeseitigungsanlage zu ermöglichen. Wie bereits erwähnt, können gegebenenfalls durch das Monitoring identifizierte Abweichungen auch Änderungen der Betriebsweise bis hin zur temporären oder permanenten Einstellung des Ablagerungsbetriebes notwendig oder aber auch der räumlichen und zeitlichen Ausdehnung des Monitoring selbst erforderlich machen. Während der Nachbetriebsphase folgt das Monitoring der Intention, langfristige Prognosewerte zu bestätigen und damit sicher zu belegen, dass Gefährdungen oder Beeinträchtigungen von Schutzgütern nicht zu besorgen sind.

Art und Umfang der im Einzelnen für diese Monitoringaufgaben durchzuführenden Messungen sowie deren Wiederholungsraten sind an den verschiedenen Haldenstandorten der Kalidüngemittelproduktion weltweit recht unterschiedlich und durchaus den dort bestehenden Rahmenbedingungen stark angepasst (Hart 1985, /373/; Beddoes, Roulston &

Streisel 1989, /82/; Schroth 1990, /898/; Haug & Reid 1991, /376/; Prugger 1992, /785/; ERCOSPLAN 1997, /239/; EC 2004, /225/; 2009, /226/; Brown, Heebner & Howe 2009, /129/; K+S 2014b, /489/). Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass eine Haldenbewirtschaftung in unmittelbarer Nähe zu Siedlungsräumen ein intensiveres Monitoring erforderlich macht, wogegen in den sehr dünn besiedelten Prärielandschaften Saskatchewans, wo die Kaliwerke und ihre Haldenstandorte fernab von Städten angesiedelt sind, andere Anforderungen bestehen.

In jüngerer Zeit sind auch Konzepte zur Abdeckung und Begrünung von Rückstandshalden der Kalidüngemittelproduktion parallel zum laufenden Ablagerungsbetrieb diskutiert worden (K+S 2014b, /489/). In solchen Fällen muss das Monitoring auch die Überwachung der Funktionsfähigkeit des Abdecksystems einschließen.

Die im Rahmen des Monitoring gewonnenen Ergebnisse werden laufend ausgewertet, so dass im Falle einer Abweichung der Messdaten von den geplanten und genehmigten Vorgaben auch unmittelbar auf die Betriebsführung Einfluss genommen werden kann. Darüber hinaus werden die Datensätze in mindestens jährlichen Monitoringberichten erfasst und bewertet. In vielen Fällen sind Teile oder auch das gesamte Monitoringprogramm in den Händen von unabhängigen Prüfinstituten oder Gutachtern.

8.1.2.5 Abdeckung und Begrünung des Haldenkörpers

Die zentrale Zielstellung der Oberflächenabdeckung des Haldenkörpers und der Begrünung oder auch der weitergehenden Bepflanzung mit Busch- und Baumwerk besteht in der Einschränkung der Möglichkeiten zur Bildung von Salzlösungen als Folge einer Minimierung des Eintrages von Niederschlagswässern auf die Aufbereitungsrückstände an der Haldenoberfläche (Lenz 1983, /589/; Heinze, Fiedler & Liebmann 1984, /382/; Schroth 1990, /898/; DBU 1993, /186/; Schmeisky, Kunick & Lenz 1993, /886/; ERCOSPLAN 1997, /239/; Lücke 1997, /607/; Schmeisky 1997, /883/; K-UTEC 2001, /463/; 2002, /464/; Gerling 2014c, /326/, Jahn 2014, /449/). Dem Substrat und der Vegetationsschicht kommt dabei die wesentliche Aufgabe zu, die Verdunstungsrate zu erhöhen. Die grundsätzliche Notwendigkeit der Abdeckungs- und Begrünungsmaßnahmen hängt insbesondere von den natürlichen Randbedingungen des individuellen Haldenstandortes ab:

> Überall dort, wo die klimatischen Verhältnisse für nur wenig Niederschlag sorgen, ist der Anfall der im Wechselspiel mit den aufgehaldeten festen Rückständen entstehenden Salzlösungen vergleichsweise gering, so dass die in aller Regel sehr aufwendigen Abdeckungs- und Begrünungsmaßnahmen nicht zur Anwendung kommen. Die Tabelle 38 stellt diese, für die Entscheidung über die Machbarkeit einer Aufhaldung von festen Aufbereitungsrückständen selbst und auch für die Erfordernis einer nachträglichen Abdeckung und Begrünung maßgeblichen klimatischen Randbedingungen für ausgewählte Standorte der Kalidüngemittelproduktion dar, wobei hier die jährliche Niederschlagsmenge als Kriterium der Sortierung herangezogen wurde.
>
> Es verwundert daher nicht, dass für die großen Rückstandshalden in den Kalirevieren in Saskatchewan, Kanada, und in Utah sowie in New Mexico, USA, niemals Abdeckungs- und Begrünungsmaßnahmen versucht wurden, weil die jährlichen Niederschlagsmengen dort deutlich geringer sind, als es zum Beispiel an den Haldenstandorten in Deutschland oder auch in Katalonien, Spanien, der Fall ist. Dies erklärt ferner auch die Tatsache, dass an den Standorten mit den höchsten Niederschlagsmengen, in New Brunswick, Kanada, und in Sergipe, Brasilien, eine dauerhafte Aufhaldung von festen Rückständen an der Erdoberfläche nicht betrieben wird , sondern die unter den dort herrschenden Randbedingungen möglichen Beseitigungsalternativen zur Anwendung kommen (▸ Abschnitte 8.1.1 und 8.1.3 sowie Box 7.1).
>
> Die nachfolgend zu beschreibenden Erfahrungstatsachen gründen sich deshalb ganz besonders auf die Anwendungsfälle im Mutterland der Kaliindustrie und belegen einmal mehr, wie die deutsche Kaliindustrie auch bei der Rückstandsentsorgung den Stand der Technik definiert hat und auch gegenwärtig aktiv an seiner Weiterentwicklung arbeitet.
>
> Abdeckungs- und Begrünungsmaßnahmen sind – oder waren über lange Zeiträume der Produktionsgeschichte – für solche Standorte der Kalidüngemittelproduktion nicht in Erwägung gezogen worden, für welche auf relativ kurzem Wege ozeanische Gewässer für die Beseitigung der durch Aufhaldung fester Aufbereitungsrückstände anfallenden Salzlösungen erreichbar sind, wie dies zum Beispiel für die katalonischen Produktionsstandorte der ICL IBERIA S & S der Fall ist.

Mittlerweile liegen umfangreiche Erfahrungen aus mehr als 50 Jahren zumindest versuchsweise und aus den letzten etwa 30 Jahren auch für ganze Haldenkörper in Deutschland praktizierter Abdeckung vor. Diese Erfahrungstatsachen zeigen, dass die effektiven Möglichkeiten zur Umsetzung einer dauerhaft wirkungsvollen Abdeckung vor allem vom morphologischen Haldentypus diktiert werden:

> Durch die großen Haldenvolumina und auch durch die steilen Flanken der kompakten Schüttguthalden werden spezifische Herausforderungen wie auch Grenzen für eine erfolgreiche Abdeckung der Haldenoberfläche diktiert. Einmal ist es die nach Art und Menge hinreichende Verfügbarkeit geeigneter Abdeckmaterialien, die mindestens die Zeitdauer des Abdeckprozesses, wenn nicht sogar dessen grundsätzliche Machbarkeit bestimmt.

Zum anderen sind es erforderliche vorbereitende bautechnische Veränderungen am Haldenkörper, wie zum Beispiel die Modellierung der Flankenböschungen, die besonders in Regionen intensiver Landnutzung oder in Nachbarschaft von Siedlungsgebieten einer Haldenabdeckung deutliche Grenzen setzen. In diesen Fällen sind sowohl eine weitere Flächeninanspruchnahme an der Peripherie des Haldenkörpers nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich als auch die mit den umfangreichen Erdarbeiten verbundenen Beeinträchtigungen für existierende Wohn- und Gewerbeansiedlung unzumutbar.

Alle Rückstandshalden, gleich welchem morphologischen Typus sie angehören, stellen wegen ihres spezifischen Stoffbestandes sowie ab einer gewissen Größe und der damit verbundenen Höhe aufgrund ihrer mikroklimatischen Verhältnisse für eine Begrünung und ebenso auch für eine weitergehende Bepflanzung mit Busch- und Baumwerk besondere Herausforderungen dar. Die wegen ihrer exponierten Lage intensive Sonneneinstrahlung und starken Windeinwirkungen lassen die Haldenkörper für jede Art der Vegetation zu Extremstandorten werden. Große jahreszeitliche Temperaturschwankungen und auch relativ hohe Schwankungen der Tag-/Nacht-Temperatur sowie ein häufiger, mindestens aber saisonaler Wechsel zwischen einem Wasserüberangebot und langen Trockenperioden, kennzeichnen die Großhalden der Kaliindustrie weltweit.

Erste Untersuchungen zur Begrünung von Halden in Deutschland reichen bis in die 1950er Jahre zurück. Seit den 1970er Jahren, besonders aber ab 1990 wurden vor allem an stillgelegten Rückstandshalden mittlerer Dimensionen in Deutschland umfangreiche konzeptionelle Untersuchungen sowie Labor- und Freilandversuche durchgeführt.

Tabelle 38 Jährlicher Niederschlag, Jahresmitteltemperatur und mittlere Sonnenscheindauer für ausgewählte Standorte der Kalidüngemittelproduktion

Standort, Kalirevier	Jährlicher Niederschlag [mm/a]	Jahresmitteltemperatur [°C]	Mittlere Sonnenscheindauer [h/d]
Safi, Totes Meer, Jordanien	75	25,6	9
Wendover, Great Salt Lake, USA	148	10,4	12
Moab, Utah, USA	223	13,1	12
Carlsbad, New Mexico, USA	324	17,1	10
Cory, Saskatchewan, Kanada	354	2,0	6
Berezniki, Obere Kama, Russland	586	2,4	5
Manresa, Katalonien, Spanien	600	15,0	6
Sigmundshall, Niedersachsen, Deutschland	641	8,8	4
Neuhof-Ellers, Hessen, Deutschland	822	8,8	4
Penobsquis, New Brunswick, Kanada	1.126	5,7	5
Taquari Vassouras, Sergipe, Brasilien	1.409	25,6	7

Alle diese Untersuchungen – die von Anbeginn erfolgreichen, wie auch die letztlich bei der praktischen Erprobung gescheiterten Versuche – haben zur Entwicklung eines mittlerweile ausgereiften Inventars an Methoden und Verfahren beigetragen und erlauben heute für diesen Haldentypus und für Halden vergleichbarer Dimension eine routinemäßige Anwendung dieser Umwelttechnik (Lenz 1983, /589/; Heinze, Fiedler & Liebmann 1984, /382/; DBU 1993, /186/; Schmeisky, Kunick & Lenz 1993, /886/; Minnich 1996, /674/; Lücke 1997, /607/; Schmeisky & Lenz 1998, /885/; Podlacha 1999, /769/; Schmeisky & Hofmann 2000, /884/; K-UTEC 2001, /463/; 2002, /464/; TMLNU 2002, /1020/; 2005a, /1021/; 2005b, /1022/; Hofmann 2003, /405/; Niessing 2005, /709/; Braunisch 2008, /125/; TLUG 2013, /1019/). Seit den 1970er Jahren befasste sich in der Bundesrepublik Deutschland eine länderübergreifende Arbeitsgruppe mit Fragen der Haldenabdeckung. In zahlreichen wissenschaftlichen Berichten und Publikationen sind die Ergebnisse der interdisziplinären F/E-Arbeiten umfassend dokumentiert worden.

Synoptisch lassen sich im Rahmen der hier gebotenen Kürze die wesentlichsten Ergebnisse in folgender Weise formulieren: Insbesondere aufgrund der steilen Haldenflanken mit Böschungsneigungen von bis zu 38° und Haldenhöhen von mehr als über 100 Meter ist eine standsichere Abdeckung mit rein mineralischen Erdstoffen nicht möglich. Ebenso scheiterten Abdeckversuche mit Geokunststoffen und verschiedene Mischungen mit Zement, Flugasche und Textilfasern. Frühe Erfolge konnten an nicht mehr aktiven kleinen und mittelgroßen Halden erzielt werden. Je nach Haldengeometrie und Haldeninventar, aber auch in Abhängigkeit von der Flächenverfügbarkeit im unmittelbaren Haldenumfeld wurden verschiedene Abdecksysteme entwickelt und angewendet. An anhydrit- und tonhaltigen Halden, an deren Oberfläche die leichtlöslichen Salze bereits weggelöst waren und bereits ohne Kultivierung ein gewisses Pflanzenwachstum stattgefunden hatte, konzentrierte man sich zunächst auf die Verbreitung der vorhandenen und in der Folge auch auf die Ansiedlung weiterer geeigneter Pflanzenarten. Andere Begrünungsversuche erfolgten in der Form, dass begrünungsfähige Bodensubstrate aus Aschen und Kompost aufgebracht wurden (Schmeisky, Kunick & Lenz 1993, /886/).

Umfangreiche Untersuchungen zur Begrünung von nicht mehr aktiven Halden erfolgten in den 1990er Jahren an Halden im ehemaligen Südharz-Kalirevier in Thüringen, Deutschland, fast unmittelbar nach der Einstellung der Kalidüngemittelproduktion an diesen Standorten. Die Ergebnisse der umfangreichen Versuche mit unterschiedlichen Materialien wie Bauschutt, Aschen, Bodenaushub, Klärschlamm sowie Kompost und unter Beachtung der Haldengeometrie, des Haldeninventars und der Flächenverfügbarkeit führten letztendlich zur Einführung eines im Freistaat Thüringen verbindlichen Regelwerkes, der sogenannten Kalihalden-Richtlinie (TMLNU 2002, /1020/), die die Grundlage für die Abdeckung und Begrünung der Rückstandshalden in Thüringen bildete. Neben der Festlegung von einsetzbaren Materialien, die sich an den Empfehlungen des LAB (2004, /577/) orientieren, enthält diese Richtlinie insbesondere konkrete Anforderungen an eine mehrschichtige Abdeckung, bestehend aus einer kapillarbrechenden Abdeckschicht, einer konturgebenden Abdeckschicht sowie einer darüber lagernden Kulturschicht. Die unterschiedlichen Anforderungen an die einzelnen Abdeckschichten wurden in dieser Richtlinie ebenfalls definiert. Ferner werden ein lagenweiser Einbau vorgeschrieben und zur Gewährleistung einer dauerstandsicheren Böschung die Einhaltung einer Generalneigung von maximal 1:2,5 sowie die Anlage von zusätzlichen Bermen angeordnet. Weiterhin enthält die Kalihaldenrichtlinie Festlegungen zur Mindestmächtigkeit der Abdeckschichten im Plateaubereich und zu entsprechenden Entwässerungseinrichtungen. In Anwendung dieser Richtlinie konnten bislang an den Halden der heute stillgelegten Kaliproduktionsstandorte Bleicherode, Sondershausen, Sollstedt und Volkenroda beachtliche Erfolge bei der Abdeckung und Begrünung, respektive der Bepflanzung mit Busch- und Baumwerk erzielt werden (▸ Abbildung 87). Die Kalihalden-Richtlinie befindet sich derzeit in Überarbeitung. Nicht gänzlich analog, doch aber in wesentlichen Ausführungsgrundsätzen sehr ähnlich, erfolgt auch die Abdeckung von Althalden im Hannoverschen Kalirevier in Niedersachsen, Deutschland (Gerling 2009, /323/; Jahn 2014, /449/).

Eine Abdeckung von heute noch aktiven kompakten Schüttguthalden wird derzeit weltweit nur im Kaliwerk Sigmundshall, Deutschland, von K+S praktiziert, wo zur Abdeckung Steinsalz-haltige Tonerderückstände aus der Wiederaufarbeitung von Schlacke verwendet werden, die beim Schmelzen von Aluminiumschrott entsteht (▸ Abbildung 88). Nach dem einige Jahre in Anspruch nehmenden Herauslösen des Steinsalzes aus den Tonerderückständen in der oberflächennahen, einige Dezimeter mächtigen Schicht wird nachfolgend eine Begrünung aufgebracht. Zur Stabilisierung der Tonerderückstände werden Aschen mit puzzolanischen Eigenschaften[193] beigemischt, die nicht nur über ein hohes Wasserspeichervermögen verfügen, sondern

193 Hier wird unter puzzolanischen Eigenschaften insbesondere die allgemeine Fähigkeit des Abbindens solcher Abdeckmaterialien verstanden, nicht zwingend auf die puzzolanische Reaktion von Calciumhydroxid und Siliziumdioxid zu Calciumsilikathydraten, wie sie in der Baustoffkunde Bedeutung besitzt, reflektiert.



Abbildung 87 Annähernd vollständig abgedeckte und begrünte Rückstandshalde des ehemaligen Kaliwerkes Bleicherode, Südharz-Kalirevier, Deutschland: Die nachträgliche Modellierung des Haldenkörpers, seine Abdeckung und Begrünung begann nach Einstellung des Ablagerungsbetriebes im Zuge der Beendigung der Kalidüngemittelproduktion Anfang der 1990er Jahre. Auf dem südlichen Teil des Haldenplateaus sind Anlagen zur Erzeugung von Solarenergie installiert.

auch standsicher bei Böschungsneigungen entsprechend dem natürlichen Schüttwinkel des Rückstandes aufgebracht werden können (Schmeisky & Lenz 1998, /885/; Wöhler 1999, /1126/; Scheer 2000, /876/; 2001, /877/). Das Aufbringen der Abdeckung erfolgt durch Schüttung vom Haldentop aus mittels Bandanlagen und Absetzer als sogenannte Dünnschichtabdeckung mit einer minimalen Mächtigkeit von 4 Meter.

Auch an weiteren Kompakthalden in Deutschland laufen derzeit unterschiedliche Forschungsprojekte für Dünnschichtabdeckungen unter weitestgehender Beibehaltung des natürlichen Schüttwinkels des Rückstandes und somit einem vergleichsweise geringen zusätzlichen Flächenbedarf für die Abdeckung (Gerling 2009, /323/; Jahn 2014, /449/; K+S 2014b, /489/).

Grundsätzlich sind die technische Machbarkeit und die Art der Haldenabdeckung maßgeblich von der Haldengeometrie, der Flächenverfügbarkeit und der Gewährleistung der Standsicherheit der Abdeckung unter den konkreten Standortverhältnissen abhängig. Während für die kleinen und mittelgroßen Althalden bereits in der Vergangenheit Verfahren zur Abdeckung etabliert werden konnten, gibt es insbesondere für die großen, noch aktiven Kompakthalden bis auf die oben genannte Ausnahme keine in der industriellen Praxis eingesetzten Verfahren.

Im Zusammenhang mit der geplanten Wiederinbetriebnahme des Hartsalzwerkes Siegfried-Giesen, Niedersachsen, Deutschland, wurde durch K+S eine auf die konkreten Standortverhältnisse angepasste Abdeckvariante entwickelt. Es ist vorgesehen, parallel zum Ablagerungsbetrieb der Halde bereits vollständig aufgeschüttete Abschnitte des segmentierten Haldenkörpers abzudecken und in der Folge zu begrünen (K+S 2011c, /475/; Waldmann & Eichholtz 2014, /1088/). Der Haldenkörper erhält flache Böschungen und eine Höhe von deutlich unter 100 Meter. Beides sind die maßgeblichen Voraussetzungen für das Aufbringen einer der Abdeckvariante entsprechenden, standsicheren, mineralischen Abdeckung. Die Umsetzung dieser bereits in den 1970er Jahren für die kompakten Schüttguthalden entwickelten grundlegenden Idee (Schroth 1973a, /896/; 1973b, /897/; 1990, /898/; Lenz 1983, /589/) beinhaltet eine mehrschichtige Oberflächenabdeckung. Diese pro Schicht mehr- oder einlagig aufgetragene Abdeckung ist letztlich erforderlich, um den Pflanzengesellschaften ein dauerhaftes Überleben auf der Rückstandshalde zu ermöglichen.



Abbildung 88 Partiell abgedeckte und begrünte Rückstandshalde des Kaliwerkes Sigmundshall, Hannoversches Kalirevier, Deutschland: Die Modellierung des Haldenkörpers, seine Abdeckung und Begrünung erfolgt in dem Abschnitt, wo der Ablagerungsbetrieb bereits eingestellt ist, während in anderen Teilen der Halde dieser weitergeführt wird.

Eine solche mehrschichtige Oberflächenabdeckung – im Beispiel des zukünftigen Standortes Siegfried-Giesen auch als Abdecksystem bezeichnet – besteht aus folgenden funktionalen Einheiten:

Die unterste Lage des Abdecksystems bildet eine mineralische Dichtungsschicht, über der eine Drainageschicht angeordnet ist, die das aus der wiederum darüber liegenden, sogenannten Wasserhaushaltsschicht zusickernde Niederschlagswasser sammelt und über ein internes Drainagesystem den Entwässerungsgräben am Haldenfuß zuführt. Dadurch soll dauerhaft gewährleistet werden, dass die Niederschläge relativ schnell aus dem Abdecksystem abgeleitet werden und durch die mineralische Dichtung am Eindringen in den Haldenkörper gehindert werden. Gemeinsam mit der Wasserhaushaltsschicht bildet die darüber angeordnete Oberbodenschicht den Nährboden für die zur Begrünung erforderlichen Pflanzengesellschaften.

Diese Variante ist jedoch nur umsetzbar, weil die am zukünftigen Produktionsstandort Siegfried-Giesen aufzuhaldenden Rückstandsmengen vergleichsweise gering sind. Daher ist dieses Verfahren auch in seinen Grundsätzen nicht pauschal auf andere oder Altstandorte übertragbar.

Wie bereits erwähnt, blieben solche gezielten F/E-Arbeiten wie auch die Umsetzung der Resultate dieser in die industrielle Praxis bislang auf das Mutterland der Kaliindustrie und auf den hier vorherrschenden Typ der kompakten Schüttguthalden beschränkt, werden aber mittlerweile auch am gleichen Haldentypus bei ICL IBERIA S & S, Spanien, praktiziert. Vergleichbare Überlegungen wurden auch für die Nachbetriebsphase der großen Spülhalden in Saskatchewan, Kanada angestellt (Reid & Getzlaf 2004, /823/; Liemen, Bernsdorf & Meissner 2010, /592/), allerdings bislang nicht in situ erprobt oder gar in der Praxis umgesetzt.

8.1.3 Auflösung der festen Aufbereitungsrückstände und deren Beseitigung in flüssiger Form

Eine besondere Gruppe flüssiger Aufbereitungsrückstände entsteht, indem die festen Rückstände vollständig aufgelöst oder mindestens in Suspension gebracht werden, was im aktiven Kalibergbau von den Produzenten VALE im Kaliwerk Taquari-Vassouras im Teilstaat Sergipe, Brasilien, von ICL im Kaliwerk Boulby, im Borough of Redcar and Cleveland, Großbritannien, und an verschiedenen Produktionsstandorten der Produzenten PCS, MOSAIC und AGRIUM in Saskatchewan, Kanada, und USA, betrieben wird (▸ Tabelle 39). Zur weiteren Beseitigung gelangen diese Anteile der ursprünglich festen Aufbereitungsrückstände – als speziell für diesen Beseitigungspfad aufbereitet – vielfach gemeinsam mit den flüssigen Rückständen (▸ Abschnitt 8.2) und/oder den bei der Aufhaldung der festen Aufbereitungsrückstände infolge der Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen (▸ Abschnitt 8.3). Die Nutzbarkeit dieses Beseitigungspfades erfordert wiederum spezifische naturräumliche und infrastrukturelle Randbedingungen am Produktions- beziehungsweise am Entsorgungsstandort. Die Nachbarschaft zum Meer und/oder zu wasserreichen Flüssen oder aber das Vorhandensein geeigneter Poren- oder Kluftspeichergesteine im geologischen Untergrund sind hierfür notwendige Rahmenbedingungen.

Tabelle 39 gibt für die wichtigsten Kalidüngemittelproduzenten an, in welchem Umfang feste Rückstände zunächst gelöst oder in Suspension gebracht und anschließend in flüssiger Form beseitigt werden.

Tabelle 39 Masseverhältnisse zwischen bergmännisch gewonnenem und gefördertem festen Rohsalz und den nach Auflösung mittels Einleitung in Oberflächengewässer oder durch Versenkung in den geologischen Untergrund beseitigten festen Aufbereitungsrückständen für ausgewählte Kalidüngemittelproduzenten im Jahr 2011

Kalidüngemittel-produzent	Land	Rohsalz-gewinnung [10^6 t]	Lösen und Entsorgen von Rückständen [10^6 t]	Prozentualer Anteil[194] [%]
PCS	Kanada	27,18	4,45	16,4
MOSAIC	Kanada, USA	21,87	4,24	19,4
ICL	Spanien, Großbritannien	5,49	2,47	45,0
AGRIUM	Kanada	5,59	0,68	12,2
VALE	Brasilien	2,24	1,63	72,8

8.2 Beseitigung flüssiger Aufbereitungsrückstände

Neben festen Rückständen fallen sowohl bei der Aufbereitung fester Kalirohsalze aus Bergmännischer Gewinnung als auch bei der Aufbereitung technischer Lösungen aus der Soltechnischen Gewinnung fester Kalisalzlagerstätten sowie bei der Nutzung natürlicher Lösungen in der Kalidüngemittelproduktion auch flüssige Rückstände in Form wässriger Salzlösungen an. Eine Übersicht zu den Beseitigungswegen für die flüssigen Aufbereitungsrückstände an den weltweit insgesamt 71 Standorten, die im Jahr 2014 im planmäßigen industriellen Betrieb zur Kalidüngemittelproduktion genutzt wurde, zeigt Tabelle 40.

194 Der prozentuale Anteil ist der Quotient aus der jährlichen Rückstandsmenge zur Gewinnungsmenge.

Tabelle 40 Übersicht zu den Beseitigungspfaden für die an den Standorten der Kalidüngemittelproduktion anfallenden flüssigen Aufbereitungsrückstände (▶Tabelle 1)

Produzent/Standort[5]	Flüssige Rückstände aus ...	Beseitigungspfade
URALKALI		
Solikamsk 3	... Flotation	Einleitung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in Sammelbecken und Verbringen eines Teiles der flüssigen Aufbereitungsrückstände nach unter Tage
Berezniki 4	... Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	Einleitung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in Sammelbecken und Verbringen eines Teiles der flüssigen Aufbereitungsrückstände nach unter Tage
Solikamsk 2	... Flotation	Einleitung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in Sammelbecken und Verbringen eines Teiles der flüssigen Aufbereitungsrückstände nach unter Tage
Berezniki 3	... Flotation	Einleitung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in Sammelbecken und Verbringen eines Teiles der flüssigen Aufbereitungsrückstände nach unter Tage
Berezniki 2	... Flotation	Einleitung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in Sammelbecken und Verbringen eines Teiles der flüssigen Aufbereitungsrückstände nach unter Tage
Solikamsk 1	... Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	Einleitung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in Sammelbecken und Verbringen eines Teiles der flüssigen Aufbereitungsrückstände nach unter Tage
PCS		
Lanigan	... Flotation sowie Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	Versenkung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in den geologischen Untergrund
Rocanville	... Flotation	Versenkung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in den geologischen Untergrund
Allan	... Flotation sowie Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	Versenkung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in den geologischen Untergrund
Cory	... Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation sowie Floation	Versenkung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in den geologischen Untergrund
New Brunswick[7]	... Flotation sowie Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	Einleitung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in die Bay of Fundy, resp. den Nordatlantik
Patience Lake	... Soltechnischer Gewinnung und natürlicher Kühlkristallisation	Rückführung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in das abgesoffene Bergwerk und Versenkung in den geologischen Untergrund

Produzent/Standort[5]	Flüssige Rückstände aus ...	Beseitigungspfade
MOSAIC		
Esterhazy K1	... Flotation	Versenkung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in den geologischen Untergrund
Esterhazy K2	... Schweretrennung sowie Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	Versenkung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in den geologischen Untergrund
Belle Plaine	... Soltechnischer Gewinnung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation sowie natürlicher Kühlkristallisation	Rückführung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in die Kavernen und Versenkung in den geologischen Untergrund
Colonsay	... Flotation sowie Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	Versenkung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in den geologischen Untergrund
Carlsbad	... Flotation	Einleitung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in Sammelbecken
Hersey[9]	... Soltechnischer Gewinnung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	Versenkung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in den geologischen Untergrund
BELARUSKALI		
Soligorsk 4	... Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	Einleitung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in Sammelbecken und Verbringen eines Teiles der flüssigen Aufbereitungsrückstände nach unter Tage sowie Versenkung in den geologischen Untergrund
Soligorsk 3	... Flotation	Einleitung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in Sammelbecken und Verbringen eines Teiles der flüssigen Aufbereitungsrückstände nach unter Tage sowie Versenkung in den geologischen Untergrund
Soligorsk 2	... Flotation	Einleitung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in Sammelbecken und Verbringen eines Teiles der flüssigen Aufbereitungsrückstände nach unter Tage sowie Versenkung in den geologischen Untergrund
Soligorsk 1	... Flotation	Einleitung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in Sammelbecken und Verbringen eines Teiles der flüssigen Aufbereitungsrückstände nach unter Tage sowie Versenkung in den geologischen Untergrund
CHINA		
Mindestens 24 Standorte unterschiedlicher Größe	... solarer Evaporation und natürlicher Kristallisation, an einzelnen Standorten auch kombiniert mit Flotation und/oder technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	Rückführung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in die Salzseen

Produzent/Standort[5]	Flüssige Rückstände aus ...	Beseitigungspfade
K+S		
Verbundwerk Werra, bestehend aus den Standorten:		
Wintershall	... Flotation, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation sowie ESTA®	Versenkung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in den geologischen Untergrund sowie Einleitung in Fließgewässer und damit Weitertransport zur Nordsee
Hattorf	... Flotation, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation sowie ESTA®	Versenkung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in den geologischen Untergrund sowie Einleitung in Fließgewässer und damit Weitertransport zur Nordsee
Unterbreizbach	... Flotation sowie Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	Versenkung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in den geologischen Untergrund sowie Einleitung in Fließgewässer und damit Weitertransport zur Nordsee
Zielitz	... Flotation sowie Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	Einleitung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in die in Fließgewässer und damit Weitertransport zur Nordsee
Neuhof-Ellers	... Flotation und ESTA®	Einleitung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in die in Fließgewässer und damit Weitertransport zur Nordsee
Sigmundshall	... Flotation, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation sowie ESTA®	Einleitung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in die Fließgewässer und damit Weitertransport zur Nordsee
DSW		
Dead Sea	... solarer Evaporation und natürlicher Kristallisation, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation sowie Flotation	Rückführung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in das Tote Meer
ICL IBERIA S & S		
Súria	... Flotation	Einleitung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in das Mittelmeer
Sallent	... Flotation	Einleitung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in das Mittelmeer
CPL		
Boulby	... Flotation sowie Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	Einleitung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in die Nordsee
APC		
Safi	... solarer Evaporation und natürlicher Kristallisation, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation sowie Flotation	Rückführung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in das Tote Meer

Produzent/Standort[5]	Flüssige Rückstände aus ...	Beseitigungspfade
AGRIUM		
Vanscoy	... Flotation sowie Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	Versenkung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in den geologischen Untergrund
SQM		
Salar de Atacama	... solarer Evaporation und natürlicher Kristallisation sowie Flotation	Rückführung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in den Salar de Atacama
INTREPID		
Carlsbad East	... Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	Einleitung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in Sammelbecken
Carlsbad West	... Flotation	Einleitung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in Sammelbecken
Moab	... solarer Evaporation und natürlicher Kristallisation sowie Flotation	Rückführung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in das abgesoffene Bergwerk
Wendover	... solarer Evaporation und natürlicher Kristallisation sowie Flotation	Rückführung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in den Great Salt Lake
VALE		
Taquari-Vassouras	... Flotation	Einleitung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in den Südatlantik
COMPASS		
Great Salt Lake	... solarer Evaporation und natürlicher Kristallisation, Flotation sowie technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	Rückführung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in den Great Salt Lake
UZKIMYOSANAT		
Dechkanabad	... Flotation	Einleitung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in Sammelbecken
DEUSA		
Kehmstedt/Bleicherode	... Soltechnischer Gewinnung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	Rückführung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in die Kavernen und Einleitung in die Fließgewässer und damit Weitertransport zur Nordsee

Wie hoch neben spezifischen Wertstoffverlusten und Verbrauchsmengen an Reagenzien auch die im Aufbereitungsprozess anfallenden spezifischen Mengen flüssiger Aufbereitungsrückstände pro Tonne Produkt ausfallen, hängt wesentlich vom zur Anwendung kommenden Aufbereitungsverfahren sowie der Rohsalzzusammensetzung ab. Obwohl der Wassereintrag in die verschiedenartigen, auf die individuelle Rohstoffzusammensetzung und andere, naturgegebene Einflussfaktoren hin optimierten Aufbereitungsprozesse stets minimiert und auch die Betriebsweise der Aufbereitungsanlagen auf multiple Lösungsrückführung bedacht ist, treten dennoch überschüssige Volumenströme auf (Schroth 1973b, /897/; Reid 1984, /822/; Scharf 1990, /875/; Tallin, Pufahl & Barbour 1990, /998/; Reid & Maki 1991, /826/; UNIDO 1998, /1043/; UNEP & IFA 2001, /1042/; Stahl et al. 2005, /973/; RESCAN 2008, /829/; URALKALI 2011c, /1047/). Um einen stabil arbeitenden Aufbereitungsprozess und damit auch das Wertstoffausbringen sicherzustellen, müssen diese überschüssigen Volumenanteile aus den umlaufenden Lösungsströmen entfernt werden. Art und Menge dieser Überschusslösungen variieren zwischen den verschiedenen Rohsalzarten und Aufbereitungsmethoden erheblich. Dieser Umstand besitzt insbesondere dort eine große Bedeutung, wo aufgrund der lagerstättengeologischen Randbedingungen im Aufbereitungsprozess höhere Anteile von $MgCl_2$ reguliert werden müssen.

Verantwortlich hierfür sind die im festen Rohsalz beziehungsweise die nach der solaren Eindunstung natürlicher Lösungen im Kristallisatzwischenprodukt enthaltenen Anteile von Carnallit. Sowohl in der Flotation als auch bei der Heißverlösung wirken sich hohe $MgCl_2$-Gehalte in der Umlauflösung nachteilig auf das Wertstoffausbringen aus und sind daher im Sinne einer nachhaltigen Ressourcennutzung zu vermeiden. Dabei wird die Menge der abzustoßenden Lösung maßgeblich durch den Carnallit-Gehalt des zu verarbeitenden Rohsalzes bestimmt. Die Steuerung des $MgCl_2$-Gehaltes in den umlaufenden Lösungen erfolgt durch Zufuhr von frischem Prozesswasser, das heißt durch die Verdünnung der zwischen den Prozessschritten umlaufenden Lösungen. Tabelle 41 veranschaulicht für die beiden – nach ihrem Anteil an der Weltkaliproduktion – wichtigsten Verfahren zur Aufbereitung fester Kalirohsalze aus Bergmännischer Gewinnung, die Flotation und die Heißverlösung sylvinitischer Rohsalze, wie hoch die spezifischen Wertstoffverluste, die Verbrauchsmengen an Reagenzien und die dabei anfallenden spezifischen Mengen flüssiger Aufbereitungsrückstände pro Tonne Produkt für die wesentlichsten Verfahren und damit für die wichtigsten Standorte der Kalidüngemittelproduktion im Mittel sind.

Während in den Sylvinitflotationsbetrieben in Saskatchewan, Kanada, und an der Oberen Kama, Russland, pro Tonne Fertigprodukt zwischen 0,3 und 1,1 Tonnen flüssige Aufbereitungsrückstände anfallen, sind es aufgrund der geringeren KCl-Gehalte und vor allem der hohen Carnallit-Gehalte im Rohsalz des Verbundwerkes Werra, Deutschland, durchschnittlich 3,7 Kubikmeter Rückstandslösungen pro Tonne Fertigprodukt (ERCOSPLAN 2015, /255/).

Diese sachlichen Zwänge, wie auch die aus diesen lagerstättengeologischen Randbedingungen resultierende Notwendigkeit der Beseitigung der harten[195] $MgCl_2$-haltigen flüssigen Aufbereitungsrückstände und die damit verbundene Umweltbeeinflussung sind seit der Frühzeit der industriellen Kalidüngemittelproduktion Gegenstand intensiver geowissenschaftlicher und technischer Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungstätigkeit gewesen (▸Box 2.1). Da die einfache Einleitung in Flüsse aufgrund der in den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts gewachsenen Produktionskapazität nicht mehr als alleinige Beseitigungsmöglichkeit ausreichte, wurden für die deutschen Kaliwerke an der Werra und Fulda letztlich die Verfahren zur Versenkung (▸Abbildung 89) und Pufferspeicherung der flüssigen Rückstände in den Versenkhorizont Plattendolomit (Zechstein 3, Oberes Perm) sowie zur Salzfrachtsteuerung entwickelt (Beyschlag & Fulda 1921, /96/; Deubel 1942, /194/; 1948, /195/; 1954, /196/; Stolle 1958, /981/; Haase 1963, /359/; Finkenwirth 1964, /276/; Hoppe 1964, /412/;Poschke 1965, /771/; Finkenwirth & Fritsche 1993, /274/; Skowronek et al. 1999, /949/; Fritsche 2000, /293/; Käbel 2006, /493/). Aber auch schon in den 1920er Jahren wurde – ähnlich wie derzeit am Runden Tisch "Gewässerschutz Werra/Weser und Kaliproduktion" – die Möglichkeit einer Entsorgung dieser flüssigen Aufbereitungsrückstände direkt in das Meerwasser der Nordsee untersucht. In anderen kaliproduzierenden Ländern wurden die im Mutterland der Kaliindustrie vorab gewonnenen Erfahrungen genutzt und auf die dort bestehenden naturräumlichen, lagerstättengeologischen und montanhydrogeologischen Randbedingungen adaptiert. So verwundert es nicht, dass weltweit auch bis heute diese beiden grundsätzlichen Entsorgungspfade für die flüssigen Rückstände Bedeutung haben.

Wie bereits erwähnt, ist der unvermeidbare Anfall von Aufbereitungsrückständen bei der Kalidüngemittelproduktion allein durch die mineralogische und chemische Zusammensetzung der natürlichen Rohstoffe begründet und deshalb keineswegs auf die Aufbereitung fester Kalirohsalze oder etwa die Bergmännische Gewinnung derselben beschränkt.

195 Die sogenannte Wasserhärte bezeichnet die Äquivalentkonzentration der im Wasser gelösten Ionen der Erdalkalimetalle, wobei das Mg im hier zur Rede stehenden Zusammenhang der wesentliche Härtebildner ist.

Auch bei der Soltechnischen Gewinnung fester Kalirohsalze aus dem geologischen Untergrund (▸ Abschnitte 5.1.2 und 6.2), wie auch bei der solaren Evaporation natürlicher Salzlösungen (▸ Abschnitte 5.2 und 6.3) und der Weiterverarbeitung der dabei als Zwischenprodukt entstehenden Kristallisate zu verkaufsfähigen Fertigprodukten, fallen flüssige Rückstände an (▸ Kapitel 7 und Tabelle 32).

Für die Beseitigung dieser direkt als wässrige Lösungen aus dem Aufbereitungsprozess abgeführten Rückstände werden in der Kaliindustrie weltweit 2 unterschiedliche Methoden genutzt:

Seit den Anfängen der Kaliindustrie werden flüssige Aufbereitungsrückstände durch Einleitung in Fließgewässer und damit Zuführung zum Meer beseitigt. Eine andere Möglichkeit stellt die Versenkung der flüssigen Rückstände in Speichergesteine im geologischen Untergrund dar.

Welche Entsorgungspfade an den einzelnen Standorten zur Verfügung stehen, ist in Tabelle 40 aufgeführt und fand für einzelne Standorte exemplarisch auch bereits im Abschnitt 8.1.3 Erläuterung.



Abbildung 89 Bohrlochkopf und Pumpenhaus einer Versenkbohrung von K+S im Werra-Kalirevier, Deutschland [Foto mit freundlicher Genehmigung von K+S KALI GmbH, Kassel, Deutschland]

Resultierend aus der jeweiligen geografischen Position der beiden Schwerpunkte der Kalidüngemittelproduktion steht in Saskatchewan, Kanada, und auch an der Oberen Kama in der Region Perm, Russland, ein kurzer Entsorgungspfad zu ozeanischen Gewässern nicht zur Verfügung. Aus diesem Grund erfolgt zum Beispiel in Saskatchewan die Beseitigung der flüssigen Aufbereitungsrückstände durch Versenkung in geeignete Speichergesteine weit unterhalb der Gewinnungshorizonte. In dem nördlichen Kalirevier von Saskatchewan, um Saskatoon gelegen, werden von den auf Basis Bergmännischer Gewinnung fester Kalirohsalze produzierenden Kaliwerken Allan und Cory, beide PCS, vom Kaliwerk Vanscoy, AGRIUM, sowie von den auf Grundlage Soltechnischer Gewinnung betriebenen Kaliwerken Belle Plaine, MOSAIC, und Patience Lake, PCS, die porösen Sandstein-Horizonte der *Deadwood-Winnipeg Clastics* (Kambro-Ordovizium) zur Beseitigung der flüssigen Rückstände genutzt. Die im südlichen Saskatchewan, nahe Esterhazy gelegenen und Bergmännische Gewinnung fester Kalirohsalze betreibenden Kaliwerke Rocanville, PCS, und K1/K2, MOSAIC, nutzen dafür die Kluftspeicher der *Interlake Carbonates* (Silur).

Tabelle 41 Gegenüberstellung von Wertstoffverlusten, Verbrauchsmengen an Reagenzien in verschiedenartigen Aufbereitungsverfahren für sylvinitische Rohsalze und dabei anfallenden festen bzw. flüssigen Aufbereitungsrückständen

			Verhältnis Rückstand/Produkt[196]	
Aufbereitungsverfahren	**Verluste [KCl %]**	**Reagenzien [g/$t_{Rohsalz}$]**	**Feste Rückstände [t/$t_{Produkt}$]**	**Flüssige Rückstände [t/$t_{Produkt}$]**
Flotation	17,8	286	2,0	0,84
Heißverlösung	15,0	77	1,8	0,38

196 Diese Werte werden bei beiden Verfahren stark von Art und Menge der Begleitmineralien im Rohsalz beeinflusst.

Die geografischen Positionen der Produktionsstandorte Taquari-Vassouras nahe der Atlantikküste im Teilstaat Sergipe, Brasilien, gelegen, oder Boulby nahe der Nordseeküste im Borough of Redcar and Cleveland, Großbritannien, oder auch der katalonischen Kaliwerke unweit der Mittelmeerküste, Spanien, sowie des Kaliwerkes New Brunswick, Kanada, ermöglichen hingegen die Beseitigung der flüssigen Aufbereitungsrückstände, zum Teil auch gemeinsam mit aufgelösten Anteilen der festen Rückstände, auf kurzem Wege direkt ins Meer.

Für die deutschen Kaliwerke, und bis vor wenigen Jahren auch für die französischen, waren solche ozeanischen Gewässer für die flüssigen Abfälle nur über Fließgewässer wie Ulster, Werra und Weser oder, im Falle der elsässischen Werke, den Rhein erreichbar. Bei der Soltechnischen Gewinnung von Carnallitit fallen ebenfalls große Mengen $MgCl_2$-Lösungen an. Im Kaliwerk Bleicherode/Kehmstedt, wo DEUSA die weltweit einzige Anlage betreibt, die diese Methode heute anwendet, sind dies etwa 0,8 Tonnen $MgCl_2$-Lösung pro Tonne feuchtes KCl-Produkt. Hier wird angestrebt, einen Großteil des $MgCl_2$ als Bischofit-Produkt zu vermarkten. Dennoch fallen auch hier jährlich einige Tausend Tonnen $MgCl_2$-Lösungen zur Beseitigung an (van der Klauw & Grüschow 2007, /1058/; ERCOSPLAN 2012, /254/; 2015, /255/).

Bei der Produktion von Kalidüngemitteln aus den natürlichen Lösungen des Toten Meeres fallen etwa 8,8 Tonnen feste Rückstände fast ausschließlich als NaCl und außerdem 1,6 Tonnen flüssige Rückstände als $MgCl_2$-Lösung an. Die flüssigen Rückstände betragen jährlich etwa 1,3 Kubikmeter pro Tonne Fertigprodukt.

Bei der Kalidüngemittelproduktion des jordanischen Produzenten APC werden am Toten Meer diese festen, aber durch anhaftende Salzlösungen fabrikfeuchten Rückstände als Suspension in einem Schlammteich zur Entwässerung abgelagert. Die dieser Suspension anhaftende Lösung stammt vornehmlich aus der Carnallit-Zersetzung und besitzt somit einen hohen $MgCl_2$-Gehalt. Die hier durch Entwässerung der Suspension und aus (wenigen) Niederschlagswässern resultierenden flüssigen Rückstände werden über Grabensysteme in einem Becken gesammelt und von dort in Sedimentationsbecken zur Klärung eingeleitet, wo sich die unlöslichen, meist aus Tonmineralen bestehenden Bestandteile absetzen. Die geklärte Lösung wird weiter in das letzte Verdunstungsbecken eingeleitet und dort mit ihrem Rest-Wertstoffgehalt von wenigen Prozent KCl bei der Carnallit-Kristallisation verwertet. Aber auch dabei entsteht ein Teilstrom an $MgCl_2$-Lösung, die als Überschusslauge aus dem letzten Carnallit-Verdunstungsbecken zurück in das natürliche Seewasser des Toten Meeres gepumpt wird.

Alle Aufbereitungsrückstände der Sylvinitflotation des Kaliwerkes Taquari-Vassouras, im Teilstaat Sergipe, Brasilien, also die festen und die in flüssiger Form anfallenden, werden als feststofffreie Lösungen in den Südatlantik beseitigt. Aus der jährlichen Produktion von etwa 800.000 Tonnen Fertigprodukten fallen in Taquari-Vassouras etwa 1,4 Millionen Tonnen feste Rückstände an. Diese Rückstände bestehen hauptsächlich aus NaCl, werden in Meerwasser aufgelöst und über eine Rohrleitung von etwa 40 Kilometer Länge in den Südatlantik eingeleitet.

In vergleichbarer Art und Weise werden in dem zur ICL-Gruppe gehörigen Kaliwerk Boulby CPL., Großbritannien, feste Aufbereitungsrückstände heute nur noch hauptsächlich NaCl und untergeordnet auch CaSO, nicht aber die unlöslichen Bestandteile (▸ Box 8.2) gemeinsam mit den flüssigen Rückständen in die Nordsee abgestoßen (BGS 2011, /98/). Im ehemaligen Elsässischen Kalirevier, Frankreich, wurden nach Einstellung des Gewinnungsbetriebes in den 1990er Jahren die in etwa 80 Jahren Betriebszeit entstandenen Rückstandshalden durch Berieselung mit Wasser aufgelöst und in gelöster Form in den Fluss Rhein und damit weiter in die Nordsee beseitigt. Genehmigungsrechtlich wurden hierbei die durch Einstellung der Produktion nicht mehr ausgelasteten Salzfrachtpotenziale ausgenutzt (Streckdenfinger 1992, /989/; UNEP & IFA 2001, /1042/). In den in Saskatchewan produzierenden Kaliwerken von PCS, AGRIUM und MOSAIC werden jährlich insgesamt etwa 13 Millionen Tonnen feste Rückstände mit flüssigen Rückständen gemischt, dabei zumindest teilweise gelöst und in Speicherhorizonte im Liegenden der Prärie-Evaporite versenkt. Zukünftig ist auch für die katalonischen Kaliwerke der ICL-Gruppe mit dem sogenannten PHOENIX-Plan zunächst eine Auflösung eines Teiles der festen Aufbereitungsrückstände und darüber hinaus eine Wertstoffrückgewinnung vorgesehen (▸ Box 8.3).

BOX 8.3

Der PHOENIX-Plan von ICL IBERIA S & S: Teilweise Verwertung von festen Aufbereitungsrückständen der Kalidüngemittelproduktion zu verkaufsfähigen Produkten – Stand der Technik?

Umfangreiches Investitionsprogramm unter anderem auch zur Minderung der Umweltauswirkungen

Im April 2011 wurde durch den Vorgänger von ICL IBERIA S & S, noch unter dem früheren Namen IBERPOTASH S.A., ein umfangreiches, aus 2 Phasen bestehendes Investitionsvorhaben, der sogenannte PHOENIX-Plan angekündigt (ANFFE 2011, /23/). In einer ersten Phase, die bis 2014 abgeschlossen werden sollte, plante IBERPOTASH Investitionen von etwa 200 Millionen Euro, die hauptsächlich zur Auffahrung eines neuen Schrägschachtes von etwa 4.500 Meter Länge und zum Aufbau einer Presskompaktion zur Erzeugung granulierter MOP-Produkte genutzt werden sollten. In einer zweiten Phase, die seinerzeit nicht näher terminiert wurde, sollten weitere 400 Millionen Euro für die Verminderung der Umweltauswirkungen, insbesondere durch die Aufhaldung der festen und die Einleitung der flüssigen Aufbereitungsrückstände in das Mittelmeer verwendet werden. IBERPOTASH verwies in der Ankündigung auch darauf, dass der Entscheidung zur Investition über die Verminderung der Umweltauswirkungen ein zweijähriges F/E-Vorhaben vorausgegangen ist. Im Ergebnis dieser wissenschaftlichen Untersuchungen war vorgesehen, Teilströme der an den Produktionsstandorten Súria und Sallent bei der Aufbereitung von Kalirohsalzen anfallenden Rückstände zur Herstellung von jährlich insgesamt 1,5 Millionen Tonnen hochreinen NaCl-Produktes (99,97 m% NaCl) zu verwerten, wodurch eine Verminderung des alljährlich aufzuhaldenden Rückstandsvolumens erreicht werden soll (Cordero 2013, /170/; Pellicer 2014, /743/). Darüber hinaus ist langfristig auch der Rückbau der bereits bestehenden Halden geplant.

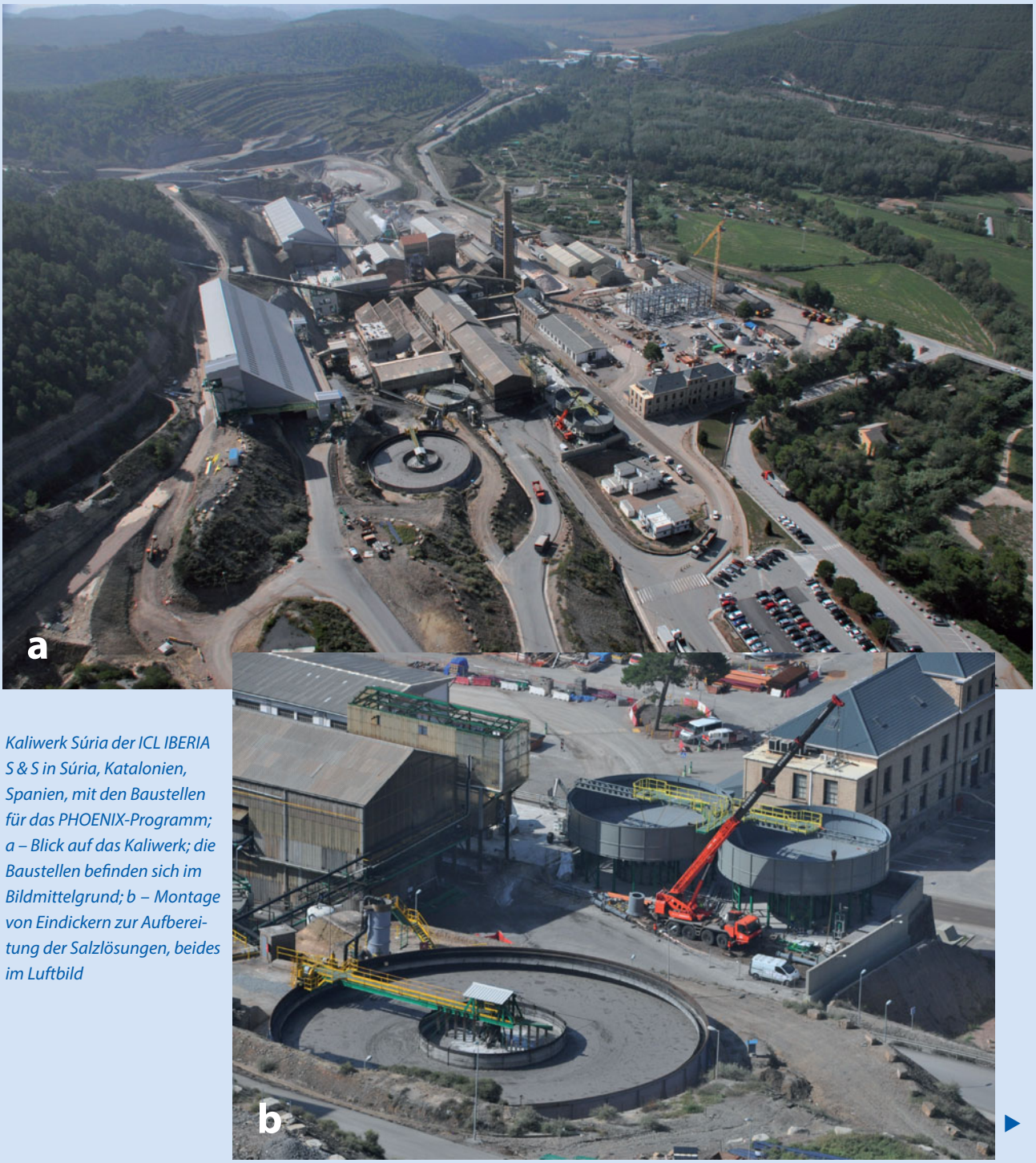
Die entsprechende Anlage am Standort Súria befindet sich zur Zeit im Bau und soll eine NaCl-Produktionskapazität von 750.000 Tonnen pro Jahr erreichen (Orihuel 2012, /722/; EFE 2014, /231/). Die Vermarktung des NaCl-Produktes soll im Rahmen eines *Joint Venture* mit AKZO NOBEL abgesichert werden (Pellicer 2014, /743/).

Reduzierung der zur Beseitigung anfallenden festen Rückstände durch Auflösen und Herstellung von NaCl-Produkten

Wie für andere, als vermeintlich innovative Entsorgungskonzepte angepriesene Vorhaben auch, sind nähere Angaben zu den technischen Umsetzungen und den Massen-Volumen-Bilanzen des PHOENIX-Planes öffentlich nicht verfügbar. Um den tatsächlichen Beitrag für die Verminderung der Umweltauswirkungen beurteilen zu können, wurden deshalb überschlägige Abschätzungen angestellt: Die heutige und auch mittelfristig konzipierte KCl-Produktionskapazität von ICL IBERIA S & S beträgt 1,0 bis 1,1 Millionen Tonnen pro Jahr. Der KCl-Gehalt des Rohsalzes liegt um 25 Prozent und das KCl-Ausbringen bei knapp 90 Prozent (Moore 2012, /680/). Die jährliche Produktion des KCl95-Produktes erfordert demnach etwa 4,3 Millionen Tonnen Rohsalz. Demzufolge entstehen aus der flotativen Aufbereitung des sylvinitischen Rohsalzes näherungsweise 3,0 Millionen Tonnen feste Rückstände pro Jahr.

Die durchschnittliche Zusammensetzung der festen Rückstände an den Produktionsstandorten von ICL IBERIA S & S ist wie folgt (Fernández 2008, /269/):

NaCl	83 Prozent	KCl	3 Prozent	$CaSO_4$	3 Prozent
$MgCl_2$	2 Prozent	Ton	1 Prozent	H_2O	8 Prozent



Kaliwerk Súria der ICL IBERIA S & S in Súria, Katalonien, Spanien, mit den Baustellen für das PHOENIX-Programm; a – Blick auf das Kaliwerk; die Baustellen befinden sich im Bildmittelgrund; b – Montage von Eindickern zur Aufbereitung der Salzlösungen, beides im Luftbild

Der PHOENIX-Plan von ICL IBERIA S & S: Teilweise Verwertung von festen Aufbereitungsrückständen der Kalidüngemittelproduktion zu verkaufsfähigen Produkten – Stand der Technik?

Die Aufbereitung der festen Rückstände aus der Kalidüngemittelproduktion zu einem verkaufsfähigen NaCl-Produkt erfordert zunächst deren Auflösung in Wasser und im Anschluss das Eindampfen der Lösungen, so dass ein reines NaCl-Kristallisat erzeugt wird (Badia 2009, /55/). Dazu sind die aufeinander folgenden Prozessschritte

Auflösen → Klären → Eindampfen → Klären → Filtrieren und Waschen → Trocknen

erforderlich.

Klassische Verfahrensschritte zur Verwertung nach dem Stand der Technik

Alle diese Teilabläufe repräsentieren klassische Verfahrensschritte der NaCl-Herstellung, entsprechen insofern auch dem Stand der Technik. Sie erfordern einen entsprechenden apparativen Aufwand für jeden einzelnen Prozessschritt, folglich auch Gebäude für die Aufbereitungsanlage und zum Lagern sowie zum Verladen des NaCl-Produktes.

Für die Aufbereitung werden hauptsächlich Wasser, Heizdampf, elektrische Energie und zusätzliche Brennstoffe für die Trocknung benötigt. Neben dem NaCl-Produkt verbleiben am Ende auch gewisse Mengen an festen und flüssigen Rückständen, die entsorgt werden müssen. Die spezifischen Mengen für diese Eingangs- und Ausgangsströme eines solchen thermisch dominierten Aufbereitungsprozesses können wie folgt abgeschätzt werden:

Rückstand der KCl Produktion	1,21 Tonnen pro Tonne NaCl-Fertigprodukt
NaCl Produkt >99,9m%	1,00 Tonnen pro Tonne NaCl-Fertigprodukt
Heizdampf	1,38 Tonnen pro Tonne NaCl-Fertigprodukt
Wasser	1,45 Tonnen pro Tonne NaCl-Fertigprodukt
Feste Rückstände	0,04 Tonnen pro Tonne NaCl-Fertigprodukt
Flüssige Rückstände	0,27 Kubikmeter pro Tonne NaCl-Fertigprodukt

Allein aus dem hohen Verbrauch an Primärenergie wird zum einen der ökonomische Aufwand ersichtlich, der für diese Art der Verwertung zu betreiben ist, vor allem aber auch die damit unvermeidbar verbundenen ökologischen Probleme.

Großteil der künftig anfallenden Aufbereitungsrückstände muss dennoch anderweitig beseitigt werden

Für die geplante Herstellung von jährlich insgesamt 1,5 Millionen Tonnen NaCl-Produkt in den beiden neuen Anlagen sind etwa 1,8 Millionen Tonnen feste Rückstände erforderlich. Das heißt also, dass auch zukünftig mehr als die Hälfte der in den Werken von ICL IBERIA S & S bei der Kalidüngemittelproduktion anfallenden festen Rückstände anderweitig entsorgt werden müssen (Gourbe 2007, /347/). Offen bleibt auch die Frage, wie der mit dem PHOENIX-Plan ebenfalls beabsichtigte Rückbau der bestehenden Großhalden erfolgen soll.

Die Zukunft wird zeigen, welche tatsächlichen Beiträge das Projekt PHOENIX zu einer nachhaltigeren Entsorgung der festen und flüssigen Rückstände der Rohsalzaufbereitung für die katalonischen Produktionsstandorte zu leisten vermag. Im Anschluss an eine solche Wertung sollte auch eine Prüfung möglich sein, ob und inwieweit die hier praktizierten Methoden und Verfahren auch auf andere Standorte übertragbar sind.

8.3 Entsorgung der durch die Aufhaldung der festen Aufbereitungsrückstände anfallenden Salzlösungen

Eine weitere Gruppe von flüssigen Abfällen entsteht als Folge der Aufhaldung der festen Aufbereitungsrückstände an der Erdoberfläche, da die Niederschläge auf den Haldenkörper einwirken, an seiner Oberfläche Salzfrachten aufnehmen und somit im Abfluss Salzlösungen anfallen (Reid & Klein 1994b, /825/). Es liegt auf der Hand, dass die Menge dieser Salzlösungen sehr stark von den klimatischen Gegebenheiten eines konkreten Haldenstandortes bestimmt wird. Nennenswerte Mengen dieser Salzlösungen fallen nur in gemäßigten und subtropischen Klimazonen an, wo sich aber auch der größte Teil der Produktionsanlagen der Kaliindustrie befindet und so auch die 32 Standorte der Kalidüngemittelproduktion dort beheimatet sind, an denen eine Aufhaldung der festen Aufbereitungsrückstände betrieben wird (▸ Tabelle 35). Aber auch innerhalb der gemäßigten Klimazone weisen die betriebenen Haldenstandorte große Unterschiede im jährlichen Niederschlagsmittel und damit auch bezüglich der anfallenden Salzlösungen auf. Effekte des örtlichen Mikroklimas, nicht zuletzt aus der Landschaftsmorphologie der unmittelbaren Haldenumgebung resultierend, sind hier vielfach ausschlaggebend für die Menge des auf den Haldenkörper auftreffenden Niederschlags.

Ergänzend zu den Ausführungen zur Haldenbewirtschaftung (▸ Abschnitt 8.1.2) sollen im folgenden Abschnitt die industrieübliche Praxis bei der Beseitigung dieser Salzlösungen[197] abgehandelt werden. Die in den letzten Jahren entwickelten und auch technisch machbaren Verfahren zur Vermeidung und Reduzierung solcher Salzlösungen wurden im Abschnitt 8.1.2.4 bereits erläutert. Im Kapitel 7 wurde erklärt, welche tatsächlichen Verwertungsmöglichkeiten für diese Salzlösungen bei der Kalidüngemittelproduktion bestehen und wie die Kalidüngemittelproduzenten weltweit davon auch Gebrauch machen. Tabelle 42 zeigt nun, welche Beseitigungswege für die Anteile solcher durch die Aufhaldung der festen Aufbereitungsrückstände anfallenden Salzlösungen an den weltweit 32 Haldenstandorten der Kalidüngemittelproduktion heute Anwendung finden, für die eine Verwertung technisch nicht machbar, ökologisch nicht nachhaltig oder wirtschaftlich nicht zumutbar ist und illustriert sozusagen im Überblick den diesbezüglichen heutigen Stand der Technik. Im Kapitel 7 wurden auch die in jüngster Vergangenheit – in der Bundesrepublik Deutschland insbesondere durch die Debatten am Runden Tisch "Gewässerschutz Werra/Weser und Kaliproduktion" – unterbreiteten Verwertungsideen behandelt und soweit *ad absurdum* geführt, wie sie weit über das mögliche Verwertungspotenzial, letztlich also das technisch machbare, das ökologisch nachhaltige und/oder das wirtschaftlich zumutbare Maß hinausgehen.

Obgleich an allen Standorten der Kalidüngemittelproduktion eine partielle Verwertung dieser Salzlösungen zumindest sporadisch oder saisonal betrieben wird, müssen die weitaus größeren Teile beseitigt werden. Die Beseitigung erfolgt zum Teil gemeinsam mit den flüssigen Aufbereitungsrückständen (▸ Abschnitt 8.2), in anderen Fällen aber auch aus verfahrenstechnischen Gründen getrennt voneinander. An den großen Standorten der Kalidüngemittelproduktion an der Oberen Kama, Russland, wo URALKALI ausschließlich Bergmännische Gewinnung sylvinitischer Rohsalze und die Aufhaldung der festen Aufbereitungsrückstände betreibt, werden die nicht verwertbaren Anteile dieser gering mineralisierten Salzlösungen über große Zeiträume in Sammelbecken gespeichert, dabei zum Teil auch mit den hochmineralisierten Trägerlösungen von Schlammsuspensionen vermischt. Eine Beseitigung der Salzlösungen durch Einleitung in Fließgewässer ist für den Normalbetrieb nicht vorgesehen, jedoch kommt es zur Beherrschung von betrieblichen Havariezuständen sporadisch zum Abstoß in die Flüsse Ljonwa und Kama.

Auf der Starobinsker Kalilagerstätte, Republik Belarus, betreibt BELARUSKALI die Bergmännische Gewinnung von sylvinitischen Rohsalzen und beseitigt den größten Teil der dabei anfallenden festen Aufbereitungsrückstände durch Aufhaldung (Fulda, Jäger & Kutscha 1988, /303/; Burak & Pozniak 2007, /137/). Der nicht verwertbare Anteil der an den Halden anfallenden Salzlösungen wird über längere Zeiträume in Becken an der Erdoberfläche gespeichert oder aber in den geologischen Untergrund versenkt.

An den großen Standorten der Kaliindustrie in Saskatchewan, Kanada, werden von PCS und MOSAIC feste Kalirohsalze im geologischen Untergrund sowohl mit Hilfe bergmännischer als auch mittels soltechnischer Verfahren gewonnen und zu Kalidüngemittelprodukten aufbereitet. An allen Produktionsstandorten werden die dabei unvermeidbar anfallenden festen Aufbereitungsrückstände aufgehaldet, so dass auch hier der größte Teil der dabei anfallenden Salzlösungen zu beseitigen ist.

---

197 Da sich diese Abwasserströme hinsichtlich ihrer Salzkonzentration und der damit verbundenen Bruttosalzfrachten deutlich von den flüssigen Aufbereitungsrückständen unterscheiden, wurden sie in der Fachliteratur vielfach auch mit einem von den letztgenannten Salzlösungen verschiedenen Terminus als Salzwässer oder auch Haldenwasser bezeichnet. Nach geltenden Recht der Bundesrepublik Deutschland handelt es sich hier um industrielle Abwässer.

Tabelle 42 Übersicht zu den Beseitigungspfaden für die an den weltweit 32 Haldenstandorten der Kalidüngemittelproduktion durch Aufhaldung fester Aufbereitungsrückstände anfallenden Salzlösungen (▶Tabelle 1)

Produzent/ Standort[5]	Beseitigungspfade[198] der durch Aufhaldung anfallenden Salzlösungen
URALKALI	
Solikamsk 3	Einleitung in Sammelbecken
Berezniki 4	Einleitung in Sammelbecken
Solikamsk 2	Einleitung in Sammelbecken
Berezniki 3	Einleitung in Sammelbecken
Berezniki 2	Einleitung in Sammelbecken
Solikamsk 1	Einleitung in Sammelbecken
PCS	
Lanigan	Versenkung in den geologischen Untergrund
Rocanville	Versenkung in den geologischen Untergrund
Allan	Versenkung in den geologischen Untergrund
Cory	Versenkung in den geologischen Untergrund
Patience Lake	Rückführung in das abgesoffene Bergwerk und Versenkung in den geologischen Untergrund
MOSAIC	
Esterhazy K1	Versenkung in den geologischen Untergrund
Esterhazy K2	Versenkung in den geologischen Untergrund
Belle Plaine	Rückführung in die Kavernen und Versenkung in den geologischen Untergrund
Colonsay	Versenkung in den geologischen Untergrund
Carlsbad	Einleitung in Sammelbecken

198 Die bei der Aufhaldung anfallenden, mineralisierten Salzlösungen werden nirgendwo in ihrer Gesamtheit, an jedem Haldenstandort in Teilen aber sporadisch oder saisonal, seltener auch permanent durch die Zuführung in den oder die Lösungskreisläufe bei der Rohstoffaufbereitung verwertet, was bereits im Kapitel 7 behandelt wurde. In dieser Tabelle sind demzufolge lediglich die Pfade zur Beseitigung jener, mengenmäßig überwiegenden Anteile der bei der Aufhaldung anfallenden Salzlösungen aufgezeigt, für die es keine Verwertungsmöglichkeit gibt.

Produzent/ Standort[5]	Beseitigungspfade[198] der durch Aufhaldung anfallenden Salzlösungen
BELARUSKALI	
Soligorsk 4	Einleitung in Sammelbecken und Versenkung in den geologischen Untergrund
Soligorsk 3	Einleitung in Sammelbecken und Versenkung in den geologischen Untergrund
Soligorsk 2	Einleitung in Sammelbecken und Versenkung in den geologischen Untergrund
Soligorsk 1	Einleitung in Sammelbecken und Versenkung in den geologischen Untergrund
K+S	
Verbundwerk Werra, bestehend aus den Standorten:	
Wintershall	Versenkung in den geologischen Untergrund sowie Einleitung in Fließgewässer und damit Weitertransport zum Meer
Hattorf	Versenkung in den geologischen Untergrund sowie Einleitung in Fließgewässer und damit Weitertransport zum Meer
Zielitz	Einleitung in Fließgewässer und damit Weitertransport zum Meer
Neuhof-Ellers	Einleitung in Fließgewässer und damit Weitertransport zum Meer
Sigmundshall	Einleitung in Fließgewässer und damit Weitertransport zum Meer
ICL IBERIA S & S	
Súria	Einleitung in das Mittelmeer
Sallent	Einleitung in das Mittelmeer
AGRIUM	
Vanscoy	Versenkung in den geologischen Untergrund
INTREPID	
Carlsbad East	Einleitung in Sammelbecken
Carlsbad West	Einleitung in Sammelbecken
Moab	Rückführung in das abgesoffene Bergwerk
UZKIMYOSANAT	
Dechkanabad	Einleitung in Sammelbecken

Sie werden dort, wo Bergmännische Gewinnung erfolgt, zunächst in der Nähe der Spülhalden und Schlammteiche zwischengespeichert und dann gemeinsam mit den flüssigen Aufbereitungsrückständen über Tiefbohrungen in den geologischen Untergrund versenkt. In den beiden Produktionsstandorten, wo Soltechnische Gewinnung stattfindet, werden die an den Rückstandshalden anfallenden Salzlösungen außerdem auch teilweise in die lösungserfüllten Gewinnungshohlräume zurückgeführt und – indem sie dort Produktionslösungen zu verdrängen in der Lage sind – auch einer weiteren Verwertung, mindestens aber einer Beseitigung zugeführt. Auch in Utah, USA, wo INTREPID bei Moab die Soltechnische Gewinnung von festen Kalisalzen betreibt und einen Großteil der dabei anfallenden festen Rückstände ebenfalls aufhaldet, werden die dort aber aufgrund des semiariden Klimas ausgesprochen geringen Mengen von Salzlösungen in die Gewinnungshohlräume zurückgeführt und einer – im juristischen Sprachgebrauch der Bundesrepublik Deutschland – Verwertung zugeführt.

In New Mexico, USA, wo MOSAIC und INTREPID bei Carlsbad Kalidüngemittelproduktion betreiben und ebenfalls die dabei unvermeidbar anfallenden festen Aufbereitungsrückstände an der Erdoberfläche aufhalden, werden die aufgrund des semiariden Klimas in geringer Menge an den Haldenkörpern anfallenden Salzlösungen in Becken gespeichert und aufgrund der dort stattfindenden Evaporation auch in ihrer Menge reduziert. Gleiches trifft für den noch jungen Produktionsstandort Dechkanabad, Usbekistan, zu.

In den katalonischen Kalibergwerken in Spanien, wo ICL IBERIA S & S die Bergmännische Gewinnung betreibt und heute wie auch in der Zukunft einen großen Teil der bei der Kalidüngemittelproduktion anfallenden festen Rückstände aufhaldet, werden die dabei anfallenden Salzlösungen über Rohrleitungen direkt dem Mittelmeer zugeführt und damit beseitigt.

An den Haldenstandorten im Mutterland der Kaliindustrie, in Deutschland, werden die bei der Aufhaldung fester Aufbereitungsrückstände aufgrund der Einwirkung von Niederschlägen auf die Hadenoberfläche anfallenden Salzlösungen ebenfalls zu ihrem größten Teil beseitigt und nur zu geringen Teilen einer Verwertung zugeführt (▸Kapitel 7). Die an den Haldenstandorten im Werra-Kalirevier anfallenden Salzlösungen werden durch Versenkung in den geologischen Untergrund sowie durch die Einleitung in die Werra und damit den Weitertransport in die Nordsee beseitigt (▸Box 2.1). An den anderen Standorten von Kalirückstandshalden in Deutschland, sowohl den heute in Ablagerungsbetrieb befindlichen von K+S in Neuhof-Ellers, in Zielitz und in Sigmundshall, aber auch an Großhalden der heute stillgelegten DDR-Kaliwerke erfolgt die Beseitigung weitestgehend über Fließgewässer und damit zum Meer, in wenigen Fällen auch durch Einleitung in stillgelegte und durch Flutung zu verwahrende Bergwerke.

Für die Hessischen Haldenstandorte im Verbundwerk Werra wurde im vergangenen Jahr zwischen dem Hessischen Umweltministerium und dem Produzenten K+S eine in die Zukunft weisende Vereinbarung zur Bewirtschaftung flüssiger Abfälle, darunter auch die an den Halden anfallenden Salzlösungen, in Form eines Vier-Phasen-Planes getroffen. Dieser betrachtet auch die Nachbetriebsphase der Kaliwerke und ihrer Haldenstandorte und zielt auch vor dem Hintergrund der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL 2000, /1135/) darauf, in den Flusssystemen von Werra und Oberweser langfristig wieder eine Süßwasserqualität zu erreichen (HLV 2014, /396/; HMUKLV 2014, /397/; K+S 2014a, /488/; 2015b, /491/).

9 ZUSAMMENFASSENDE DISKUSSION ZUM STAND DER TECHNIK BEI DER KALIDÜNGEMITTELPRODUKTION

Ausgehend von den vorab ausführlich erläuterten Methoden, Verfahren und Anlagen, wie sie heute weltweit bei der Kalidüngemittelproduktion eingesetzt werden, soll nunmehr eine Ableitung eines möglichst konkreten aber allgemeingültigen Standes der Technik versucht werden. Wie bereits am Anfang der Recherche- und Analysenarbeit festgestellt und auch in den Kapiteln 1 und 4 beschrieben wurde, sind dabei die für jeden einzelnen Produktionsstandort bestehenden individuellen und von der Natur vorgegebenen lagerstättengeologischen, montanhydrogeologischen und sonstigen bergbausicherheitlichen sowie die klimatischen Randbedingungen, aber auch die vom Menschen geschaffenen infrastrukturellen und logistischen Voraussetzungen zu berücksichtigen. Die sehr komplexen Wechselwirkungen zwischen diesen Randbedingungen und deren singuläre oder auch kollektive Einflussnahme auf das an einem konkreten Standort erfolgreich praktizierte Methodeninventar zur Gewinnung der natürlichen Kalirohstoffe und deren Aufbereitung zu verkaufsfähigen Kalidüngemitteln und Nebenprodukten sowie zur Entsorgung der dabei unvermeidbar anfallenden festen und flüssigen Rückstände wurde bereits in den vorangestellten Kapiteln 5 bis 8 ausführlich abgehandelt. Im Folgenden wird deshalb weitgehend auf eine Wiederholung dieser Argumentationen verzichtet. Die nunmehr folgende Diskussion will aber zeigen, dass dieses methodische Inventar und die nach diesen Verfahren betriebenen Anlagen den heutigen Stand der Technik repräsentieren und mit ihnen ein für die jeweiligen Rahmenbedingungen konkreter, dennoch aber für alle weltweit bestehenden Standorte der Kalidüngemittelproduktion allgemein zutreffender Entwicklungsstand auch im Sinne der juristischen Dimension des Terminus Stand der Technik beschrieben ist.

Das Resultat einer solchen vergleichenden Analyse der heute praktizierten Betriebsweisen führt letztlich zur Definition des gegenwärtigen Standes der Technik und ist als Kriterium zur Beurteilung des Entwicklungsstandes einzelner Methoden, Verfahren und Anlagen insbesondere im Hinblick auf die Anforderungen im Umweltrecht, aber auch im Hinblick auf das Nachhaltigkeitsgebot im Allgemeinen und im Besonderen bei der Rohstoffnutzung tauglich (▸Kapitel 1). Im Sinne des hier zur Rede stehenden Betriebes technischer Anlagen und der damit verbundenen Ingenieurtätigkeit fordert die Gesetzgebung die Einhaltung von Verkehrssicherungs- respektive Sorgfaltspflichten, nach denen zum Schutze der Benutzer und unbeteiligter Dritter notwendige und erforderliche Maßnahmen zu ergreifen sind, um bei bestimmungsgemäßer Anwendung der technischen Methoden, Verfahren und Anlagen, Gefahren aller Art vorbeugend und sicher zu vermeiden. Für einen konkreten Anwendungsfall werden – zumindest nach der gültigen Rechtsprechung der Bundesrepublik Deutschland – Art und Umfang solcher zweistufigen Maßnahmen anhand der beiden abstrakten Begriffe, der allgemein anerkannten Regeln der Technik für das technisch Notwendige,

H. Rauche, *Die Kaliindustrie im 21. Jahrhundert,*
DOI 10.1007/978-3-662-46834-0_9, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

und des Standes der Technik für das technisch Erforderliche bemessen. Das technisch_Mögliche beschreibt dabei zeitbezogen die inhaltlichen Anforderungen an das Handeln oder Unterlassen für einzelne Ingenieurtätigkeiten, die geeignet sind, das notwendige Mindestmaß zu erfüllen. Der wirtschaftliche Maßstab für Umfang und Inhalt des für einzelne Ingenieurtätigkeiten zu einem bestimmten Zeitpunkt technisch Notwendigen und Erforderlichen wird vom Gesetzgeber – ebenso abstrakt – durch das wirtschaftlich Zumutbare beschrieben. Gedanklich liegt dieses wirtschaftlich Zumutbare wohl nahe bei dem *Möglichen*, das Hermann Hesse in seiner Maxime von einem imaginären *Unmöglichen* getrennt wissen will - um hier einmal an den einleitenden Worten zu diesem Buch anzuknüpfen.

Der Gesetzgeber betont für all diese juristisch abstrakten Termini einen zeitlichen Bezug und würdigt damit explizit die Fortentwicklung technischer Methoden, Verfahren und Anlagen. Demzufolge ist es nicht nur erkenntnistheoretisch richtig, sondern auch im juristischen Sinne angemessen, den Stand der Technik als mittlere Stufe einer auf Fortschritt orientierten dreistufigen Entwicklung – über den allgemein anerkannten Regeln der Technik, aber unter dem Stand von Wissenschaft und Technik – zu verstehen. Das Einhalten der mit den allgemein anerkannten Regeln der Technik bestimmten niedrigsten Stufe ist notwendig, genügt aber zum Erfüllen der Anforderungen an die eigenen Sorgfaltspflichten nicht ausschließlich. Vielmehr gilt es zur Erfüllung der Sorgfaltspflicht nachzuweisen, dass der gegenwärtige Stand der Technik Berücksichtigung gefunden hat. Der Stand der Technik subsummiert nach dem Verständnis des Bundesverfassungsgerichtes (BVerfG) vollumfänglich das von Fachleuten verfügbare Fachwissen, welches 3 grundsätzlichen Anforderungen genügen muss: Dieses Fachwissen, wie auch die letztlich daraus erwachsenen technischen Methoden, Verfahren und Anlagen für eine industrielle Produktion müssen

- wissenschaftlich begründet,
- praktisch erprobt

sein und muss sich

- in der industriellen Praxis ausreichend bewährt haben.

Diese Bemerkungen zur Begriffsbestimmung vorausgeschickt, wird unter Anwendung der oben genannten Anforderungskriterien im Folgenden der Stand der Technik bei der Kalidüngemittelproduktion definiert, ohne dass dabei alle – bereits in den Kapiteln 4 bis 8 detailliert behandelten technischen Details noch einmal wiederholt werden sollen.

Der derzeitige, also in der Mitte der zweiten Dekade des 21. Jahrhunderts, bestehende Stand der Technik zur Gewinnung und Aufbereitung von Kalirohstoffen ist in folgender Weise definiert: Insgesamt 35 der heute 69 in Betrieb befindlichen Gewinnungsanlagen für Kalirohstoffe nutzen für den Abbau fester Kalirohsalze aus dem geologischen Untergrund bergmännische Methoden. Sie liefern die Rohstoffe für den weitaus größten Anteil von mehr als 70 Prozent der weltweiten Kalidüngemittelproduktion. Von den heute insgesamt aus Bergmännischer Gewinnung fester Kalirohsalze stammenden Kalidüngemitteln entfallen etwa 65 Prozent auf die Schneidende Gewinnung im Kammerpfeilerbau mit langen Pfeilern, 17 Prozent auf die Schneidende Gewinnung im Strebbruchbau, knapp 2 Prozent auf die Schneidende Gewinnung im Firstenstoßbau, 15 Prozent auf das Bohren und Sprengen im Kammerpfeilerbau mit Quadratpfeilern und 1 Prozent auf das Bohren und Sprengen im Weitungsbau. Lediglich in 7 Kalibergwerken werden Gewinnungsmethoden mit Versatz von festen Aufbereitungsrückständen betrieben, weil nur dort aus gebirgsmechanischen Gründen eine Stabilisierung der Abbauhohlräume erforderlich ist und/oder aber die entsprechenden lagerstättengeologischen und bergtechnischen Randbedingungen für einen Versatzeinbau gegeben sind. Letzteres schließt auch solche Gewinnungsverfahren ein, bei denen das Versatzmassiv als künstliche Sohle für den weiteren Abbaufortschritt eine verfahrenstechnische Funktion erfüllt.

In der öffentlichen Diskussion zum Rückstandsmanagement bei der Kalidüngemittelproduktion wird mit Verweis auf den Stand der Technik vielfach selektiv auf einzelne Standorte verwiesen, wo heute oder auch in der Vergangenheit umfangreich Versatz betrieben wird beziehungsweise wurde. Bei der gedanklichen Übertragung solcher Methoden und Verfahren auf andere Standorte werden die natürlichen Randbedingungen dabei oftmals nur ungenügend berücksichtigt. In der Tat wurde in einzelnen Kalibergbau-Revieren in Deutschland, zum Beispiel im Südharz-Kalirevier früher unter für einen Versatzbetrieb besonders günstigen lagerstättengeologischen, vor allem aber bergtechnischen Randbedingungen der größte Teil der jährlich anfallenden festen Rückstände als Spülversatz nach unter Tage beseitigt. Mit der Umstellung auf modernere Gewinnungsverfahren im Zuge der maschinentechnischen Weiterentwicklung in den 1960er und 1970er Jahren musste in diesen Revieren aber auch ein andersartiges Abbauverfahren, der Kammer-Pfeilerabbau mit quadratischen Pfeilern, eingeführt werden, das eine Fortsetzung des Spülversatzbetriebes nicht ermöglichte.

In nahezu allen heute in Betrieb befindlichen Kalibergwerken erfolgt jedoch der sogenannte Sofortversatz von Gewinnungsrückständen, in dem Teile der wertstofffreien oder -armen Förderstöme in ausgesalzene Abbauhohlräume eingebracht werden, also unter Tage verbleiben. In welchem Umfang dies in den einzelnen Gewinnungsbergwerken und zu einem bestimmten Zeitpunkt der Produktionsgeschichte möglich ist, hängt wiederum von den jeweiligen Standortbedingungen ab.

Eine wesentliche Kennziffer für die Nachhaltigkeit der Gewinnungsprozesse von festen Kalirohstoffen[199] ist der Gewinnungsgrad der Lagerstätte[200], der im weltweiten Vergleich vor allem in Abhängigkeit von der Rohsalzart und der Teufe, daneben aber auch von anderen natürlichen Faktoren kontrolliert wird, zwischen 26 und bestenfalls 57 Prozent schwankt, für das Gros der auf diese Weise gewonnenen Rohstoffe jedoch zwischen 33 und 41 Prozent liegt.

Alle diese, in den Abschnitten 5.1.1 und 8.1.1 ausführlich beschriebenen Methoden, Verfahren und Anlagen repräsentieren gemeinsam den heutigen Stand der Technik bei der Bergmännischen Gewinnung von festen Kalirohsalzen aus dem geologischen Untergrund. Sie sind wissenschaftlich begründet und in der Praxis erprobt. Sie haben sich über viele Jahre im industriellen Maßstab bewährt. Sie stellen untereinander keine konkurrierenden, weniger oder mehr entwickelten technischen Methoden oder Verfahren oder Anlagen im Sinne einer auf Fortschritt gerichteten Entwicklung dar, sondern sind vielmehr das Ergebnis eines meist langwierigen Optimierungsprozesses, der die an den einzelnen Standorten ausgesprochen verschiedenartigen Randbedingungen – hier insbesondere die lagerstätten-, die montanhydrogeologischen und anderen bergbausicherheitlichen – berücksichtigt hat. Sie repräsentieren mindestens das technisch Erforderliche, in vielen Fällen auch das heute technisch Mögliche, soweit das Letztgenannte dem wirtschaftlich Machbaren gleichkommt.

Anders stellt sich dieser Sachverhalt bezüglich der verschiedenen, auch im Rahmen von F/E-Vorhaben untersuchten Verfahren zur Pfeilerrückgewinnung nach dem Einbringen von festen Aufbereitungsrückständen als Versatz im Kammerpfeilerbau der Flachen Lagerung dar. Auch diese – seit den 1910er Jahren aus dem Südharz-Kalirevier bekannten Verfahren sind wissenschaftlich begründet. Ihre praktische Erprobung hat jedoch gezeigt, dass sie vielfach – auch unter den für das Versatzeinbringen relativ günstigen lagerstättengeologischen und bergtechnischen Randbedingungen der Südharz-Lagerstätte – zu einer Reihe technischer und zu gravierenden arbeits- und bergbausicherheitlichen Problemen führen. Während der partielle Pfeilerrückbau für das bis in die 1960er Jahre angewendete Verfahren des Langkammerbaues mit Schrapperförderung noch praktikabel war und auch in ausgewählten Feldesteilen der ehemaligen Gewinnungsbergwerke Bleicherode und Sollstedt über Jahrzehnte aus einer sehr individuellen Motivation heraus zur Anwendung kam, konnte das Verfahren nach der Umstellung auf die Großgerätetechnik und auf den dadurch veränderten Grubenzuschnitt im Kammerpfeilerbau mit quadratischen Pfeilern nicht erfolgreich adaptiert werden. Die noch bis in die 1980er Jahre unter anderen in in situ Versuchen erprobten Verfahrensvorschläge haben sich also in der bergmännischen Praxis des neuen Abbauverfahrens nicht bewähren können, gehören daher auch nicht zum heutigen Stand der Technik.

Insgesamt 37 der heute in Betrieb befindlichen Produktionsanlagen betreiben zur Kalidüngemittelherstellung die Aufbereitung fester Kalirohsalze aus der Bergmännischen Gewinnung, 29 davon mittels Flotation, 17 mittels Heißverlösung und Kristallisation und 4 mittels elektrostatischer Aufbereitung. Mit diesen Anlagen wird der weitaus größte Anteil von mehr als 70 Prozent der weltweiten Kalidüngemittelprodukte erzeugt. In den allermeisten Fällen erfolgt die Erzeugung der Kalidüngemittelprodukte nicht durch die Anwendung eines einzigen Aufbereitungsverfahrens, sondern durch eine Kombination verschiedener und miteinander verknüpfter Einzelschritte. Die Motivation für diese oftmals sehr komplexe und wiederum sehr stark von der Rohstoffzusammensetzung und von lokalen Faktoren abhängigen Interaktion war eine vor allem auf das hohe Wertstoffausbringen, einen geringen Energie- und Wasserverbrauch gerichtete Optimierung. Daneben werden auch eine Reihe von Nebenprodukten hergestellt, deren Portfolio und Mengen maßgeblich durch den Lagerstätteninhalt selbst und durch andere Randbedingungen bestimmt werden.

Eine wesentliche Kennziffer für die Nachhaltigkeit dieser Aufbereitungsprozesse ist das Wertstoffausbringen[201], das im weltweiten Vergleich zwischen 75 Prozent und 92 Prozent variiert und maßgeblich durch die Rohsalzzusammensetzung beeinflusst wird.

199 Für die Gewinnung natürlicher wertstoffarmer Lösungen ist ein solcher Gewinnungsfaktor sinnvoll nicht anzuwenden.

200 als Reziprok der globalen Abbauverluste

201 als Reziprok des Wertstoffverlustes bei der Aufbereitung

Die bei der Kalidüngemittelproduktion genutzten, in Abschnitt 6.1 ausführlich beschriebenen Aufbereitungsmethoden, -verfahren und -anlagen repräsentieren alle gemeinsam den heutigen Stand der Technik bei der Aufbereitung fester Kalirohsalze zu Kalidüngemitteln. Auch sie sind wissenschaftlich begründet und in der Praxis erprobt. Auch sie haben sich über viele Jahre im industriellen Maßstab bewährt. Auch sie stellen untereinander keine konkurrierenden, weniger oder mehr entwickelten technischen Methoden oder Verfahren oder Anlagen im Sinne einer auf Fortschritt gerichteten Entwicklung dar, sondern sind vielmehr das Ergebnis eines meist langwierigen Optimierungsprozesses, der die unterschiedliche mineralogische und chemische Beschaffenheit der jeweils aufzubereitenden Rohsalze berücksichtigt hat. Sie repräsentieren ebenfalls mindestens das technisch Erforderliche, in vielen Fällen auch das heute technisch Mögliche soweit das Letztgenannte dem wirtschaftlich Machbaren gleichkommt.

Lediglich 5 der heute etwa 69 in Betrieb befindlichen Gewinnungsanlagen für Kalirohstoffe nutzen für den Abbau fester Kalirohsalze aus dem geologischen Untergrund soltechnische Methoden. Sie liefern die technischen Lösungen als Ausgangsstoff für nur knapp 4 Prozent der weltweiten Kalidüngemittelproduktion. Die dabei angewendeten, im Abschnitt 5.1.2 beschriebenen Methoden, Verfahren und Anlagen repräsentieren ebenfalls gemeinsam den heutigen Stand der Technik bei der Soltechnischen Gewinnung von festen Kalirohsalzen aus dem geologischen Untergrund. Diesen klassischen soltechnischen Verfahren ähnlich sind die in abgesoffenen Kalibergwerken praktizierten Verfahren zur Lösungsextraktion. Der Gewinnungsgrad der Lagerstätte liegt bei der Kavernensolung zwischen 30 Prozent und 40 Prozent.

Auch die hierbei verwendeten Methoden und Verfahren sind wissenschaftlich begründet und in der Praxis erprobt. Sie haben sich über viele Jahre im industriellen Maßstab bewährt. Sie stellen wiederum keine untereinander oder mit den Bergmännischen Gewinnungsmethoden konkurrierenden, weniger oder mehr entwickelten technischen Methoden oder Verfahren oder Anlagen im Sinne einer auf Fortschritt gerichteten Entwicklung dar, sondern sind ebenfalls wie die Methoden und Verfahren der Bergmännischen Gewinnung vielmehr das Ergebnis eines langwierigen Optimierungsprozesses, der die an den einzelnen Standorten ausgesprochen verschiedenartigen Randbedingungen – insbesondere die lagerstätten- und hydrogeologischen, die klimatischen und die infrastrukturellen – berücksichtigt hat. Sie repräsentieren mindestens das technisch Erforderliche, in vielen Fällen auch das heute technisch Mögliche soweit das Letztgenannte dem wirtschaftlich Machbaren gleichkommt.

Im Gegensatz zur Bergmännischen Gewinnung in Bergwerken existieren heute jedoch nur 3 planmäßig für die Soltechnische Gewinnung errichtete Produktionsstandorte, das Kaliwerk Belle Plaine in Saskatchewan, Kanada, und die weitaus kleineren Anlagen in Moab, Utah, USA, und in Kehmstedt/Bleicherode in Nordwest-Thüringen, Deutschland. Diese dort angewendeten, im technischen Detail durchaus unterschiedlichen Methoden und Verfahren haben ihre Berechtigung nebeneinander, da sie für den individuellen Standort die bestmögliche technische und ökologische Effizienz und damit auch ökonomische Attraktivität garantieren. Allerdings ist das bis heute entwickelte und praktizierte Methodeninventar zur Soltechnischen Gewinnung auch nur auf die an diesen wenigen Standorten herrschenden Randbedingungen zugeschnitten und daher weit weniger reichhaltig, als es für die Bergmännische Gewinnung der Fall ist. Obgleich die Soltechnische Gewinnung von festen Kalirohsalzen aus dem geologischen Untergrund eine für Kalirohstoffe jüngere Gewinnungsmethode gegenüber der Bergmännischen Gewinnung darstellt, verkörpert sie doch nicht einen höheren Stand der technischen Entwicklung. Vielmehr findet die Soltechnische Gewinnung nur dort Anwendungsfälle, wo die Bergmännische Gewinnung aus lagerstättengeologischen, geomechanischen, montanhydrogeologischen und/oder anderen bergbausicherheitlichen Erwägungen nicht oder nicht wirtschaftlich betrieben werden kann.

Mit den Anlagen zur Aufbereitung technischer Lösungen aus der Soltechnischen Gewinnung fester Kalirohsalze werden zur Zeit knapp 4 Prozent der weltweiten Kalidüngemittelprodukte hauptsächlich durch technische Eindampf-/Kühlkristallisation erzeugt, weshalb das Wertstoffausbringen hier auch stets über 90 Prozent beträgt. Die dabei genutzten, in Abschnitt 6.2 ausführlich beschriebenen Methoden und Verfahren repräsentieren alle gemeinsam den heutigen Stand der Technik bei der Aufbereitung von technischen Lösungen zu Kalidüngemitteln. Auch sie sind wissenschaftlich begründet und in der Praxis erprobt. Auch sie haben sich über viele Jahre im industriellen Maßstab bewährt. Auch sie stellen untereinander keine konkurrierenden, weniger oder mehr entwickelten technischen Methoden oder Verfahren oder Anlagen im Sinne einer auf Fortschritt gerichteten Entwicklung dar, sondern sind vielmehr das Ergebnis eines meist langwierigen Optimierungsprozesses, der die unterschiedlichen, im Wesentlichen durch die lagerstättengeologischen Verhältnisse bedingten, Zusammensetzungen der technischen Lösungen berücksichtigt hat. Sie repräsentieren mindestens das technisch Erforderliche, in vielen Fällen auch das heute technisch Mögliche soweit das Letztgenannte dem wirtschaftlich Machbaren gleichkommt.

Immerhin 29 der heute etwa 69 in Betrieb befindlichen Gewinnungsanlagen für Kalirohstoffe nutzen natürliche, wertstoffarme Lösungen, die in Oberflächengewässern, sogenannten Salzseen, oder aber als Porenwässer in oberflächennahen Grundwasserleitern gespeichert sind. Darunter befinden sich allein 24 solche, in ihrer Produktionskapazität aber sehr unterschiedliche Standorte in Westchina.

Alle 29 Anlagen liefern die Rohstoffe für 26 Prozent der weltweiten Kalidüngemittelproduktion. Die dabei genutzten, in Abschnitt 5.2 beschriebenen Methoden und Verfahren unterscheiden sich nur wenig voneinander, weisen keine signifikanten technischen Unterschiede auf, sind lediglich in Nuancen an den individuellen Standort angepasst worden, um die bestmögliche technische und ökologische Effizienz und damit auch ökonomische Attraktivität zu garantieren. Alle diese Gewinnungsmethoden und -verfahren sind wissenschaftlich begründet und in der Praxis erprobt. Sie repräsentieren gleichfalls alle gemeinsam den heutigen Stand der Technik bei der Gewinnung von natürlichen Lösungen für die Kalidüngemittelproduktion. Auch sie stellen keine untereinander konkurrierenden, weniger oder mehr entwickelten technischen Methoden oder Verfahren oder Anlagen im Sinne einer auf Fortschritt gerichteten Entwicklung dar, sondern sind vielmehr das Ergebnis eines meist langwierigen Optimierungsprozesses, der die an den einzelnen Standorten ausgesprochen verschiedenartigen Randbedingungen – insbesondere die chemische Zusammensetzung der natürlichen Lösungen und die klimatischen Verhältnisse – berücksichtigt hat. Sie repräsentieren mindestens das technisch Erforderliche, in vielen Fällen auch das heute technisch Mögliche soweit das Letztgenannte dem wirtschaftlich Machbaren gleichkommt.

Aus den Anlagen zur Aufbereitung natürlicher wertstoffarmer Lösungen werden zur Zeit mehr als 26 Prozent der weltweiten Kalidüngemittelprodukte hergestellt. Die dabei genutzten, in Abschnitt 6.3 beschriebenen Methoden und Verfahren basieren alle auf solarer Evaporation und/oder natürlicher Kühlkristallisation, um die oft sehr wertstoffarmen natürlichen Lösungen einer Vorkonzentration zu unterziehen. Im Anschluss an diese, selbstverständlich stark von den klimatischen Verhältnissen abhängigen Verfahren, folgen ausnahmslos weitere technische Aufbereitungsschritte der Zwischenprodukte, um verkaufsfähige Fertigprodukte zu erzeugen.

Der wesentliche Aspekt für den Vergleich des hier praktizierten Methodeninventars mit dem anderenorts angewendeten – wie er in der Öffentlichen Diskussion mitunter strapaziert wird – ist die Nutzbarkeit der kostenfreien Sonnenenergie für die zur Wertstoffanreicherung erforderliche Verdampfung großer Wassermengen. Solche wertstoffarmen Rohstoffe können daher auch nur dort eine Nutzung zur Kalidüngemittelproduktion erfahren, wo die klimatischen Bedingungen die solare Evaporation ermöglichen.

Alle diese Methoden, Verfahren und Anlagen zur Aufbereitung natürlicher wertstoffarmer Lösungen sind wissenschaftlich begründet und in der Praxis erprobt. Sie repräsentieren gemeinsam den heutigen Stand der Technik bei der Aufbereitung natürlicher Lösungen. Sie stellen untereinander keine konkurrierenden, weniger oder mehr entwickelten technischen Methoden oder Verfahren oder Anlagen im Sinne einer auf Fortschritt gerichteten Entwicklung dar, sondern sind vielmehr das Ergebnis eines meist langwierigen Optimierungsprozesses, der insbesondere die Zusammensetzung der gering wertstoffhaltigen natürlichen Lösungen sowie die lokalen klimatischen Bedingungen berücksichtigt hat. Auch diese Methoden, Verfahren und Anlagen Sie repräsentieren mindestens das technisch Erforderliche, in vielen Fällen auch das heute technisch Mögliche soweit das Letztgenannte dem wirtschaftlich Machbaren gleichkommt.

Im Kapitel 3 dieser Studie wurden die Verhältnisse am internationalen Kalidüngemittelmarkt soweit erläutert, wie es für die hier zur Rede stehende Ableitung des Standes der Technik notwendig war. In diesem Zusammenhang erfolgte im Abschnitt 3.3 auch eine Diskussion der durch den Markt vorgegebenen chemischen und physikalischen Anforderungen an die Fertigprodukte. Ausgehend von der Charakterisierung der Rohstoffe für die Kalidüngemittelproduktion wurden in den Kapiteln 4 bis 7 auch Massen-Volumen-Bilanzen zwischen den Ausgangsstoffen, den Zwischen- und Fertig- und Nebenprodukten bis hin zu den unvermeidbar anfallenden festen und flüssigen Aufbereitungsrückständen diskutiert. Im Ergebnis der vergleichenden Analyse lassen sich für die einzelnen Rohstoffe und die wichtigsten Verfahren die für den heutigen Stand der Technik typischen Verhältnisse von unvermeidbar zur Beseitigung anfallender Rückstandsmasse zur Masse der verkaufsfähigen Fertigprodukte wie folgt darstellen:

- Bei der Flotation sylvinitischer Rohsalze fallen pro Tonne verkaufsfähiges MOP-Fertigprodukt etwa 2,4 Tonnen feste Rückstände und 0,4 Tonnen flüssige Rückstände an.
- Bei der Flotation carnallitischer Rohsalze fallen pro Tonne verkaufsfähiges MOP-Fertigprodukt etwa 4,0 Tonnen feste Rückstände und 5,0 Tonnen flüssige Rückstände an.
- Bei der Heißverlösung carnallitischer Rohsalze fallen pro Tonne verkaufsfähiges MOP-Fertigprodukt etwa 3,3 Tonnen feste Rückstände und 3,4 Tonnen flüssige Rückstände an.
- Bei der Heißverlösung sylvinitischer Rohsalze fallen pro Tonne verkaufsfähiges MOP-Fertigprodukt etwa 2,9 Tonnen feste Rückstände und 0,2 Tonnen flüssige Rückstände an.
- Bei der solaren Evaporation technischer sowie natürlicher Lösungen und anschließender Flotation der Kristallisat-Zwischenprodukte fallen pro Tonne verkaufsfähiges MOP-Fertigprodukt zwischen 2,6 und 8,8 Tonnen feste Rückstände und nur sehr untergeordnet kleine Mengen flüssige Rückstände an.
- Bei der solaren Evaporation technischer sowie natürlicher Lösungen und anschließender Heißverlösung der Kristallisat-Zwischenprodukte fallen pro Tonne verkaufsfähiges MOP-Fertigprodukt etwa 8,5 Tonnen feste Rückstände und ebenfalls nur sehr untergeordnet kleine Mengen flüssige Rückstände an.

- Bei der elektrostatischen Aufbereitung kieseritischer Hartsalze und anschließender Flotation der Konzentrate fallen pro Tonne verkaufsfähiges Fertigprodukt etwa 3,0 Tonnen feste Rückstände an.

Für die Gesamtmenge dieser Aufbereitungsrückstände gibt es nach heutigem Stand der Technik keine Verwertungsmöglichkeit. An nahezu allen Produktionsstandorten werden jedoch Teilmengen dieser festen und flüssigen Rückstände als Nebenprodukte vermarktet (▸ Kapitel 6 und 7). Aus sehr vielfältigen Gründen kann eine solche Verwertung aber nicht für den verbleibenden Teil der Rückstände erreicht werden, weshalb dieser einer Beseitigung zugeführt werden muss.

In der öffentlichen Diskussion wurden und werden auch aktuell wieder Verfahrensvorschläge zur qualitativ oder quantitativ erweiterten Verwertung solcher Rückstände der Kalidüngemittelproduktion unterbreitet. Diese Verfahrensvorschläge sind vielfach technisch nicht machbar und/oder ökologisch nicht nachhaltig oder aber nach den zur Zeit am internationalen Kalidüngemittelmarkt herrschenden ökonomischen Rahmenbedingungen einem Unternehmen wirtschaftlich nicht zumutbar. Alle diese Verfahrensvorschläge gehören für den beabsichtigten Zweck nicht zum Stand der Technik, sind sie doch weder in der Praxis erprobt worden, noch haben sie sich in einer industriellen Anlage bewährt. Diese Beurteilung ändert sich auch nicht für solche Verfahrensvorschläge, die in einzelnen Prozessschritten auf solche Methoden, Verfahren und Anlagen Bezug nehmen, wie sie bei der Kalidüngemittelproduktion Verwendung finden, da dort andersartige Ausgangsstoffe einbezogen werden und/oder unterschiedliche Randbedingungen herrschen.

Folgerichtig muss der derzeitige, also Mitte der zweiten Dekade des 21. Jahrhunderts bestehende Stand der Technik zur Produktion von Kalidüngemitteln deshalb explizit auch solche Methoden, Verfahren und Anlagen einschließen, die der Beseitigung der bei der Kalidüngemittelproduktion unvermeidbar anfallenden festen und flüssigen Aufbereitungsrückstände sowie der durch die Aufhaldung der festen Aufbereitungsrückstände anfallenden Salzlösungen dienen. Der dabei heute vorliegende Stand der Technik ist in folgender Weise definiert:

Feste Rückstände fallen sowohl bei der Gewinnung, vor allem aber bei der Aufbereitung fester Kalirohsalze aus Bergmännischer Gewinnung, als auch bei der Aufbereitung technischer Lösungen aus der Soltechnischen Gewinnung fester Kalisalzlagerstätten und ebenso bei der Aufbereitung natürlicher Lösungen an. Mengenmäßig überwiegen bei weitem solche Rückstände, die aus der Aufbereitung fester Kalirohsalze resultieren, da mit diesen Verfahren mehr als 80 Prozent der weltweiten Kaliprodukte erzeugt werden.

Die Gewinnungsrückstände, das heißt die beim Prozess der Rohstoffgewinnung unter Tage aus technischen und/oder bergbausicherheitlichen Erwägungen unvermeidbar mit abgebauten wertstofffreien bzw. -armen Gesteinsvolumina, werden in nahezu allen Gewinnungsbetrieben bereits seit Jahrzehnten in Form von Sofortversatz unter Tage beseitigt. Darüber hinaus werden etwa 9 Prozent der weltweit bei dem über Tage stattfindenden Aufbereitungsprozess fester Rohsalze unvermeidbar anfallenden festen Rückstände als Versatz in Bergwerke zurück nach unter Tage verbracht. Der Versatz von über Tage anfallenden festen Aufbereitungsrückständen durch Rückführung nach unter Tage und Einbringung in die Abbauhohlräume findet heute in lediglich 8 der insgesamt 35 Kalibergwerken statt. Das Versatzeinbringen ist durch die Dualität der Verwertung der physikalischen Eigenschaften des Versatzmaterials zur Unterstützung der Tragelemente im Hohlraumsystem und der Beseitigung von bergbaulichen Abfällen gekennzeichnet. In 7 Anwendungsfällen ist der Versatz der geomechanischen Stabilisierung der Kammer-Pfeilersysteme und der Minimierung der Senkungen über Tage gewidmet oder aber verfahrenstechnisch für die Machbarkeit des Gewinnungsverfahrens notwendig und dann aus diesen Gründen auch bergbehördlich angewiesen. Im Falle des Kalibergwerkes Boulby, Großbritannien, mag der Beseitigungsaspekt gegenüber der geomechanischen Aufgabenstellung überwiegen, obgleich mit der Reduzierung des offenen Grubenhohlraumes auch hier ein Beitrag zur Verminderung der Senkungen an der Tagesoberfläche erzielt wird.

In allen anderen Kalibergwerken, also in mehr als drei Viertel der heute die Bergmännische Gewinnung von festen Kalirohsalzen im geologischen Untergrund praktizierenden Betriebe, wird kein Versatz von festen Aufbereitungsrückständen praktiziert.

Heute werden etwas mehr als 80 Prozent der bei der Kalidüngemittelproduktion weltweit insgesamt anfallenden festen Aufbereitungsrückstände an der Erdoberfläche durch Ablagerung entweder in kompakten Schüttguthalden oder in Spülhalden beseitigt. An insgesamt 32 der heute in Betrieb befindlichen Produktionsanlagen findet dieser der beseitigten Rückstandsmenge nach wichtigste Entsorgungspfad Anwendung. Die Art des Transportes und der Ablagerung bestimmen sowohl den morphologischen Haldentypus als auch seine interne Struktur und letztlich auch die spezifische Flächeninanspruchnahme.

Hauptsächlich infolge der auf die Haldenoberfläche einwirkenden Niederschläge fallen an all diesen 32 Standorten der Kalidüngemittelproduktion, die eine solche Aufhaldung betreiben, mineralisierte Salzlösungen zur Beseitigung an. Ihre Menge wird durch die klimatischen Randbedingungen bestimmt und variiert dementsprechend erheblich.

Mehr als 10 Prozent der festen Rückstände werden in wässrigen Lösungen aufgelöst und zum Teil auch gemeinsam mit flüssigen Aufbereitungsrückständen über Fließgewässer dem Meerwasser zugeführt beziehungsweise durch Versenkung in geologische Speicherhorizonte in den geologischen Untergrund beseitigt. Solche Beseitigungspfade finden auch für die festen Aufbereitungsrückstände Anwendung, die bei der Aufbereitung von technischen Lösungen aus der Soltechnischen Gewinnung fester Kalirohsalze anfallen. Die bei der solaren Evaporation natürlicher Lösungen anfallenden festen Rückstände werden in der Regel im Umfeld der Evaporationsbecken beseitigt.

Die Beseitigung der im Aufbereitungsprozess als wässrige Lösungen anfallenden flüssigen Rückstände erfolgt durch ihre Einleitung in Fließgewässer, über die sie letztlich in das Meer transportiert werden, beziehungsweise durch Versenkung in den geologischen Untergrund. Immerhin 17 der heute in Betrieb befindlichen Produktionsanlagen nutzen die Versenkung in den geologischen Untergrund als Beseitigungsweg für flüssige und zum Teil auch für speziell zu diesem Zweck aufgelöste feste Aufbereitungsrückstände, was oben bereits erwähnt worden ist. Insgesamt 12 der heute in Betrieb befindlichen Produktionsanlagen nutzen für die flüssigen Aufbereitungsrückstände sowie die durch die Aufhaldung der festen Aufbereitungsrückstände anfallenden Salzlösungen die direkte Einleitung in Fließgewässer und den Weitertransport zum Meer als Beseitigungspfad. An den 3 küstennahen Produktionsstandorten erfolgt die Beseitigung der flüssigen Aufbereitungsrückstände, an 2 Standorten auch gemeinsam mit den partiell aufgelösten festen Aufbereitungsrückständen als Suspension, über Rohrleitungssysteme direkt in ozeanische Gewässer.

Die bei der Entsorgung genutzten, in Kapitel 8 eingehend beschriebenen Methoden, Verfahren und Anlagen unterscheiden sich zwischen den einzelnen Standorten nur gering voneinander, weisen jedenfalls keine signifikanten technischen Unterschiede auf, sind stets aber für den jeweiligen Standort angepasst worden um die bestmögliche technische und ökologische Effizienz und damit auch ökonomische Attraktivität zu garantieren. Welche zum Teil komplexen Wechselwirkungen zwischen den lagerstättengeologischen, den berg- und aufbereitungstechnischen und auch den klimatischen wie infrastrukturellen Randbedingungen für die möglichen Entsorgungspfade bestehen, wurde im Kapitel 7 ausführlich am Beispiel des Kaliwerkes Penobsquis in New Brunswick, Kanada, erläutert. Dort sind es vor allem die sehr geringen Preise für die Erdgasbereitstellung, die eine drastische Reduzierung der flüssigen Aufbereitungsrückstände und deren Verwertung zur Kalidüngemittelproduktion möglich machen.

Alle diese Methoden, Verfahren und Anlagen zur Entsorgung von Aufbereitungsrückständen sind wissenschaftlich begründet, wurden in der Praxis erprobt und haben sich bewährt. Sie repräsentieren gleichfalls alle gemeinsam den heutigen Stand der Technik bei der Entsorgung von festen und flüssigen Aufbereitungsrückständen aus der Kalidüngemittelproduktion. Auch sie stellen keine untereinander konkurrierenden, weniger oder mehr entwickelten technischen Methoden oder Verfahren oder Anlagen im Sinne einer auf Fortschritt gerichteten Entwicklung dar, sondern sind gleichfalls vielmehr das Ergebnis eines meist langwierigen Optimierungsprozesses, der die an den einzelnen Standorten ausgesprochen verschiedenartigen Randbedingungen – insbesondere die klimatischen und die infrastrukturellen Verhältnisse – berücksichtigt hat. Sie repräsentieren stets das technisch Erforderliche, in vielen Fällen auch das heute technisch Mögliche soweit das Letztgenannte dem wirtschaftlich Machbaren gleichkommt.

An den weltweit 71 Standorten, an denen Kalidüngemittelprodukte auf der Grundlage natürlicher Rohstoffe erzeugt werden, sind Methoden, Verfahren und Anlagen im Einsatz, die in ihrer Gesamtheit dem heutigen Stand der Technik entsprechen, obgleich diese Produktionsstandorte bereits seit vielen Jahrzehnten betrieben werden. Dies ist keinesfalls ein Widerspruch, da die Betreiber dieser Standorte mindestens sporadische Modernisierungen von ganzen Anlagen oder Anlagenteilen, vielfach jedoch auch laufende Optimierungen vorgenommen haben und vornehmen und somit auch gemeinsam mit Ingenieurunternehmen und Herstellern der maschinentechnischen Ausrüstungen eine auf Fortschritt orientierte Weiterentwicklung des Standes der Technik realisiert haben und auch künftig zum Erhalt ihrer Wettbewerbsfähigkeit realisieren müssen. Davon legen nicht zuletzt die umfangreichen *brownfield* Investitionen Zeugnis ab, was die folgenden wenigen Beispiele zeigen sollen: Der Markführer URALKALI hat allein im Zeitraum 2011 bis 2015 knapp 2 Milliarden US-Dollar zur Modernisierung von je 2 bestehenden Produktionsanlagen an den Standorten Berezniki und Solikamsk, Obere Kama, Russland, investiert. Der kanadische Produzent PCS hat seit 2003 in Saskatchewan, Kanada, über 8 Milliarden US-Dollar zur Modernisierung seiner 6 Kaliwerke investiert. Der deutsche Produzent K+S hat seit 2011 allein für den Gewässerschutz im Verbundwerk Werra etwa 400 Millionen Euro investiert.

Auch die direkt bei den Produzenten oder in Partnerschaft mit akademischen und industrienahen Forschungseinrichtungen oder auch Ingenieurbüros durchgeführten F/E-Arbeiten dürfen im Hinblick auf die auch zukünftig stattfindende Fortentwicklung des Standes der Technik nicht unerwähnt bleiben, sind es doch vor allem ihre Resultate, die im Sinne der eingangs erwähnten Hermann Hesse'schen Maxime letztlich erst eine fundierte Unterscheidung des in unserer heutigen ökologischen, ökonomischen, politischen und juristischen Wirklichkeit *Möglichen* von dem zurzeit oder ganz und gar *Unmöglichen* erlauben.

10 STANDORT-STECKBRIEFE

Dieses letzte Kapitel des Buches stellt ein Addendum zu den vorstehenden 9 Kapiteln dar, in dem die weltweit insgesamt 71 Standorte, an denen im Jahr 2014 im planmäßigen industriellen Betrieb Kalirohstoffe gewonnen und/oder zu Kalidüngemitteln aufbereitet wurden, in einer Art STANDORT-STECKBRIEFE charakterisiert werden sollen. Alle 71 Standorte sind in individuellen Abschnitten ihren Betreibern, den Kalidüngemittelproduzenten zugeordnet. Der Reihenfolge der Beschreibung der einzelnen Kaliproduzenten und deren Produktionsstandorte liegt als Gliederungsprinzip die Auflistung nach der heute, also Mitte des Jahres 2015 installierten Produktionskapazität zugrunde. Vorsorglich sei darauf hingewiesen, dass sich an vielen Produktionsstandorten zurzeit beziehungsweise in den nächsten Jahren auch Veränderungen zum Produktionsumfang ergeben, weshalb die hier vorgenommene statistische Sortierung nur eine Momentaufnahme darstellen kann.

H. Rauche, *Die Kaliindustrie im 21. Jahrhundert,*
DOI 10.1007/978-3-662-46834-0_10, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

1 URALKALI, Russland 301

1.1 Meilensteine der Kalidüngemittelproduktions- und Unternehmensgeschichte 302
1.2 Betriebs- und volkswirtschaftliche Kennziffern des Unternehmens URALKALI 303
1.3 Kaliwerk Solikamsk 3, Perm, Russland 304
1.4 Kaliwerk Berezniki 4, Perm, Russland 307
1.5 Kaliwerk Solikamsk 2, Perm, Russland 310
1.6 Kaliwerk Berezniki 3, Perm, Russland 313
1.7 Kaliwerk Berezniki 2, Perm, Russland 315
1.8 Kaliwerk Solikamsk 1, Perm, Russland 318

2 POTASH CORPORATION OF SASKATCHEWAN, Kanada 321

2.1 Meilensteine der Kalidüngemittelproduktions- und Unternehmensgeschichte 322
2.2 Betriebs- und volkswirtschaftliche Kennziffern für das Geschäftsfeld Kaliprodukte im Konzern Potash Corporation of Saskatchewan 323
2.3 Kaliwerk Lanigan, Saskatchewan, Kanada 324
2.4 Kaliwerk Rocanville, Saskatchewan, Kanada 327
2.5 Kaliwerk Allan, Saskatchewan, Kanada 330
2.6 Kaliwerk Cory, Saskatchewan, Kanada 333
2.7 Kaliwerk Penobsquis und Kalibergwerk Picadilly, New Brunswick, Kanada 336
2.8 Kaliwerk Patience Lake, Saskatchewan, Kanada 339
2.9 Kaliwerk Esterhazy, Saskatchewan, Kanada 342

3 MOSAIC, Kanada und USA 343

3.1 Meilensteine der Kalidüngemittelproduktions- und Unternehmensgeschichte 344
3.2 Betriebs- und volkswirtschaftliche Kennziffern für das Geschäftsfeld Kalidüngemittelprodukte im Konzern MOSAIC 345
3.3 Kaliwerke Esterhazy K1 und K2, Saskatchewan, Kanada 346
3.4 Kaliwerk Belle Plaine, Saskatchewan, Kanada 351
3.5 Kaliwerk Colonsay, Saskatchewan, Kanada 354
3.6 Kaliwerk Carlsbad, New Mexico, USA 357
3.7 Kaliwerk Hersey, Michigan, USA 359

4 BELARUSKALI, Belarus 361

4.1 Meilensteine der Kalidüngemittelproduktions- und Unternehmensgeschichte 362
4.2 Betriebs- und volkswirtschaftliche Kennziffern des Unternehmens BELARUSKALI 363
4.3 Kaliwerk Soligorsk 4, Minskaja Woblasz, Belarus 364
4.4 Kaliwerk Soligorsk 3, Minskaja Woblasz, Belarus 367
4.5 Kaliwerk Soligorsk 2, Minskaja Woblasz, Belarus 370
4.6 Kaliwerk Soligorsk 1, Minskaja Woblasz, Belarus 373
4.7 Kalibergwerk Soligorsk 5 (Krasnoslobodsky), Minskaja Woblasz, Belarus 376
4.8 Kalibergwerk Soligorsk 6 (Berezowsky), Minskaja Woblasz, Belarus 379

5 China 381

5.1 Meilensteine der Kalidüngemittelproduktions- und Unternehmensgeschichte sowie betriebs- und volkswirtschaftliche Kennziffern 382

6 K+S KALI, Deutschland 387

6.1 Meilensteine der Kalidüngemittelproduktions- und Unternehmensgeschichte 388
6.2 Betriebs- und volkswirtschaftliche Kennziffern für das Geschäftsfeld Kali- und Magnesium-Produkte der K+S GRUPPE 389
6.3 Verbundwerk Werra, Hessen/Thüringen, Deutschland 390
6.4 Kaliwerk Zielitz, Sachsen-Anhalt, Deutschland 396
6.5 Kaliwerk Neuhof-Ellers, Hessen, Deutschland 399
6.6 Kaliwerk Sigmundshall, Niedersachsen, Deutschland 402

7 ICL FERTILIZERS, Israel, Spanien und Großbritannien 405

7.1 Meilensteine der Kalidüngemittelproduktions- und Unternehmensgeschichte 406
7.2 Betriebs- und volkswirtschaftliche Kennziffern für das Geschäftsfeld Kalidüngemittelproduktion im Konzern ISRAEL CHEMICAL LTD. 407
7.3 Kaliwerk Dead Sea von DEAD SEA WORKS, Südbezirk, Israel 408
7.4 Kaliwerke und Kalibergwerke von ICL IBERIA S & S, Katalonien, Spanien 412
7.5 Kaliwerk Boulby von CLEVELAND POTASH, Borough of Redcar and Cleveland, Großbritannien 419

8 ARAB POTASH COMPANY, Jordanien 423

8.2 Meilensteine der Kalidüngemittelproduktions- und Unternehmensgeschichte 424
8.1 Betriebs- und volkswirtschaftliche Kennziffern des Unternehmens Arab Potash Company 425
8.3 Kaliwerk Safi, Gouvernement al-Karak, Jordanien 426

9 AGRIUM, Kanada 429

9.1 Meilensteine der Kalidüngemittelproduktions- und Unternehmensgeschichte 430
9.2 Betriebs- und volkswirtschaftliche Kennziffern für das Geschäftsfeld Kalidüngemittelprodukte im Konzern AGRIUM 431
9.3 Kaliwerk Vanscoy, Saskatchewan, Kanada 432

10 SOCIEDAD QUÍMICA Y MINERA, Chile 435

10.1 Meilensteine der Kalidüngemittelproduktions- und Unternehmensgeschichte 436
10.2 Betriebs- und volkswirtschaftliche Kennziffern für das Geschäftsfeld Kalidüngemittelprodukte im Konzern SQM 437
10.3 Kaliwerk Salar de Atacama, Antofagasta, Chile 438

11 INTREPID POTASH, USA 441

11.1 Meilensteine der Kalidüngemittelproduktions- und Unternehmensgeschichte 442
11.2 Betriebs- und volkswirtschaftliche Kennziffern des Unternehmens INTREPID 443
11.3 Kaliwerke Carlsbad East und Carlsbad West, New Mexico, USA 444
11.4 Kaliwerk Moab, Utah, USA 448
11.5 Kaliwerk Wendover, Utah, USA 451

12 VALE, Brasilien 455

12.1 Meilensteine der Kalidüngemittelproduktions- und Unternehmensgeschichte 456
12.2 Betriebs- und volkswirtschaftliche Kennziffern für das Geschäftsfeld Kalidüngemittelprodukte im Konzern VALE 457
12.3 Kaliwerk Taquari Vassouras, Sergipe, Brasilien 458

13 COMPASS MINERALS INTERNATIONAL, USA 461

13.1 Meilensteine der Kalidüngemittelproduktions- und Unternehmensgeschichte 462
13.2 Betriebs- und volkswirtschaftliche Kennziffern für das Geschäftsfeld Kalidüngemittelprodukte im Konzern COMPASS 463
13.3 Kaliwerk Great Salt Lake, Utah, USA 464

14 UZKIMYOSANAT, Usbekistan 467

14.1 Kaliwerk Dechkanabad, Kashkadarya, Usbekistan 468

15 DEUSA INTERNATIONAL, Deutschland 471

15.1 Meilensteine der Kalidüngemittelproduktions- und Unternehmensgeschichte 472
15.2 Betriebs- und volkswirtschaftliche Kennziffern des Unternehmens DEUSA 472
15.3 Kaliwerk Kehmstedt/Bleicherode, Thüringen, Deutschland 473



1 URALKALI, RUSSLAND

PAO URALKALI (URALKALI) produziert ausschließlich Kalidüngemittel und diese nur in der Region Perm, im westlichen Uralvorland, Russland. URALKALI ist ein börsennotiertes Unternehmen, das an den Finanzhandelsplätzen in Moskau (RTS:URKA) und London (FTSE:URKA) gehandelt wird.

Im Jahre 2013 produzierte URALKALI rund 10 Millionen Tonnen MOP und war damit der größte Kalidüngemittelproduzent der Welt. Nach der heute installierten Produktionskapazität rangiert URALKALI ebenfalls auf Platz 1.

Mehr als 80 Prozent der Kalidüngemittelproduktion von URALKALI wird exportiert, vornehmlich in Länder nach Südostasien, China, Indien und Brasilien.

URALKALI betreibt auf 5 Kalibergwerken in Teufen zwischen 250 und 500 Meter ausschließlich Bergmännische, mehrheitlich Schneidende Gewinnung fast ausschließlich von Sylvinit. In 6 Aufbereitungsanlagen werden die sylvinitischen Rohsalze hauptsächlich durch Flotation, ein kleinerer Anteil mittels Heißverlösung und Kristallisation, zu verkaufsfähigen Kalidüngemitteln aufbereitet.

URALKALI plant unter anderem Erhöhungen der Förder- und Aufbereitungskapazität im Kaliwerk Solikamsk 3 von 0,4 Millionen Tonnen bis Ende 2015 und durch den Aufschluss neuer Lizenzgebiete, zum Beispiel dem im Bau befindlichen Kalibergwerk Ust Jaiwa mit einer geplanten jährlichen Produktionskapazität von 2,8 Millionen Tonnen bis 2020. Weiterhin ist der Neuaufschluss des Feldes Polovodovskij mit einer jährlichen Kapazität von 2,8 Millionen Tonnen geplant.

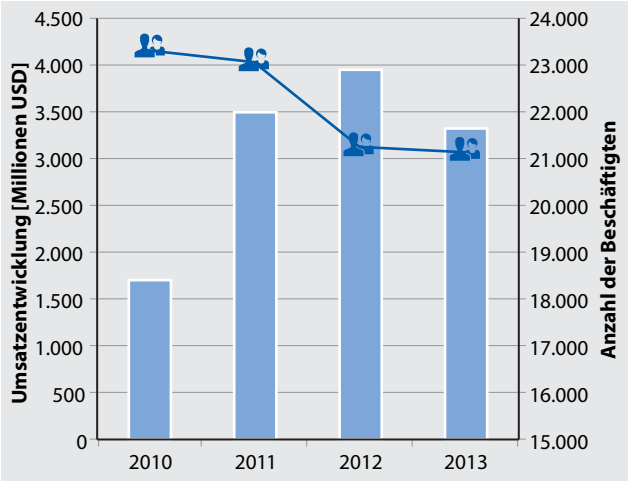
1.1 Meilensteine der Kalidüngemittelproduktions- und Unternehmensgeschichte

1925	Entdeckung der Verchnekamskoe-Lagerstätte während Bohrarbeiten um Solikamsk
1926	Gründung von SOJUSKALI «Союзкалий»
1927	Baubeginn des Kaliwerkes Solikamsk 1 (später SILVINIT)
1930	SOJUSKALI beschließt den Bau eines zweiten Kombinates in Berezniki
1932	Beginn der Teufarbeiten von Schacht 1 und 2 des Kaliwerkes Berezniki 1, Durchschlag zwischen den Schächten im Jahre 1935
1934	Beginn der Kalidüngemittelproduktion im Kaliwerk Solikamsk 1
1936	Stilllegung der Arbeiten aufgrund von Finanzierungsproblemen
1942	Inbetriebnahme des Kaliwerkes Berezniki 1, zunächst nur Steinsalzproduktion
1944	Produktionsbeginn des Kaliwerkes Berezniki 1 von Carnallitit zur Belieferung von AVISMA[1]
1954	Beginn der Kalidüngemittelproduktion im Kaliwerk Berezniki 1
1962	Carnallitit-Produktion im Kaliwerk Berezniki 1 erreicht 180.000 Tonnen pro Jahr
1963	Inbetriebnahme der ersten Flotationslinie im Kaliwerk Berezniki 1
1964	Baubeginn für das Kaliwerk Berezniki 2, Zusammenschluss der Kaliwerke Berezniki 1 und 2 sowie Solikamsk zu URALKALI
1965	Baubeginn des Kaliwerkes Berezniki 3
1973	Beginn der Kalidüngemittelproduktion im Kaliwerk Berezniki 3
1983	Ausgliederung des Werkes Solikamsk aus URALKALI und Gründung von SILVINIT «Сильвинит»
1986	Ersaufen des Kalibergwerkes Berezniki 3, Beschleunigung der Teufarbeiten des Kalibergwerkes Berezniki 4, damit die Aufbereitungsanlage des Kaliwerkes Berezniki 3 mit Rohsalz aus dem Kalibergwerk Berezniki 4 beliefert werden kann, Beginn der Rohsalzförderung im Kalibergwerk Berezniki 4
1992	Inbetriebnahme der Heißverlösung im Kaliwerk Berezniki 4, Umwandlung beider ehemaligen Kombinate URALKALI und SILVINIT in offene Aktiengesellschaften
2001	Eröffnung des Baltic Bulk Terminals (BBT) in St. Petersburg
2006	Ersaufen des Kalibergwerkes Berezniki 1
2007	IPO[2] von URALKALI in London
2011	Aktionärsbeschluss führt zum Zusammenschluss von URALKALI und SILVINIT
2012	Baubeginn des Kalibergwerkes Ust Jaiwa
2014	Lösungszutritte im Kalibergwerk Solikamsk 2 führen zur (vorübergehenden) Einstellung der Förderung

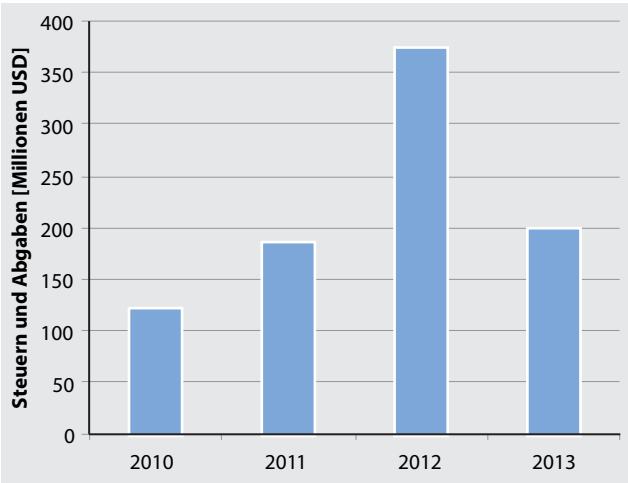
1 AVISMA ist ein seit 1934 Magnesium-Metall produzierendes Werk, welches heute 17.000 Tonnen Magnesium-Fertigprodukt pro Jahr herstellt.

2 IPO, Abkürzung für den englischen Begriff *Initial Public Offering*, das erstmalige Angebot zum Kauf von Aktien eines Unternehmens auf dem organisierten Kapitalmarkt, wird in der deutschen Umgangssprache als Börsengang bezeichnet.

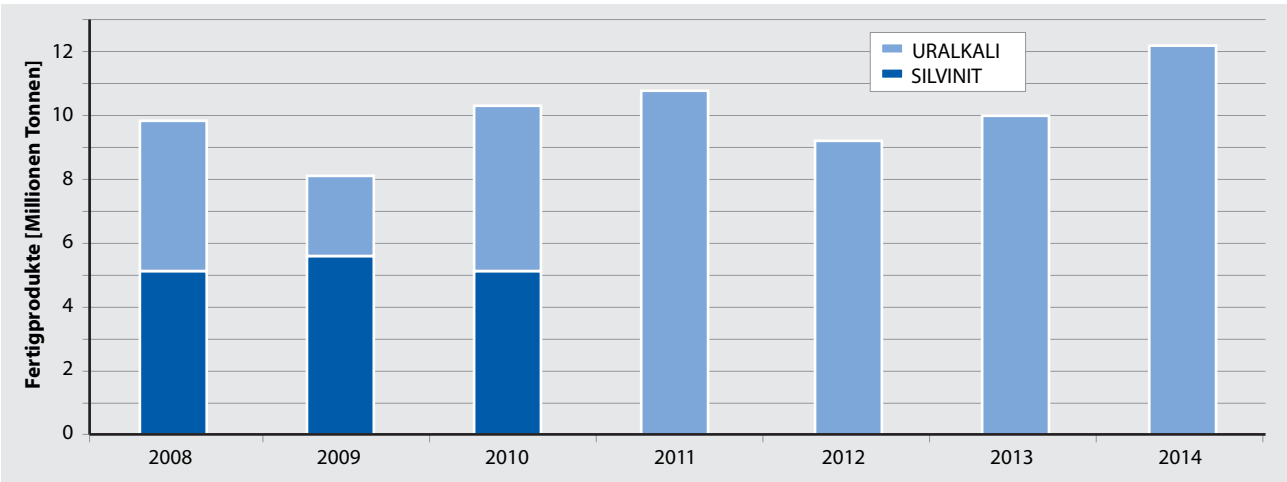
1.2 Betriebs- und volkswirtschaftliche Kennziffern des Unternehmens URALKALI



Umsatzentwicklung und Anzahl der Beschäftigten von URALKALI im Zeitraum von 2010 bis 2013



Entwicklung der Steuern und Abgaben auf Erträge aus der Kalidüngemittelproduktion von URALKALI im Zeitraum von 2010 bis 2013



Entwicklung der Kalidüngemittelproduktion von URALKALI und SILVINIT bis 2010 und vom fusionierten Unternehmen URALKALI bis 2014

1.3 Kaliwerk Solikamsk 3, Perm, Russland



Übersicht des Kaliwerkes Solikamsk 3, URALKALI, mit den Produktionsanlagen über Tage, der kompakten Schüttguthalde für die festen Aufbereitungsrückstände und den Becken für die Klärung sowie Speicherung der flüssigen Aufbereitungsrückstände und Schlämme beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, im Satellitenbild



Tagesschächte und Verwaltungsgebäude des Kaliwerkes Solikamsk 3, URALKALI



Tagesschacht und Aufbereitungsgebäude des Kaliwerkes Solikamsk 3, URALKALI

Überblick Kaliwerk Solikamsk 3

Geografische Lage	8 Kilometer östlich der Stadt Solikamsk, im Zentrum der Region Perm in Russland	
Produktionseinrichtungen	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	
Historie	1983	Beginn der Förderung von Kalirohsalzen
Tatsächliche Produktion	2,77 Millionen Tonnen KCl (2014)	
Installierte Produktionskapazität	3,50 Millionen Tonnen KCl pro Jahr (2014)	
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Obere Kama, Neu-Solikamskij Feld Kalilager AB und W, Irensk-Folge, Kungur, Unteres Perm	
Kalirohstoff	Sylvinit	
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	15 Prozent K_2O	
Gewinnbare Vorräte[3]	*Proven reserves* *Probable reserves*	127,1 Millionen Tonnen Sylvinit 132,7 Millionen Tonnen Sylvinit
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Schneidende Gewinnung im Langkammerpfeilerbau	
Aufbereitungsverfahren	Flotation	
Kaliprodukte	MOP *standard*	
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände Flüssige Rückstände	Aufhaldung von mehr als 6,00 Millionen Tonnen pro Jahr Versatz (2011 Plan) gesamt 1,85 Millionen Tonnen, davon: • 1,81 Millionen Tonnen hydraulischer Versatz • 0,04 Millionen Tonnen Schlamm Einleitung in Sammelbecken Verbringen eines Teiles nach unter Tage
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage Rückstandshalde Rückstandsbecken	105 Hektar 140 Hektar 40 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Mittels Eisenbahn, untergeordnet mittels Binnenschiffen auf dem Fluss Kama zu den lokalen Abnehmern und zu den Ostseehäfen von St. Petersburg, Russland, Klaipeda, Litauen, und Ventspils, Lettland, sowie den Schwarzmeerhäfen Noworossijsk, Russland, Mykolajiw und Izmail, Ukraine	

3 Die international üblichen Bezeichnungen *proven* und *probable reserves* zur Klassifikation mineralischer Vorräte sind ausführlich im Abschnitt 4.1 Box 4.1 erklärt.

1.4 Kaliwerk Berezniki 4, Perm, Russland



© 2013 TerraServer, Digital Globe, Bildaufnahmedatum: 9.05.2010

Übersicht des Kaliwerkes Berezniki 4, URALKALI, mit den übertägigen Produktionsanlagen, der kompakten Schüttguthalde für die festen Aufbereitungsrückstände und den Becken für die Klärung sowie Speicherung der flüssigen Aufbereitungsrückstände und Schlämme beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, im Satellitenbild



Gesamtansicht der Produktionsanlagen über Tage des Kaliwerkes Berezniki 4, URALKALI, im Luftbild [Foto mit freundlicher Genehmigung von PAO Uralkali, Berezniki, Russland]

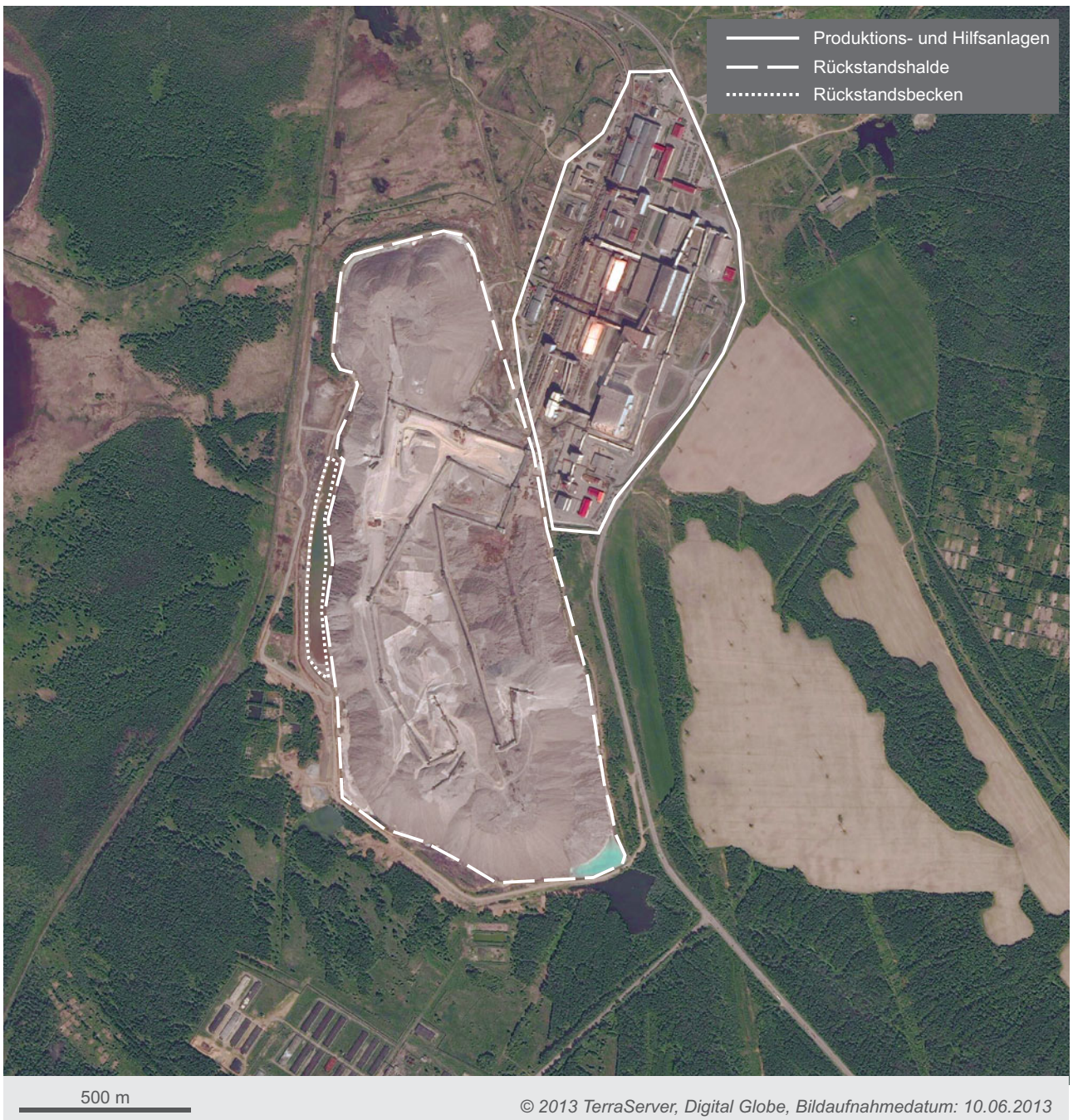


Produktionsanlagen über Tage des Kaliwerkes Berezniki 4, URALKALI [Foto mit freundlicher Genehmigung von PAO Uralkali, Berezniki, Russland]

Überblick Kaliwerk Berezniki 4

Geografische Lage	5 Kilometer östlich der Stadt Berezniki, im Zentrum der Region Perm in Russland	
Produktionseinrichtungen	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	
Historie	1986 1992	Förderbeginn Kalibergwerk Berezniki 4 Beginn der Kalidüngemittelproduktion
Tatsächliche Produktion	2,45 Millionen Tonnen KCl (2014)	
Installierte Produktionskapazität	3,50 Millionen Tonnen KCl pro Jahr (2014)	
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Obere Kama, Bygelsko-Troitskij Feld Kalilager *Krasnyj II* und *AB*, Irensk-Folge, Kungur, Unteres Perm	
Kalirohstoff	Sylvinit	
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	18 – 20 Prozent K_2O	
Gewinnbare Vorräte	*Proven reserves* *Probable reserves*	173,9 Millionen Tonnen Sylvinit 162,3 Millionen Tonnen Sylvinit
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Schneidende Gewinnung im Langkammerpfeilerbau	
Aufbereitungsverfahren	Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation	
Kaliprodukte	MOP *standard*	
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände Flüssige Rückstände	Fast vollständige Aufhaldung von mehr als 6 Millionen Tonnen im Jahr Einbringen von geringen Mengen an unlöslichen Bestandteilen in speziell dafür aufgefahrene Abbaukammern im Steinsalz als Spülversatz Einleitung in Sammelbecken Verbringen eines Teiles nach unter Tage
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage Rückstandshalde Rückstandsbecken	165 Hektar 100 Hektar 14 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Mittels Eisenbahn, untergeordnet mittels Binnenschiffen auf dem Fluss Kama zu den lokalen Abnehmern und zu den Ostseehäfen von St. Petersburg, Russland, Klaipeda, Litauen, und Ventspils, Lettland, sowie den Schwarzmeerhäfen Noworossijsk, Russland, Mykolajiw und Izmail, Ukraine	

1.5 Kaliwerk Solikamsk 2, Perm, Russland



Übersicht des Kaliwerkes Solikamsk 2, URALKALI, mit den Produktionsanlagen über Tage, der kompakten Schüttguthalde für die festen Aufbereitungsrückstände und den Becken für die Klärung sowie Speicherung der flüssigen Aufbereitungsrückstände und Schlämme beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, im Satellitenbild



Tagesschacht, Aufbereitungsgebäude und kompakte Schüttguthalde (Hintergrund) des Kaliwerkes Solikamsk 2, URALKALI



Tagesschächte, Aufbereitungsgebäude und Rückstandshalde des Kaliwerkes Solikamsk 2, URALKALI

Überblick Kaliwerk Solikamsk 2

Geografische Lage	7 Kilometer südlich der Stadt Solikamsk, im Zentrum der Region Perm in Russland	
Produktionseinrichtungen	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	
Historie	1973 November 2014	Beginn der Kalidüngemittelproduktion Lösungszutritte im Grubengebäude, infolgedessen das Bergwerk evakuiert und die Förderung eingestellt wurde
Tatsächliche Produktion	2,18 Millionen Tonnen KCl (2014)	
Installierte Produktionskapazität	3,00 Millionen Tonnen KCl pro Jahr (2014)	
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Obere Kama, Solikamskij Feld Kalilager *AB* und *W*, Irensk-Folge, Kungur, Unteres Perm	
Kalirohstoff	Sylvinit	
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	15 – 16 Prozent K_2O	
Gewinnbare Vorräte	*Proven reserves* *Probable reserves*	91,3 Millionen Tonnen Sylvinit 132,2 Millionen Tonnen Sylvinit
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Schneidende Gewinnung im Langkammerpfeilerbau	
Aufbereitungsverfahren	Flotation	
Kaliprodukte	MOP *standard* und MOP *granular*	
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände Flüssige Rückstände	Aufhaldung von etwa 4,00 Millionen Tonnen pro Jahr Versatz (Plan 2011) gesamt 3,44 Millionen Tonnen, davon: • 3,00 Millionen Tonnen hydraulischer Versatz • 0,10 Millionen Tonnen Schlamm • 0,34 Millionen Tonnen Sofortversatz Einleitung in Sammelbecken Verbringen eines Teiles nach unter Tage
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage Rückstandshalde Rückstandsbecken	53 Hektar 110 Hektar 3 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Mittels Eisenbahn, untergeordnet mittels Binnenschiffen auf dem Fluss Kama zu den lokalen Abnehmern und zu den Ostseehäfen von St. Petersburg, Russland, Klaipeda, Litauen, und Ventspils, Lettland, sowie den Schwarzmeerhäfen Noworossijsk, Russland, Mykolajiw und Izmail, Ukraine	

1.6 Kaliwerk Berezniki 3, Perm, Russland



Übersicht des Kaliwerkes Berezniki 3, URALKALI, mit den übertägigen Produktionsanlagen, der kompakten Schüttguthalde für die festen Aufbereitungsrückstände und den Becken für die Klärung sowie Speicherung der flüssigen Aufbereitungsrückstände und Schlämme beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, im Satellitenbild



Aufbereitungsgebäude des Kaliwerkes Berezniki 3, URALKALI

Überblick Kaliwerk Berezniki 3

Geografische Lage	15 Kilometer südlich der Stadt Berezniki, Region Perm in Russland
Produktionseinrichtungen	Bergwerk ersoffen und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze
Historie	1965 – 1973 Bau des Kaliwerkes Berezniki 3 1973 Beginn der Kalidüngemittelproduktion 1986 Salzlösungszutritte ins Grubengebäude, in dessen Folge das Bergwerk abgesoffen ist seit 1986 Belieferung der Aufbereitungsanlage des Kaliwerkes Berezniki 3 aus den Kalibergwerken Berezniki 1 und 4 seit 2006 Rohsalzlieferung aus dem Kalibergwerk Berezniki 4 per Bahn und aus dem Kalibergwerk Berezniki 2 per LKW
Tatsächliche Produktion	1,64 Millionen Tonnen KCl (2014)
Installierte Produktionskapazität	2,90 Millionen Tonnen KCl pro Jahr (2014)
Aufbereitungsverfahren	Flotation
Fertigprodukte	MOP *standard* und MOP *granular*
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände Vollständige Aufhaldung von mehr als 4 Millionen Tonnen pro Jahr Flüssige Rückstände Einleitung in Sammelbecken
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage 52 Hektar Rückstandshalde 140 Hektar (inkl. Haldenerweiterung) Rückstandsbecken 6 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Mittels Eisenbahn, untergeordnet mittels Binnenschiffen auf dem Fluss Kama zu den lokalen Abnehmern und zu den Ostseehäfen von St. Petersburg, Russland, Klaipeda, Litauen, und Ventspils, Lettland, sowie den Schwarzmeerhäfen Noworossijsk, Russland, Mykolajiw und Izmail, Ukraine

1.7 Kaliwerk Berezniki 2, Perm, Russland



Übersicht des Kaliwerkes Berezniki 2, URALKALI, mit den übertägigen Produktionsanlagen, der kompakten Schüttguthalde für die festen Aufbereitungsrückstände und den Becken für die Klärung sowie Speicherung der flüssigen Aufbereitungsrückstände und Schlämme beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, im Satellitenbild



Tagesschächte, Aufbereitungs- und Verwaltungsgebäude des Kaliwerkes Berezniki 2, URALKALI
[Foto mit freundlicher Genehmigung von PAO Uralkali, Berezniki, Russland]



Transportschacht des Kaliwerkes Berezniki 2, URALKALI

Überblick Kaliwerk Berezniki 2

Geografische Lage	12 Kilometer südöstlich der Stadt Berezniki, im Zentrum der Region Perm in Russland	
Produktionseinrichtungen	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	
Historie	1964 1969	Baubeginn des Kaliwerkes Berezniki 2 Beginn der Kalidüngemittelproduktion
Tatsächliche Produktion	2,09 Millionen Tonnen KCl (2014)	
Installierte Produktionskapazität	2,40 Millionen Tonnen KCl pro Jahr (2014)	
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Obere Kama, Durymanskij Feld Kalilager *Krasnyj II* und *AB*, Irensk-Folge, Kungur, Unteres Perm	
Kalirohstoff	Sylvinit	
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	20 Prozent K_2O	
Gewinnbare Vorräte	*Proven reserves* *Probable reserves*	22,4 Millionen Tonnen Sylvinit 77,5 Millionen Tonnen Sylvinit
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Schneidende Gewinnung im Langkammerpfeilerbau	
Aufbereitungsverfahren	Flotation	
Kaliprodukte	MOP *standard* und MOP *granular*	
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände Flüssige Rückstände	Fast vollständige Aufhaldung von mehr als 5 Millionen Tonnen pro Jahr Einleitung in Sammelbecken
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage Rückstandshalde Rückstandsbecken	69 Hektar 210 Hektar 130 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Mittels Eisenbahn, untergeordnet mittels Binnenschiffen auf dem Fluss Kama zu den lokalen Abnehmern und zu den Ostseehäfen von St. Petersburg, Russland, Klaipeda, Litauen, und Ventspils, Lettland, sowie den Schwarzmeerhäfen Noworossijsk, Russland, Mykolajiw und Izmail, Ukraine	

1.8 Kaliwerk Solikamsk 1, Perm, Russland



Übersicht des Kaliwerkes Solikamsk 1, URALKALI, mit den Produktionsanlagen über Tage, der kompakten Schüttguthalde für die festen Aufbereitungsrückstände und den Becken für die Klärung sowie Speicherung der flüssigen Aufbereitungsrückstände und Schlämme beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen sowie den Produktionsanlagen des OAO SOLIKAMSKIJ MAGNIEWYJ SAVOD, im Satellitenbild



Förderschacht, Aufbereitungs- und Verwaltungsgebäude sowie Rückstandshalde (Hintergrund) des Kaliwerkes Solikamsk 1, URALKALI

Überblick Kaliwerk Solikamsk 1

Geografische Lage	1,5 Kilometer südlich der Stadt Solikamsk, im Zentrum der Region Perm in Russland	
Produktionseinrichtungen	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	
Historie	1927 1934	Baubeginn des Kaliwerkes Solikamsk 1 Beginn der Kalidüngemittelproduktion
Tatsächliche Produktion	1,01 Millionen Tonnen KCl (2014)	
Installierte Produktionskapazität	1,20 Millionen Tonnen KCl pro Jahr 0,30 Millionen Tonnen Magnesiumchlorid pro Jahr (2014)	
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Obere Kama, Solikamskij Feld Kalilager *AB* und *W*, Irensk-Folge, Kungur, Unteres Perm	
Kalirohstoff	Sylvinit, Carnallitit	
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	15 – 16 Prozent K_2O, etwa 10 Prozent MgO	
Gewinnbare Vorräte	*Proven reserves* *Probable reserves*	45,8 Millionen Tonnen Sylvinit, 12,9 Millionen Tonnen Carnallitit 46,1 Millionen Tonnen Sylvinit
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Schneidende Gewinnung im Langkammerpfeilerbau im Sylvinit Bohren und Sprengen im Carnallitit	
Aufbereitungsverfahren	Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation	
Kaliprodukte	MOP *standard*	
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände Flüssige Rückstände	Aufhaldung von etwa 0,40 Millionen Tonnen pro Jahr Versatz (Plan 2011) gesamt 2,85 Millionen Tonnen, davon: • 2,66 Millionen Tonnen hydraulischer Versatz • 0,15 Millionen Tonnen Schlamm • 0,05 Millionen Tonnen Sofortversatz Einleitung in Sammelbecken Verbringen eines Teiles nach unter Tage
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage Rückstandshalde Rückstandsbecken	75 Hektar 37 Hektar 20 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Mittels Eisenbahn, untergeordnet mittels Binnenschiffen auf dem Fluss Kama zu den lokalen Abnehmern und zu den Ostseehäfen von St. Petersburg, Russland, Klaipeda, Litauen, und Ventspils, Lettland, sowie den Schwarzmeerhäfen Noworossijsk, Russland, Mykolajiw und Izmail, Ukraine	



2 POTASH CORPORATION OF SASKATCHEWAN, KANADA

Die POTASH CORPORATION OF SASKATCHEWAN INC. (PCS) ist der weltgrößte Düngemittelproduzent für Fertigprodukte aller drei Hauptnährstoffe Kalium (K), Phosphat (P) und Stickstoff (N). PCS ist ein börsennotiertes Unternehmen, das am Finanzhandelsplatz in Toronto (TSX:POT) gehandelt wird.

Das Kalidüngemittelgeschäft nimmt einen Anteil von etwa 40 bis 50 Prozent am Gesamtumsatz ein. Im Jahre 2013 produzierte PCS 7,8 Millionen Tonnen MOP und war damit der drittgrößte Kalidüngemittelproduzent der Welt. Nach der heute installierten Produktionskapazität rangiert PCS auf Platz 2 der weltgrößten Kalidüngemittelproduzenten.

Mehr als 60 Prozent der Kalidüngemittelproduktion von PCS wird exportiert, hauptsächlich nach Nord- und Südamerika sowie nach Asien.

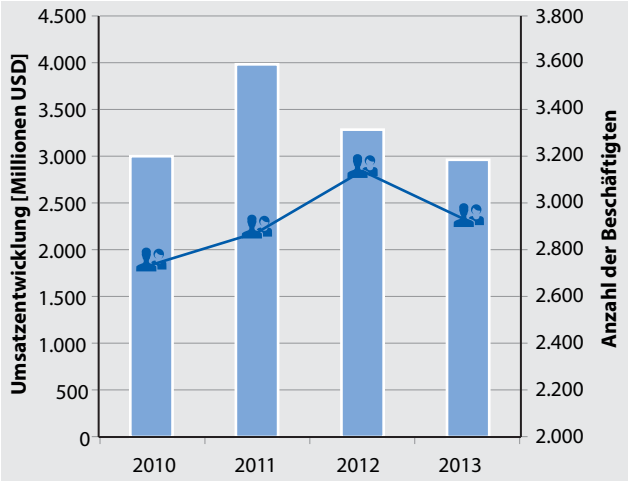
PCS betreibt auf 5 Kalibergwerken in Saskatchewan in Teufen zwischen 900 und 1.050 Meter und in zur Zeit 2 Kalibergwerken in New Brunswick in Teufen zwischen 400 und 700 Meter Bergmännische, Schneidende Gewinnung von Sylvinit. Im und um das ehemalige Kalibergwerk Patience Lake wird das sylvinitische Rohsalz mittels Soltechnischer Gewinnung abgebaut. In 6 Aufbereitungsanlagen werden die hauptsächlich sylvinitischen Rohsalze durch Flotation, ein kleinerer Anteil mittels Heißverlösung und Kristallisation zu Kalidüngemitteln aufbereitet. Die technischen Lösungen aus der Soltechnischen Gewinnung werden ausschließlich durch natürliche Kühlkristallisation zu Kalidüngemitteln aufbereitet.

PCS plant Kapazitätserweiterungen im Kaliwerk Rocanville mit dem Abteufen eines neuen Schachtes Scissors Creek und der Errichtung einer zweiten Aufbereitungslinie um 2,7 Millionen Tonnen pro Jahr. Des Weiteren ist mit dem Neubau des Kalibergwerkes Picadilly in New Brunswick eine jährliche Kapazitätserhöhung um 1,2 Millionen Tonnen geplant.

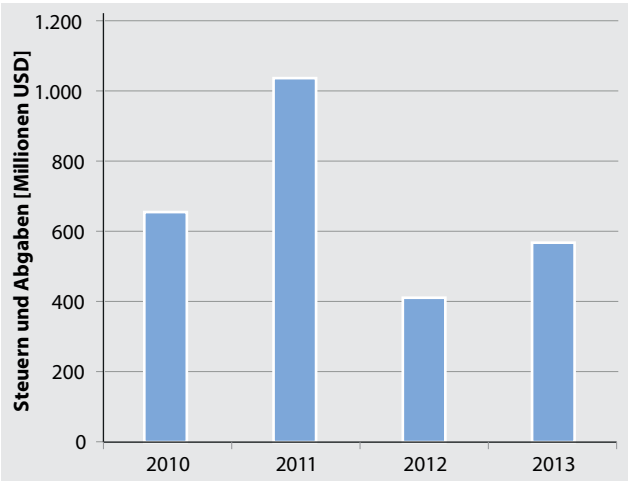
2.1 Meilensteine der Kalidüngemittelproduktions- und Unternehmensgeschichte

1975	Gründung der POTASH CORPORATION OF SASKATCHEWAN INC. durch eine sogenannte *Order in Council* von der kanadischen Regierung
1989	Privatisierung und Börsengang der POTASH CORPORATION OF SASKATCHEWAN INC. an den Wertpapierbörsen in Toronto
1990	Erwerb von SASKTERRA und deren 40 Prozent Anteile am Kaliwerk Allan
1993	Zukauf der Kalivermögenswerte von POTASH COMPANY OF AMERITWA mit den Kaliwerken und einer Hafenanlage in New Brunswick
1998 bis 2005	Erwerb von Anteilen an der ISRAEL CHEMICALS LTD. (ICL), von MINERA YOLANDA SCM, einem spezialisierten Kalidüngemittelproduzent in Chile, von 18 Prozent der SOCIEDAD QUIMICA Y MINERA DE CHILE S.A. (SQM), von 26 Prozent der Anteile an der ARAB POTASH COMPANY LTD. (APC) und von 9,99 Prozent der Anteile an der SINOFERT HOLDINGS LTD. (SINOFERT)
2007	Ankündigung der Beseitigung von Engpässen in der Kaliversorgung durch Ausbau und Wiederinbetriebnahme stillgelegter Kapazitäten unter anderem in den Kaliwerken Rocanville, Patience Lake, Cory in Saskatchewan und Penobsquis in New Brunswick
2010	Beendigung der ersten Bauphase des Ausbauprojektes am Kaliwerk Cory
2012	Fertigstellung der zweiten Bauphase des Expansionsprojektes am Kaliwerk Cory und Fertigstellung der Expansion am Kaliwerk Allan
2014	Fertigstellung des Kalibergwerkes Picadilly in New Brunswick und Inbetriebnahme sowie Start des Hochfahrens auf die nominale Produktionskapazität

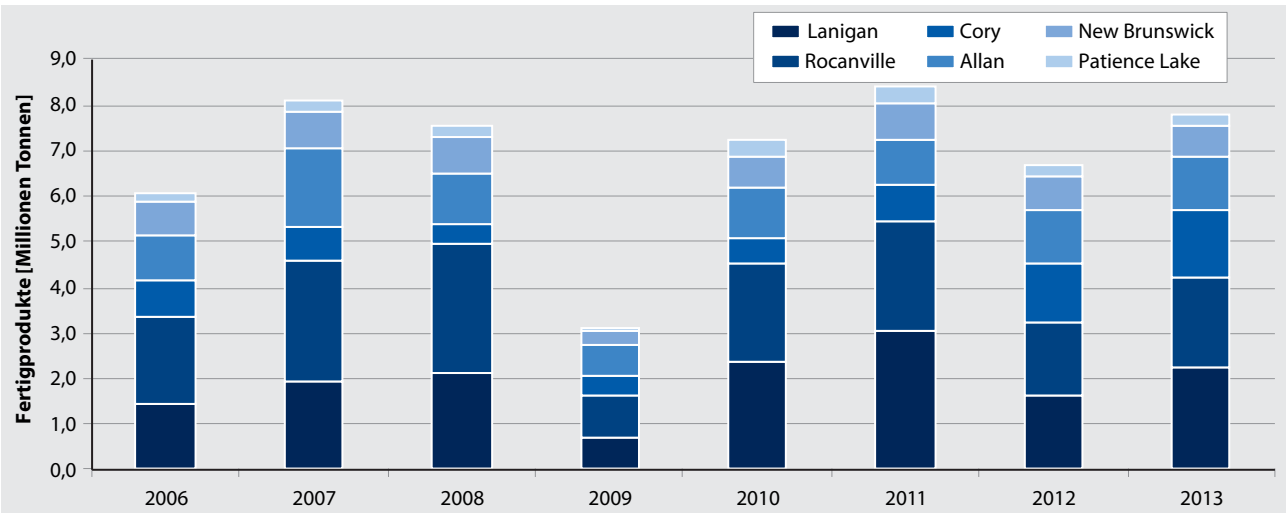
2.2 Betriebs- und volkswirtschaftliche Kennziffern für das Geschäftsfeld Kaliprodukte im Konzern Potash Corporation of Saskatchewan



Umsatzentwicklung und Anzahl der Beschäftigten in der Kalidüngemittelproduktion von PCS im Zeitraum von 2010 bis 2013



Entwicklung der Steuern und Abgaben auf Erträge aus der Kalidüngemittelproduktion von PCS im Zeitraum von 2010 bis 2013



Entwicklung der Kalidüngemittelproduktion in den Kaliwerken von PCS im Zeitraum von 2006 bis 2013[4]

4 Ohne Beteiligungen an der Kalilagerstätte Esterhazy unter MOSAIC.

2.3 Kaliwerk Lanigan, Saskatchewan, Kanada



Übersicht des Kaliwerkes Lanigan, Saskatchewan, PCS, mit den Produktionsanlagen über Tage, der Spülhalde für die festen Aufbereitungsrückstände und den Becken für die Klärung sowie Speicherung der Transportlösungen beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, im Satellitenbild





Gesamtansicht der Produktionsanlagen über Tage und Teilansicht der Spülhalde für die festen Aufbereitungsrückstände des Kaliwerkes Lanigan, PCS, im Luftbild

Teilansicht der Spülhalde für die festen Aufbereitungsrückstände und der Becken für die Klärung sowie Speicherung der flüssigen Aufbereitungsrückstände beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen des Kaliwerkes Lanigan, PCS, im Luftbild



Gesamtansicht der Produktionsanlagen über Tage, Produktspeicher und Verladeeinrichtungen des Kaliwerkes Lanigan, PCS, im Luftbild

Überblick Kaliwerk Lanigan

Geografische Lage	10 Kilometer westlich der Stadt Lanigan und etwa 100 Kilometer östlich von Saskatoon, im Zentralteil von Saskatchewan in Kanada
Produktionseinrichtungen	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze
Historie	1968 Beginn der Kalidüngemittelproduktion unter der damaligen Bezeichnung Alwinsal Mine von der ALWINSAL POTASH OF CANADA LTD. 1977 Übernahme durch PCS
Tatsächliche Produktion	2,24 Millionen Tonnen KCl pro Jahr (2013)
Installierte Produktionskapazität	2,20 Millionen Tonnen KCl pro Jahr (2014)
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Westkanadisches Becken *Patience Lake Member, Prairie Evaporite Formation, Elk Point Group*, Givet, Mittleres Devon
Kalirohstoff	Sylvinit
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	20 – 21 Prozent K_2O
Gewinnbare Vorräte	*Proven reserves* 94 Millionen Tonnen Sylvinit *Probable reserves* 446 Millionen Tonnen Sylvinit
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Schneidende Gewinnung im Langkammerpfeilerbau
Aufbereitungsverfahren	Hauptsächlich Flotation und für kleinere Rohsalzanteile beziehungsweise für Teilmengen von Flotationsrückständen auch Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation
Kaliprodukte	MOP *standard* und MOP *granular*, MOP-Suspension[5]
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände (2013) Aufhaldung von: • 3,346 Millionen Tonnen grobkörnigem Material • 0,077 Millionen Tonnen feinkörnigem Material Versenkung aufgelöster fester Aufbereitungsrückstände: • 0,697 Millionen Tonnen Salz als Lösung in den geologischen Untergrund (*Cambro-Ordovician Deadwood-Winnipeg Clastics*) Flüssige Rückstände Versenkung in den geologischen Untergrund
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage 70 Hektar Rückstandshalde 220 Hektar Rückstandsbecken 230 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Land- und Überseetransporte durch die Vermarktungsfirma CANPOTEX Transport auf dem Landweg mittels Eisenbahn mit CANADIAN PAZIFIC (CP) oder CANADIAN NATIONAL RAILWAYS (CN) zu den etwa 1.500 Kilometer entfernten Pazifikhäfen Vancouver, British Columbia, Kanada, oder Portland, Oregon, USA, sowie für kleinere Mengen auch über die Great Lakes zur Ostküste Kanadas oder zum Golf von Mexiko

5 MOP – Suspension SGN 30 wird in der Produktion von flüssigen Düngemitteln verwendet.

2.4 Kaliwerk Rocanville, Saskatchewan, Kanada



Übersicht des Kaliwerkes Rocanville, Saskatchewan, PCS, mit den Produktionsanlagen über Tage, der Spülhalde für die festen Aufbereitungsrückstände und den Becken für die Klärung sowie Speicherung der Transportlösungen beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, im Satellitenbild



Gesamtansicht der Produktionsanlagen über Tage und der Rückstandshalde des Kaliwerkes Rocanville, PCS



Teilansicht der Spülhalde für die festen Aufbereitungsrückstände des Kaliwerkes Rocanville, PCS

Tagesschacht, Aufbereitungsgebäude und Produktspeicher des Kaliwerkes Rocanville, PCS



Überblick Kaliwerk Rocanville

Geografische Lage	16 Kilometer nordöstlich der Stadt Rocanville und etwa 160 Kilometer nördlich der Grenze zu den USA, im südöstlichen Saskatchewan in Kanada
Produktionseinrichtungen	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze
Historie	1970 Beginn der Kalidüngemittelproduktion als Sylvite Mine durch SYLVITE OF CANADA LTD. 1977 Übernahme durch PCS
Tatsächliche Produktion	1,99 Millionen Tonnen KCl pro Jahr (2013)
Installierte Produktionskapazität	2,60 Millionen Tonnen KCl pro Jahr (2014)
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Westkanadisches Becken *Esterhazy Member, Prairie Evaporite Formation, Elk Point Group,* Givet, Mittleres Devon
Kalirohstoff	Sylvinit
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	21 – 22 Prozent K_2O
Gewinnbare Vorräte	*Proven reserves* 134 Millionen Tonnen Sylvinit *Probable reserves* 299 Millionen Tonnen Sylvinit
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Schneidende Gewinnung im Langkammerpfeilerbau
Aufbereitungsverfahren	Flotation
Kaliprodukte	MOP *standard* und MOP *granular*
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände (2013) Aufhaldung von: • 3,346 Millionen Tonnen grobkörnigem Material • 0,038 Millionen Tonnen feinkörnigem Material Versenkung aufgelöster fester Aufbereitungsrückstände: • 0,697 Millionen Tonnen Salz in Lösung in den geologischen Untergrund Flüssige Rückstände Versenkung in den geologischen Untergrund
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage 30 Hektar Rückstandshalde 210 Hektar Rückstandsbecken 90 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Land- und Überseetransporte durch die Vermarktungsfirma CANPOTEX Transport auf dem Landweg mittels Eisenbahn mit CANADIAN PAZIFIC (CP) oder CANADIAN NATIONAL RAILWAYS (CN) zu den etwa 1.500 Kilometer entfernten Pazifikhäfen Vancouver, British Columbia, Kanada, oder Portland, Oregon, USA, sowie für kleinere Mengen auch über die Great Lakes zur Ostküste Kanadas oder zum Golf von Mexiko

2.5 Kaliwerk Allan, Saskatchewan, Kanada



Übersicht des Kaliwerkes Allan, Saskatchewan, PCS, mit den Produktionsanlagen über Tage, der Spülhalde für die festen Aufbereitungsrückstände und den Becken für die Klärung sowie Speicherung der Transportlösungen beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, im Satellitenbild





Gesamtansicht der Produktionsanlagen über Tage sowie der Spülhalde für die festen Aufbereitungsrückstände und der Becken für die Klärung sowie Speicherung der Transportlösungen beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen des Kaliwerkes Allan, PCS, im Luftbild

Teilansicht der Becken für die Klärung sowie Speicherung der Transportlösungen beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen des Kaliwerkes Allan, PCS, im Luftbild

Überblick Kaliwerk Allan

Geografische Lage	5 Kilometer nördlich der Stadt Allan und etwa 45 Kilometer südöstlich von Saskatoon, im Zentrum von Saskatchewan in Kanada
Produktionseinrichtungen	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze
Historie	1968 Beginn der Kalidüngemittelproduktion des Kaliwerkes Allan unter ALLAN POTASH MINES 1975 Erwerb der Firma SASKTERRA und deren 40 Prozent Anteile am Kaliwerk Allan von HUSKY OIL LTD. durch PCS
Tatsächliche Produktion	1,18 Millionen Tonnen KCl pro Jahr (2013)
Installierte Produktionskapazität	2,50 Millionen Tonnen KCl pro Jahr (2014)
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Westkanadisches Becken *Patience Lake Member, Prairie Evaporite Formation, Elk Point Group*, Givet, Mittleres Devon
Kalirohstoff	Sylvinit
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	24 – 25 Prozent K_2O
Gewinnbare Vorräte	*Proven reserves* 77 Millionen Tonnen Sylvinit *Probable reserves* 207 Millionen Tonnen Sylvinit
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Schneidende Gewinnung im Langkammerpfeilerbau
Aufbereitungsverfahren	Hauptsächlich Flotation und für kleinere Rohsalzanteile beziehungsweise für Teilmengen von Flotationsrückständen auch Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation
Kaliprodukte	MOP *standard* und MOP *granular*, Industriekali
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände (2013) Aufhaldung von: • 1,209 Millionen Tonnen grobkörnigem Material • 0,205 Millionen Tonnen feinkörnigem Material Versenkung aufgelöster fester Aufbereitungsrückstände: • 0,955 Millionen Tonnen Salz als Lösung in den geologischen Untergrund (*Cambro-Ordovician Deadwood-Winnipeg Clastics*) Flüssige Rückstände Versenkung in den geologischen Untergrund
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage 60 Hektar Rückstandshalde 230 Hektar Rückstandsbecken 200 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Land- und Überseetransporte durch die Vermarktungsfirma CANPOTEX Transport auf dem Landweg mittels Eisenbahn mit CANADIAN PAZIFIC (CP) oder CANADIAN NATIONAL RAILWAYS (CN) zu den etwa 1.500 Kilometer entfernten Pazifikhäfen Vancouver, British Columbia, Kanada, oder Portland, Oregon, USA, sowie für kleinere Mengen auch über die Great Lakes zur Ostküste Kanadas oder zum Golf von Mexiko

2.6 Kaliwerk Cory, Saskatchewan, Kanada



Übersicht des Kaliwerkes Cory, Saskatchewan, PCS, mit den Produktionsanlagen über Tage, der Spülhalde für die festen Aufbereitungsrückstände und den Becken für die Klärung sowie Speicherung der Transportlösungen beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, im Satellitenbild



Gesamtansicht der Produktionsanlagen über Tage und Teilansicht der Spülhalde für die festen Aufbereitungsrückstände und der Becken für die Klärung sowie Speicherung der Transportlösungen beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen des Kaliwerkes Cory, PCS, im Luftbild



Tagesschächte, Aufbereitungsgebäude und Produktspeicher des Kaliwerkes Cory, PCS, im Luftbild



Teilansicht der Spülhalde für die festen Aufbereitungsrückstände und der Becken für die Klärung sowie Speicherung der Transportlösungen beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen des Kaliwerkes Cory, PCS, im Luftbild

Überblick Kaliwerk Cory

Geografische Lage	10 Kilometer südwestlich von Saskatoon, in Zentral-Saskatchewan in Kanada
Produktionseinrichtungen	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze
Historie	1968 Beginn der Kalidüngemittelproduktion unter dem Namen Duval Potash Mine durch DUVAL CORPORATION OF CANADA 1975 Übernahme durch PCS
Tatsächliche Produktion	1,49 Millionen Tonnen KCl pro Jahr (2013)
Installierte Produktionskapazität	1,70 Millionen Tonnen KCl pro Jahr (2014)
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Westkanadisches Becken *Patience Lake Member, Prairie Evaporite Formation, Elk Point Group*, Givet, Mittleres Devon
Kalirohstoff	Sylvinit
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	22 – 25 Prozent K_2O
Gewinnbare Vorräte	*Proven reserves* 63 Millionen Tonnen Sylvinit *Probable reserves* 178 Millionen Tonnen Sylvinit
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Schneidende Gewinnung im Langkammerpfeilerbau
Aufbereitungsverfahren	Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation, Flotation
Kaliprodukte	MOP *standard* und MOP *granular*, Industriekali
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände (2013) Aufhaldung von: • 2,673 Millionen Tonnen grobkörnigem Material • 0,212 Millionen Tonnen feinkörnigem Material Versenkung aufgelöster fester Aufbereitungsrückstände: • 1,038 Millionen Tonnen Salz als Lösung in den geologischen Untergrund (*Cambro-Ordovician Deadwood-Winnipeg Clastics*) Flüssige Rückstände Versenkung in den geologischen Untergrund
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage 78 Hektar Rückstandshalde 250 Hektar Rückstandsbecken 110 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Land- und Überseetransporte durch die Vermarktungsfirma CANPOTEX Transport auf dem Landweg mittels Eisenbahn mit CANADIAN PAZIFIC (CP) oder CANADIAN NATIONAL RAILWAYS (CN) zu den etwa 1.500 Kilometer entfernten Pazifikhäfen Vancouver, British Columbia, Kanada, oder Portland, Oregon, USA, sowie für kleinere Mengen auch über die Great Lakes zur Ostküste Kanadas oder zum Golf von Mexiko

2.7 Kaliwerk Penobsquis und Kalibergwerk Picadilly, New Brunswick, Kanada



Übersicht des Kaliwerkes Penobsquis und des Kalibergwerkes Picadilly[6], New Brunswick, PCS, mit den Produktionsanlagen über Tage, im Satellitenbild

6 Die *New Brunswick Divison* von PCS schließt streng genommen zwei Bergwerke, einmal das seit 1986 betriebene und durch Salzlösungszutritte hydrogeologisch gefährdete Bergwerk Penobsquis, dessen Stilllegung für die nächsten Jahre beabsichtigt ist, sowie das neu aufgefahrene und 2014 als Ersatz für Penobsquis in Betrieb genommene Bergwerk Picadilly ein.



Tagesschächte, Aufbereitungsgebäude und Produktspeicher des Kaliwerkes Penobsquis, PCS

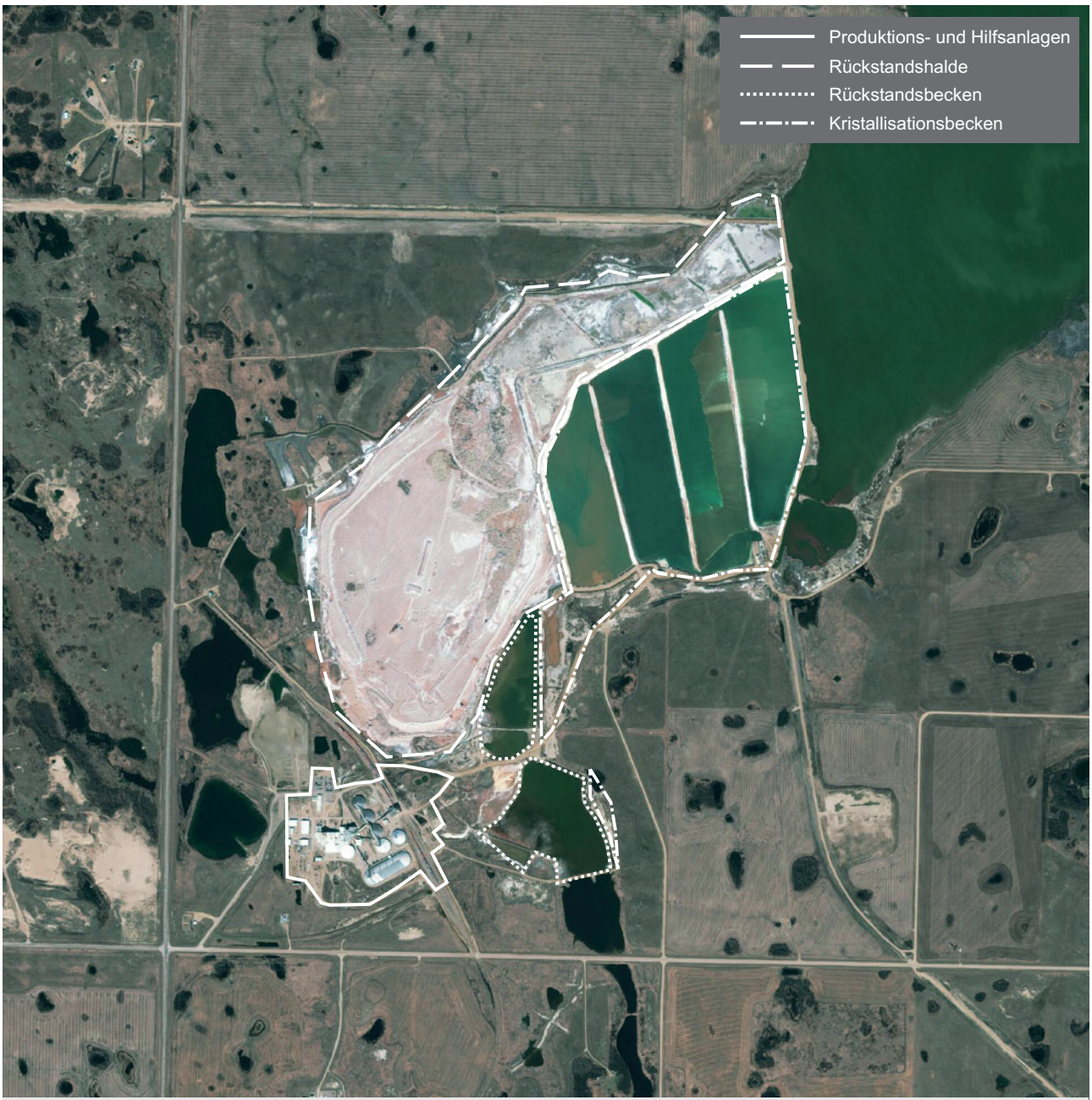


Tagesschächte und Aufbereitungsgebäude des Kaliwerkes Penobsquis, PCS

Kaliwerk Penobsquis und Kalibergwerk Picadilly

Geografische Lage	7 Kilometer nordöstlich von Sussex, New Brunswick, Kanada und etwa 85 Kilometer vom Hafen in Saint John entfernt
Produktionseinrichtungen	Bergwerke Penobsquis und Picadilly Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze
Historie	1983 Beginn der Kalidüngemittelproduktion 1986 Inbetriebnahme durch die POTASH COMPANY OF AMERICA (PCA) 1993 Übernahme durch PCS 2014 Fertigstellung des Kalibergwerkes Picadilly in New Brunswick und Inbetriebnahme sowie Start des Hochfahrens auf die nominale Produktionskapazität
Tatsächliche Produktion	0,62 Millionen Tonnen KCl pro Jahr (2013)
Installierte Produktionskapazität	0,80 Millionen Tonnen MOP pro Jahr (2014)
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Moncton Sub-Becken des Atlantic Maritime Beckens Kalilager A, B, C und D, *Cassidy Lake Formation, Windsor Group,* Unteres Karbon
Kalirohstoff	Sylvinit
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	22 – 25 Prozent K_2O
Gewinnbare Vorräte	*Proven reserves* 188 Millionen Tonnen Sylvinit
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Gewinnung im Firstenstoßbau mit Versatz
Aufbereitungsverfahren	Hauptsächlich Flotation und für kleinere Rohsalzanteile beziehungsweise für Teilmengen von Flotationsrückständen auch Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation
Kaliprodukte	MOP *standard* und MOP *granular*
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände (2013) Trocken- und Spülversatz aller festen Aufbereitungsrückstände: • 1,355 Millionen Tonnen Flüssige Rückstände Einleitung in die Bay of Fundy respektive in den Nordatlantik
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage Kaliwerk Penobsquis 36 Hektar Kalbergwerk Picadilly 24 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Transport von etwa 95 Prozent der Kalidüngemittel über die Eisenbahn CANADIAN NATIONAL (CN) zum mehr als 80 Kilometer entfernten Exporthafen Saint John und Verschiffung über die Bay of Fundy zum Atlantik Transport der übrigen Produkte mittels LKW oder Eisenbahn zu den lokalen Abnehmern

2.8 Kaliwerk Patience Lake, Saskatchewan, Kanada



Übersicht des Kaliwerkes Patience Lake, Saskatchewan, PCS, mit den Produktionsanlagen über Tage, unter anderem die Aufbereitungs- und Speichergebäude und die Becken zur natürlichen Kühlkristallisation der technischen Lösungen aus der Soltechnischen Gewinnung sowie der Becken für die Klärung sowie Speicherung der Transportlösungen beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, im Satellitenbild



Teilansicht der Produktionsanlagen über Tage mit Verladeeinrichtungen des Kaliwerkes Patience Lake, PCS, im Luftbild



Gesamtansicht des Kaliwerkes Patience Lake, PCS, mit den Becken zur natürlichen Kühlkristallisation (Mittel- und Hintergrund rechts) sowie den Becken für die Klärung sowie Speicherung der Transportlösungen beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, im Luftbild

Überblick Kaliwerk Patience Lake

Geografische Lage	15 Kilometer östlich von Saskatoon, in Zentral-Saskatchewan in Kanada
Produktionseinrichtungen	Solanlage[7] zur Gewinnung technischer Lösungen und Aufbereitungsanlage für technische Lösungen
Historie	1958 Beginn der Kalidüngemittelproduktion durch bergmännischen Abbau im Kaliwerk Patience Lake durch die POTASH COMPANY OF AMERICA (PCA) 1985 – 1987 Schließung und Flutung des Kalibergwerkes aufgrund von Lösungszuflüssen 1989 Fortsetzung des Abbaus mittels soltechnischer Gewinnung durch PCA 1993 Übernahme durch PCS
Tatsächliche Produktion	0,27 Millionen Tonnen KCl (2013)
Installierte Produktionskapazität	0,3 Millionen Tonnen KCl pro Jahr (2014)
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Westkanadisches Becken *Patience Lake Member, Prairie Evaporite Formation, Elk Point Group,* Givet, Mittleres Devon
Kalirohstoff	Sylvinit
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	21 Prozent K_2O
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Soltechnische Gewinnung aus einem ersoffenen Kalibergwerk
Aufbereitungsverfahren	Natürliche Kühlkristallisation während der Wintermonate
Kaliprodukte	MOP *granular*
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände (2013) Aufhaldung von: • 0,039 Millionen Tonnen grobkörnigem Material Versenkung aufgelöster fester Aufbereitungsrückstände: • 0,351 Millionen Tonnen Salz in Lösung in den geologischen Untergrund (*Silurian Interlake Carbonates*) Flüssige Rückstände Versenkung in den geologischen Untergrund Rückführung in die abgesoffenen Grubenhohlräume
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage 18 Hektar Becken für die natürliche Kühlkristallisation 60 Hektar Rückstandshalde 90 Hektar Rückstandsbecken 17 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Land- und Überseetransporte durch die Vermarktungsfirma CANPOTEX Transport auf dem Landweg mittels Eisenbahn mit CANADIAN PAZIFIC (CP) oder CANADIAN NATIONAL RAILWAYS (CN) zu den etwa 1.500 Kilometer entfernten Pazifikhäfen Vancouver, British Columbia, Kanada, oder Portland, Oregon, USA, sowie für kleinere Mengen auch über die Great Lakes zur Ostküste Kanadas oder zum Golf von Mexiko

7 Am Standort Patience Lake, werden keine planmäßig zur Soltechnischen Gewinnung eingerichteten Solfelder, sondern das abgesoffene/geflutete Bergwerk zur Gewinnung von Produktionslösungen für die Kalidüngemittelproduktion genutzt.

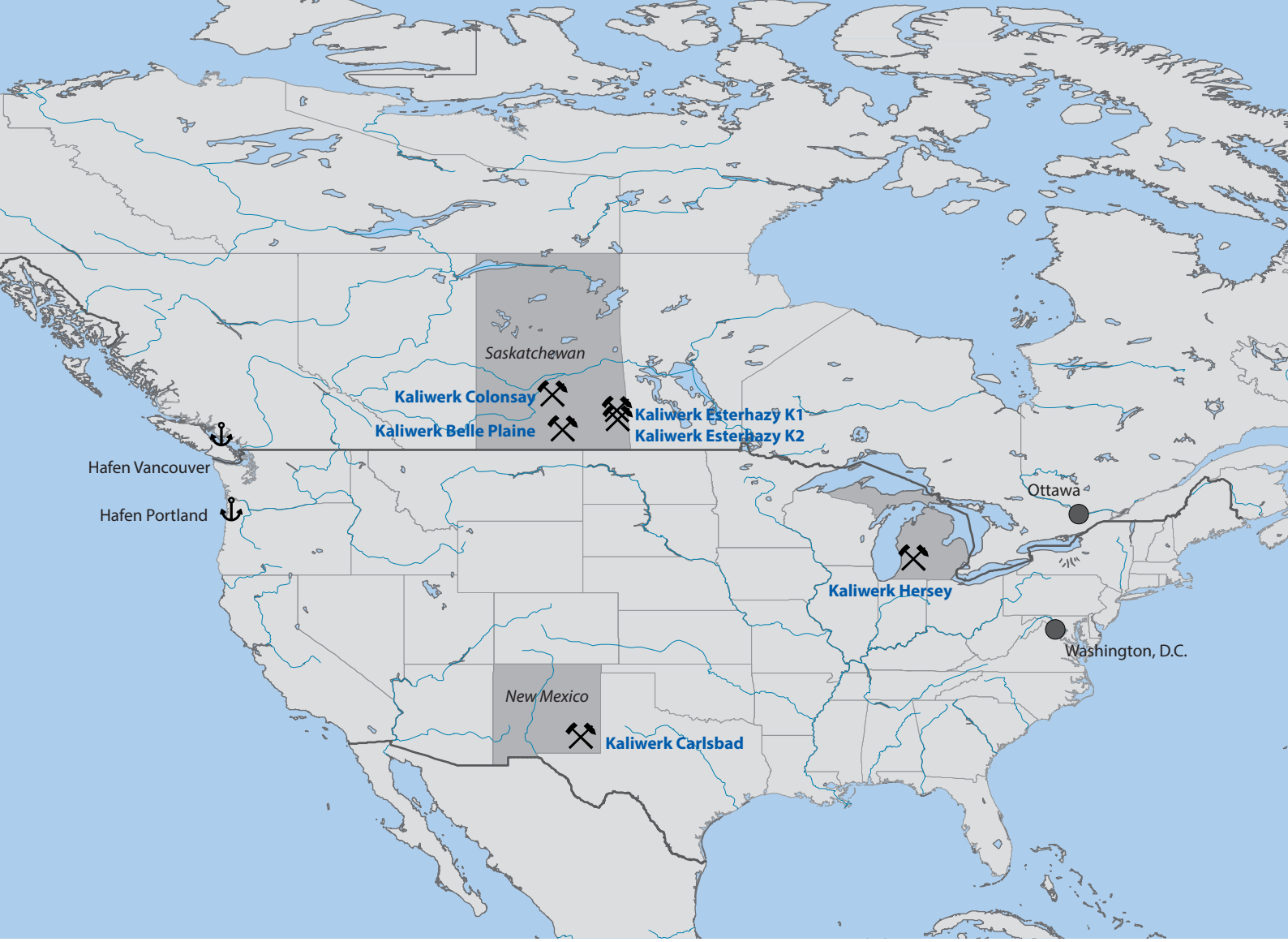
2.9 Kaliwerk Esterhazy, Saskatchewan, Kanada

PCS besitzt Abbaurechte an der Esterhazy-Lagerstätte[8]. Obgleich Teile der Berechtsame PCS gehören, wird dieser Standort nicht von PCS, sondern von MOSAIC betrieben und daher auch unter diesem Produzenten behandelt.

Auf der Grundlage eines Abkommens zu gesellschaftsrechtlichen Vorgängen zwischen PCS und MOSAIC wurden diese Vorräte von MOSAIC abgebaut, aufbereitet und gegenüber PCS durch Produktlieferungen vergütet. 2011 betrug dieser Anteil der Fertigprodukte für PCS 0,943 Millionen Tonnen MOP.

Gemäß einer neuen Vereinbarung (PCS 2011b, /737/) im Dezember 2011 wurden die Ansprüche von PCS aus dem oben genannten Abkommen mit den Produktlieferungen für das Jahr 2012 voll umfänglich abgegolten.

8 PCS hat im Jahr 1978 mit einem *Mineral Rights Transfer Agreement* und *Ore Purchase Agreement* von AMAX EXPLORATION INC. die Gewinnungsrechte an Kalisalzen der Esterhazy Lagerstätte mit einer Fläche von etwa 15.000 *acres* (1 *acre* entspricht etwa 4.047 m²) erworben. Mit diesem Erwerb ist PCS als Rechtsnachfolger von AMAX in die seit 1971 bestehenden "Contract and Sub-lease Agreement" sowie "Mining and Processing Agreement" zwischen IMC als damaligem Betreiber des Esterhazy Bergwerks und AMAX als Inhaber oben genannter Gewinnungsrechte eingetreten.



3 MOSAIC, KANADA UND USA

THE MOSAIC COMPANY (MOSAIC) produziert neben Kalidüngemitteln – in Saskatchewan in Kanada sowie in New Mexico und in Michigan, USA – vor allem Phosphatdüngemittel als Weltmarktführer in Florida in den USA. MOSAIC ist ein börsennotiertes Unternehmen, das an dem Finanzhandelsplatz in New York (NYSE:MOS) gehandelt wird.

Das Kalidüngemittelgeschäft nimmt einen Anteil von etwa 30 Prozent am Gesamtumsatz ein. Im Jahre 2013 produzierte MOSAIC 8,3 Millionen Tonnen MOP und war damit der zweitgrößte Kalidüngemittelproduzent der Welt. Nach der heute installierten Produktionskapazität rangiert MOSAIC auf Platz 3 der weltgrößten Kalidüngemittelproduzenten.

Mehr als 45 Prozent der Kalidüngemittelproduktion von MOSAIC wird in Nordamerika vermarktet, der Rest exportiert.

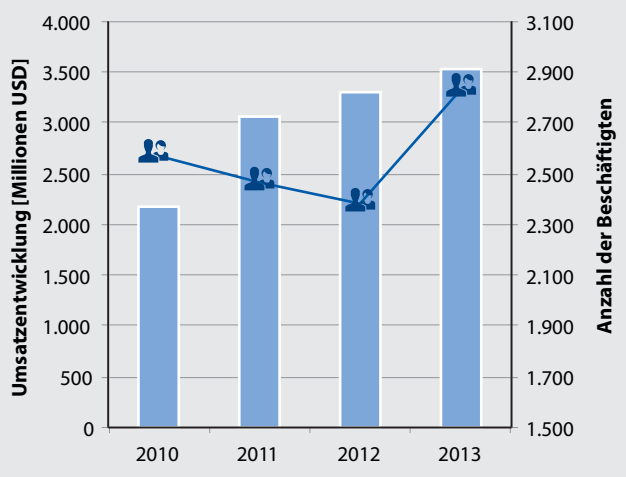
MOSAIC betreibt 3 Kalibergwerke in Saskatchewan, Kanada und 1 ein Bergwerk in New Mexico, USA, wo in Teufen zwischen 240 und 1.000 Meter in Bergmännischer, Schneidender Gewinnung vornehmlich Sylvinit und in New Mexico untergeordnet auch Langbeinitit abgebaut werden. MOSAIC betreibt in Saskatchewan, Kanada, auch die größte soltechnische Gewinnungsanlage für Sylvinit, deren Kavernen in einer Teufenlage von etwa 1.600 Meter angeordnet sind. Die sylvinitischen Rohsalze werden hauptsächlich durch Flotation, ein kleinerer Anteil mittels Heißverlösung und Kristallisation zu Kalidüngemitteln aufbereitet. Die technischen Lösungen aus der Soltechnischen Gewinnung werden durch thermische Eindampfungsprozesse und ein kleiner Teil durch natürliche Kühlkristallisation zu Kalidüngemitteln aufbereitet.

MOSAIC beabsichtigt bis 2019 eine Produktionskapazität von insgesamt 12,7 Millionen Tonnen pro Jahr zu erreichen und erweitert dazu die Kaliwerke Belle Plaine und Colonsay und errichtet das neue Kaliwerk Esterhazy K3.

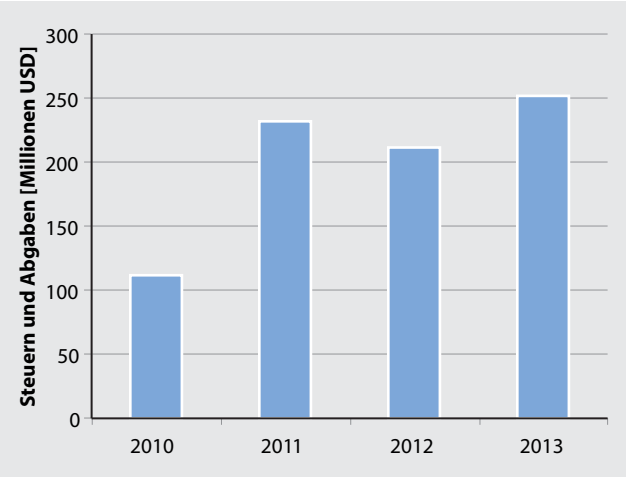
3.1 Meilensteine der Kalidüngemittelproduktions- und Unternehmensgeschichte

1909	Gründung von INTERNATIONAL MINERALS AND CHEMICAL CORPORATION (IMC GLOBAL)
1940	Beginn der Kalidüngemittelproduktion in Carlsbad durch IMC
1961	Gründung von KALIUM CHEMICALS LTD. (KALIUM)
1963	Beginn der Kalidüngemittelproduktion in Esterhazy K1 durch IMC
1964	Beginn der Kalidüngemittelproduktion in Belle Plaine durch KALIUM
1967	Beginn der Kalidüngemittelproduktion in Esterhazy K2 durch IMC
1969	Beginn der Kalidüngemittelproduktion in Colonsay durch CENTRAL CANADA POTASH (CCP)
1994	VIGORO CORP. kauft CCP mit dem Kaliwerk Colonsay
1996	Zusammenschluss von IMC und VIGORO
1999	Umbenennung von IMC KALIUM in IMC POTASH
Januar 2004	Einigung der Düngemittelproduzenten CARGILL INC. (CARGILL) und IMC auf die Gründung eines neuen Düngemittelunternehmens
Juni 2004	Bekanntgabe des Namens MOSAIC für das neugeschaffene Unternehmen
Oktober 2004	Börsengang an die New Yorker Börse der MOSAIC COMPANY
2011	MOSAIC und CARGILL einigen sich auf eine Trennung und die ordnungsgemäße Aufteilung der CARGILL Anteile an MOSAIC

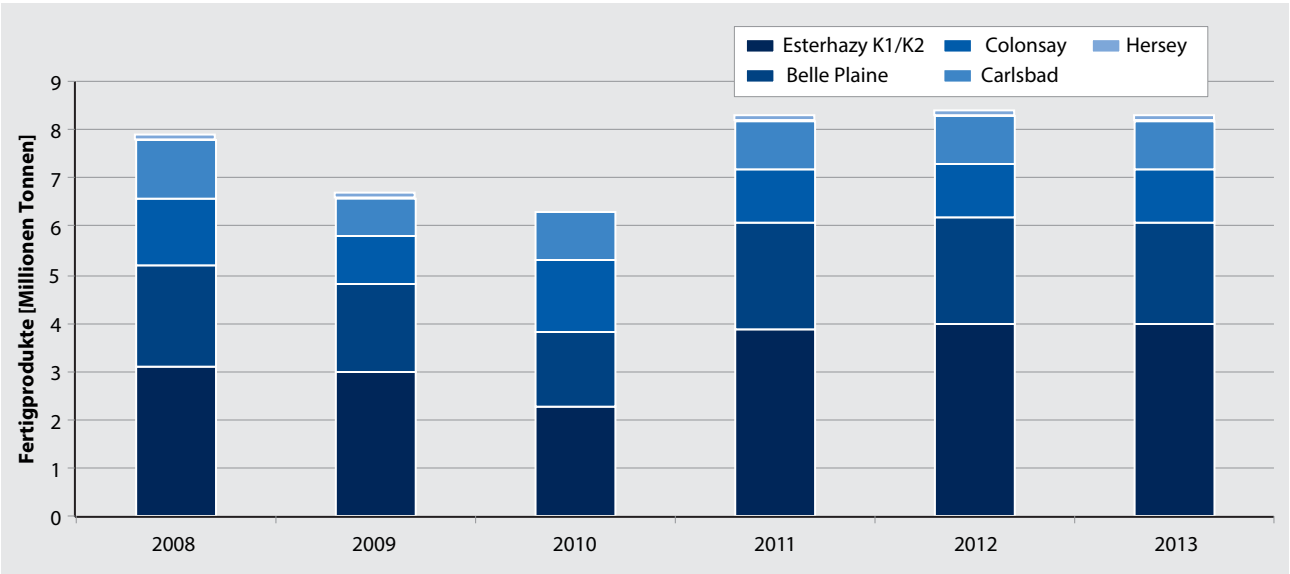
3.2 Betriebs- und volkswirtschaftliche Kennziffern für das Geschäftsfeld Kalidüngemittelprodukte im Konzern MOSAIC



Umsatzentwicklung und Anzahl der Beschäftigten in der Kalidüngemittelproduktion von MOSAIC im Zeitraum von 2010 bis 2013



Entwicklung der Steuern und Abgaben auf Erträge aus der Kalidüngemittelproduktion von MOSAIC im Zeitraum von 2010 bis 2013



Entwicklung der Kalidüngemittelproduktion in den Kaliwerken von MOSAIC im Zeitraum von 2008 bis 2013

3.3 Kaliwerke Esterhazy K1 und K2, Saskatchewan, Kanada



Übersicht des Kaliwerkes Esterhazy K1, Saskatchewan, Kanada, MOSAIC, mit den Produktionsanlagen über Tage, der Spülhalde für die festen Aufbereitungsrückstände und den Becken für die Klärung sowie Speicherung der Transportlösungen beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, im Satellitenbild



© 2013 TerraServer, Digital Globe, Bildaufnahmedatum: 1.10.2010

Übersicht des Kaliwerkes Esterhazy K2, Saskatchewan, Kanada, MOSAIC, mit den Produktionsanlagen über Tage, der Spülhalde für die festen Aufbereitungsrückstände und den Becken für die Klärung sowie Speicherung der Transportlösungen beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, im Satellitenbild



Gesamtansicht der Produktionsanlagen über Tage des Kaliwerkes Esterhazy K1, MOSAIC



Teilansicht der Aufbereitungsgebäude und Produktspeicher des Kaliwerkes Esterhazy K2, MOSAIC



Produktionsschacht (rechts) und Serviceschacht (links) des im Bau befindlichen Kaliwerkes Esterhazy K3, MOSAIC

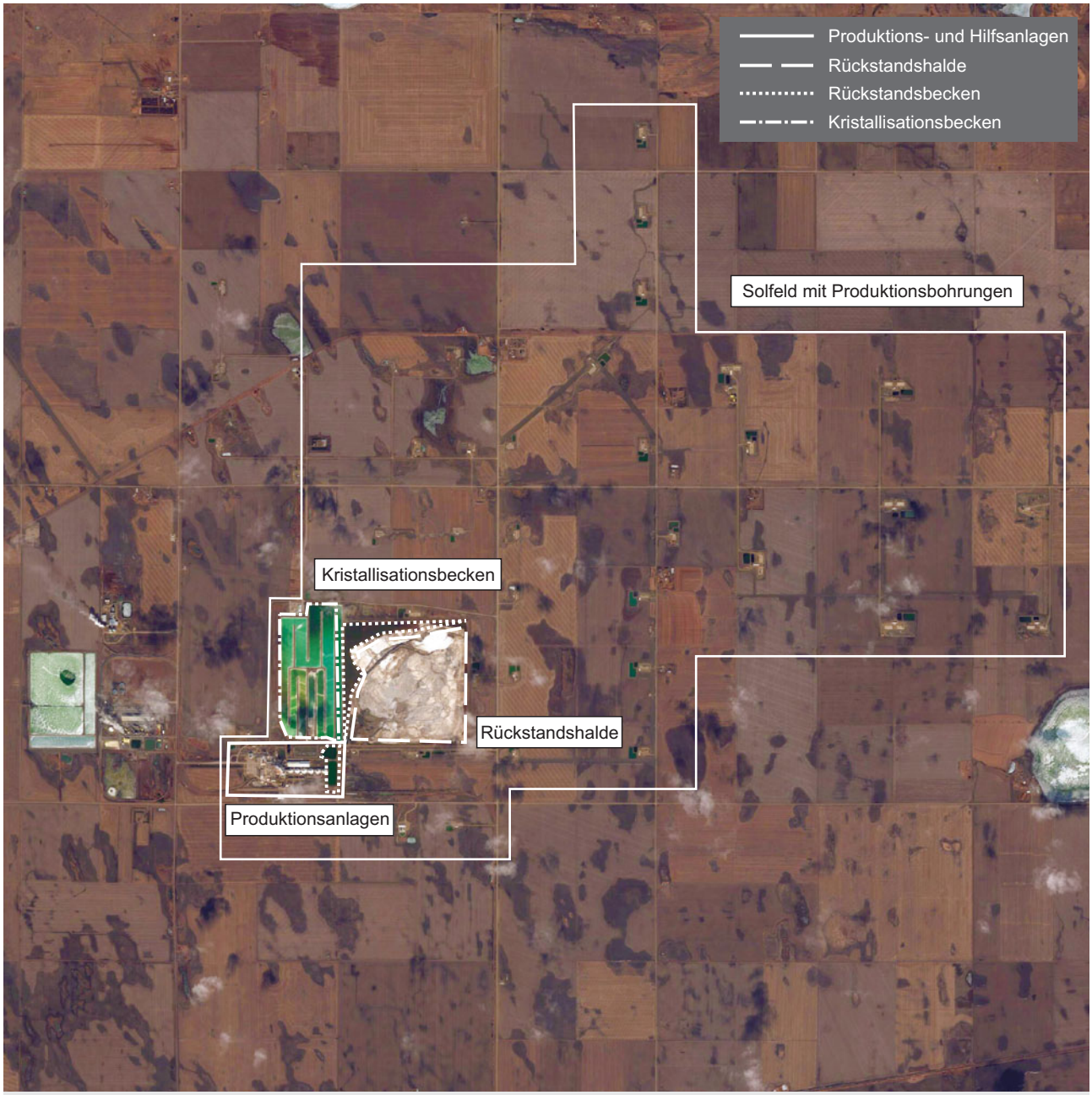
Überblick Kaliwerke Esterhazy K1 und K2

Da zu den einzelnen Standorten Esterhazy K1 und K2 keine detaillierten Produktionsinformationen vorliegen, werden sie hier zusammen abgehandelt!

Geografische Lage	190 Kilometer östlich von Regina, im südöstlichen Saskatchewan in Kanada
Produktionseinrichtungen	Jeweils ein Bergwerk und jeweils eine Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze Gemeinsamer Wetterverbund
Historie	1962 Beginn der Kalidüngemittelproduktion im Kaliwerk Esterhazy K1 unter INTERNATIONAL MINERALS AND CHEMICAL CORPORATION (IMC GLOBAL) 1967 Beginn der Kalidüngemittelproduktion im Kaliwerk Esterhazy K2 unter INTERNATIONAL MINERALS AND CHEMICAL CORPORATION (IMC GLOBAL) 2004 Übernahme durch MOSAIC
Tatsächliche Produktion	4,0 Millionen Tonnen MOP (2013)
Installierte Produktionskapazität	5,3 Millionen Tonnen MOP pro Jahr (2012)
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Westkanadisches Becken *Esterhazy Member, Prairie Evaporite Formation, Elk Point Group,* Givet, Mittleres Devon
Kalirohstoff	Sylvinit
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	23 Prozent K_2O
Gewinnbare Vorräte	*Recoverable reserves*[9] 860 Millionen Tonnen
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Schneidende Gewinnung im Langkammerpfeilerbau
Aufbereitungsverfahren	Esterhazy K1: Flotation; Esterhazy K2: Schweretrennung, Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation
Kaliprodukte	MOP *standard* und MOP *granular*
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände: Aufhaldung von mehr als 4 Millionen Tonnen pro Jahr Versenkung aufgelöster Aufbereitungsrückstände in den geologischen Untergrund (*Silurian Interlake Carbonates*), Kapazität der Versenkung 12 Millionen Kubikmeter pro Jahr mit 8 Versenkbohrungen Flüssige Rückstände: Versenkung in den geologischen Untergrund
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage: K1: 77 Hektar; K2: 85 Hektar Rückstandshalden: K1: 220 Hektar; K2: 160 Hektar Rückstandsbecken: K1: 225 Hektar; K2: 220 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Ein Großteil der Produkte wird auf dem Landweg mittels Eisenbahn zu den lokalen Abnehmern in den USA transportiert; Land- und Überseetransporte durch die Vermarktungsfirma CANPOTEX; Transport auf dem Landweg mittels Eisenbahn mit CANADIAN PAZIFIC (CP) oder CANADIAN NATIONAL RAILWAYS (CN) zu den etwa 1.500 Kilometer entfernten Pazifikhäfen Vancouver, British Columbia, Kanada, oder Portland, Oregon, USA

9 Als *recoverable reserves* werden im Jahresgeschäftsbericht von MOSAIC *probable* und *proven reserves* zusammengefasst.

3.4 Kaliwerk Belle Plaine, Saskatchewan, Kanada



Übersicht des Kaliwerkes Belle Plaine, Saskatchewan, Kanada, MOSAIC, mit den Produktionsanlagen über Tage, unter anderem den Aufbereitungs- und Speichergebäuden und den Becken zur natürlichen Kühlkristallisation der technischen Lösungen aus der Soltechnischen Gewinnung sowie den Becken für die Klärung sowie Speicherung der Transportlösungen beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, im Satellitenbild



Gesamtansicht des Kaliwerkes Belle Plaine, MOSAIC, mit den Produktionsanlagen über Tage (Hintergrund), der Spülhalde für die festen Aufbereitungsrückstände (linker Bildrand) und den Becken für die Klärung sowie Speicherung der Transportlösungen beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen (im Vorfeld der Spülhalde) sowie den Becken zur natürlichen Kühlkristallisation (Vorder- und Mittelgrund), im Luftbild



Aufbereitungsgebäude und Produktspeicher des Kaliwerkes Belle Plaine, MOSAIC

Überblick Kaliwerk Belle Plaine

Geografische Lage	40 Kilometer westlich von Regina im südlichen Teil von Saskatchewan in Kanada
Produktionseinrichtungen	Solfeld zur Gewinnung technischer Lösungen und Aufbereitungsanlage technischer Lösungen
Historie	1964 Beginn der Kalidüngemittelproduktion im Kaliwerk Belle Plaine unter KALIUM CHEMICALS LTD. 1996 Übernahme durch IMC KALIUM
Tatsächliche Produktion	2,1 Millionen Tonnen MOP (2013)
Installierte Produktionskapazität	2,4 Millionen Tonnen MOP pro Jahr (2013)
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Westkanadisches Becken *Esterhazy Member, Belle Plaine Member und Patience Lake Member, Prairie Evaporite Formation, Elk Point Group,* Givet, Mittleres Devon
Kalirohstoff	Sylvinit
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	18 Prozent K_2O
Gewinnbare Vorräte	*Recoverable reserves* 797 Millionen Tonnen
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Soltechnische Gewinnung fester Kalirohsalze
Aufbereitungsverfahren	Technische Eindampf-/Kühlkristallisation und für einen Teilstrom natürliche Kühlkristallisation
Kaliprodukte	MOP *standard* und MOP *granular*, Industriekali
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände: Aufhaldung Versenkung aufgelöster fester Aufbereitungsrückstände in den geologischen Untergrund (*Deadwood* und *Winnipeg-Clastics*, 500 Meter unter den Prairie-Schichten) Rückführung als Versatz in ausgesalzene Kavernen Flüssige Rückstände: Rückführung in die Kavernen Versenkung in den geologischen Untergrund
Flächeninanspruchnahme	Solfeld 3500 Hektar Produktions- und Hilfsanlagen über Tage 46 Hektar Becken für die natürliche Kühlkristallisation 85 Hektar Rückstandshalde 130 Hektar Rückstandsbecken 20 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Ein Großteil der Produkte wird auf dem Landweg mittels Eisenbahn zu den lokalen Abnehmern in den USA transportiert; Land- und Überseetransporte durch die Vermarktungsfirma CANPOTEX; Transport auf dem Landweg mittels Eisenbahn mit CANADIAN PAZIFIC (CP) oder CANADIAN NATIONAL RAILWAYS (CN) zu den etwa 1.500 Kilometer entfernten Pazifikhäfen Vancouver, British Columbia, Kanada, oder Portland, Oregon, USA

3.5 Kaliwerk Colonsay, Saskatchewan, Kanada



Übersicht des Kaliwerkes Colonsay, Saskatchewan, MOSAIC, mit den Produktionsanlagen über Tage, der Spülhalde für die festen Aufbereitungsrückstände und den Becken für die Klärung sowie Speicherung der Transportlösungen beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, im Satellitenbild



Gesamtansicht der Produktionsanlagen über Tage und Teilansicht der Spülhalde für die festen Aufbereitungsrückstände und der Becken für die Klärung sowie Speicherung der Transportlösungen beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen des Kaliwerkes Colonsay, MOSAIC, im Luftbild



Teilansicht des Kaliwerkes Colonsay, MOSAIC, mit den Produktionsanlagen über Tage, der Spülhalde für die festen Aufbereitungsrückstände und den Becken für die Klärung sowie Speicherung der Transportlösungen beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, im Luftbild

Überblick Kaliwerk Colonsay

Geografische Lage	70 Kilometer östlich von Saskatoon, im zentralen Teil von Saskatchewan in Kanada
Produktionseinrichtungen	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze
Aufbereitungsanlage technischer Lösungen	1969 Beginn der Kalidüngemittelproduktion im Kaliwerk Colonsay unter CENTRAL CANADA POTASH (CCP) 1995 Übernahme durch VIGORO und spätere Fusion mit INTERNATIONAL MINERALS AND CHEMICAL CORPORATION (IMC) 2004 Übernahme durch MOSAIC
Tatsächliche Produktion	1,1 Millionen Tonnen MOP (2013)
Installierte Produktionskapazität	1,8 Millionen Tonnen MOP pro Jahr (2013)
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Westkanadisches Becken *Patience Lake Member, Prairie Evaporite Formation, Elk Point Group,* Givet, Mittleres Devon
Kalirohstoff	Sylvinit
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	25 – 27 Prozent K_2O
Gewinnbare Vorräte	*Recoverable reserves* 224 Millionen Tonnen
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Schneidende Gewinnung im Langkammerpfeilerbau
Aufbereitungsverfahren	Hauptsächlich Flotation und für kleinere Rohsalzanteile beziehungsweise für Teilmengen von Flotationsrückständen auch Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation
Kaliprodukte	MOP *standard* und MOP *granular*
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände: Aufhaldung Versenkung aufgelöster fester Aufbereitungsrückstände in den geologischen Untergrund Flüssige Rückstände: Versenkung in den geologischen Untergrund
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage 60 Hektar Rückstandshalde 520 Hektar (inkl. Haldenerweiterungsfläche) Rückstandsbecken 35 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Ein Großteil der Produkte wird auf dem Landweg mittels Eisenbahn zu den lokalen Abnehmern in den USA transportiert; Land- und Überseetransporte durch die Vermarktungsfirma CANPOTEX; Transport auf dem Landweg mittels Eisenbahn mit CANADIAN PAZIFIC (CP) oder CANADIAN NATIONAL RAILWAYS (CN) zu den etwa 1.500 Kilometer entfernten Pazifikhäfen Vancouver, British Columbia, Kanada, oder Portland, Oregon, USA

3.6 Kaliwerk Carlsbad, New Mexico, USA



Übersicht des Kaliwerkes Carlsbad, New Mexico, USA, MOSAIC, mit den Produktionsanlagen über Tage, der Spülhalde für die festen Aufbereitungsrückstände und den Becken für die Klärung sowie Speicherung der Transportlösungen beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, im Satellitenbild

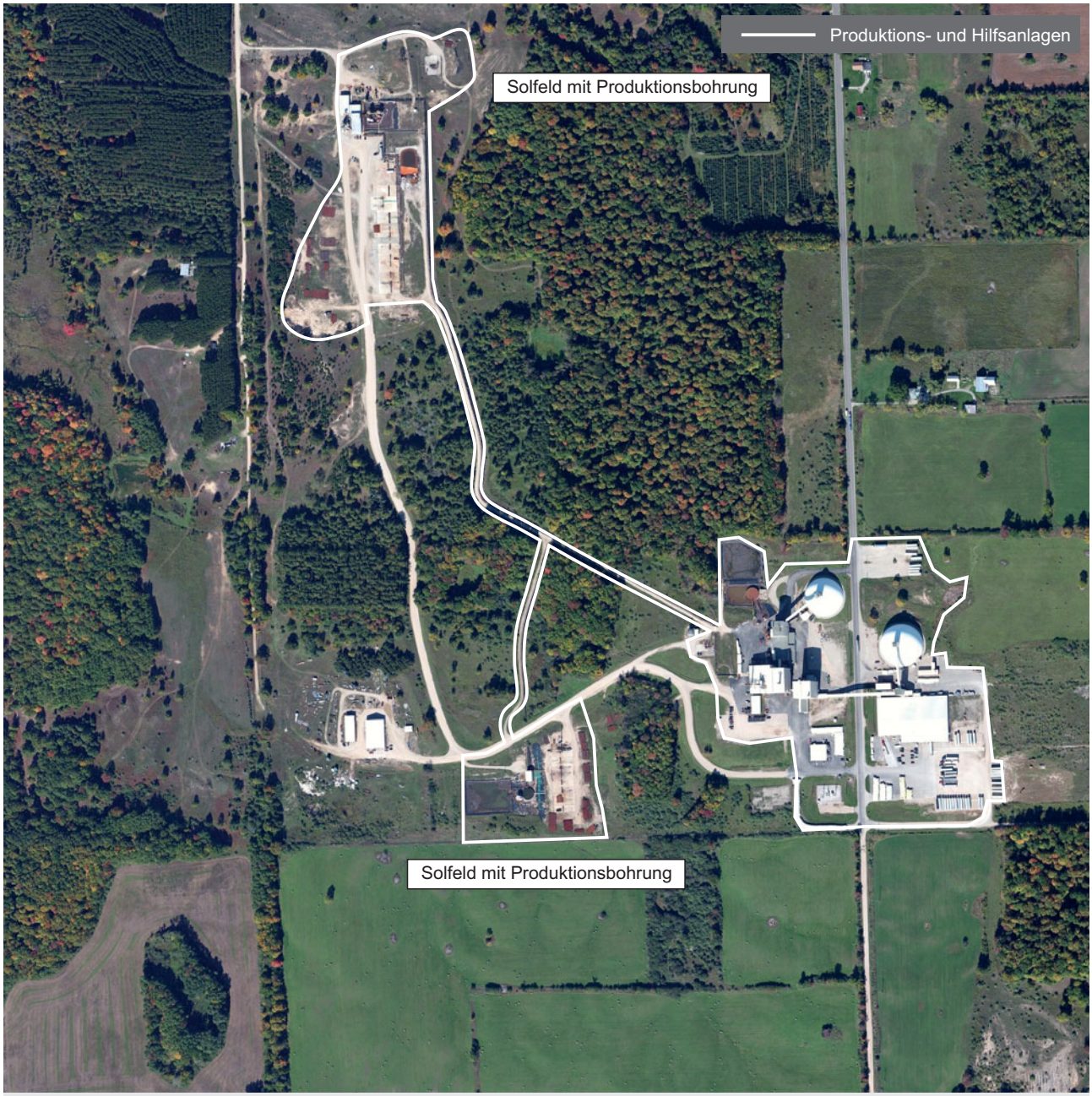
Überblick Kaliwerk Carlsbad

Geografische Lage	30 Kilometer östlich von Carlsbad, im südöstlichen New Mexico in den USA, etwa 240 Kilometer von der mexikanischen Grenze entfernt
Produktionseinrichtungen	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze
Historie	1940 Beginn der Kalidüngemittelproduktion im Kaliwerk Carlsbad unter IMC GLOBAL 2004 Übernahme durch MOSAIC
Tatsächliche Produktion	MOP: 2013 0,3 Millionen Tonnen[11] K-MAG®[10]: 0,7 Millionen Tonnen
Installierte Produktionskapazität	0,25 Millionen Tonnen MOP 1,0 Millionen Tonnen K-MAG (2014)
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Delaware Becken *McNutt Member, Salado Formation, Ochoan,* Oberes Perm
Kalirohstoff	Sylvinit, Langbeinitit
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	Sylvinit mit 10 – 18 Prozent K_2O, Langbeinitit mit 13 – 14 Prozent K_2O
Gewinnbare Vorräte	*Recoverable reserves* 249 Millionen Tonnen
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Schneidende Gewinnung im Langkammerpfeilerbau
Aufbereitungsverfahren	Flotation
Kaliprodukte	SOP (K-MAG®), MOP *standard*, *granular*
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände: Aufhaldung Flüssige Rückstände: Einleitung in Sammelbecken
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage: 70 Hektar Rückstandshalde: 760 Hektar Rückstandsbecken: 100 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Ein Großteil der Produkte wird auf dem Landweg mittels Eisenbahn zu den lokalen Abnehmern in den USA transportiert; Land- und Überseetransporte durch die Vermarktungsfirma CANPOTEX; Transport auf dem Landweg mittels Eisenbahn mit CANADIAN PAZIFIC (CP) oder CANADIAN NATIONAL RAILWAYS (CN) zu den etwa 1.500 Kilometer entfernten Pazifikhäfen Vancouver, British Columbia, Kanada, oder Portland, Oregon, USA

10 K-MAG® ist ein auf der Basis des Kalisalzgesteins Langbeinitit hergestelltes Düngemittel, welches zusätzlich zum Kalium auch Magnesium und Schwefel enthält. Es wird als Standardprodukt sowie granuliert angeboten und enthält durchschnittlich 22% K_2O, 10% Mg und 22% Schwefel.

11 Im Juli 2014 gab MOSAIC bekannt, die Produktion von MOP im Kaliwerk Carlsbad aufgrund gestiegener Produktionskosten einzustellen.

3.7 Kaliwerk Hersey, Michigan, USA



Übersicht des Kaliwerkes Hersey, Michigan, USA, MOSAIC, mit den Produktionsanlagen über Tage, im Satellitenbild

Überblick Kaliwerk Hersey

Geografische Lage	8 Kilometer östlich von Hersey, im Zentrum von Michigan in den USA
Produktionseinrichtungen	Solfeld zur Gewinnung technischer Lösungen und Aufbereitungsanlage für technische Lösungen
Historie	1989 Beginn der Kalidüngemittelproduktion als Pilotanlage für eine soltechnische Gewinnung durch KALIUM CHEMICALS 1995 Kommerzieller Betrieb 1997 Übernahme durch die IMC GLOBAL 2004 Übernahme durch MOSAIC 2014 Einstellung der Kalidüngemittelproduktion, Verkauf an CARGILL
Tatsächliche Produktion	0,1 Millionen Tonnen MOP (2013)
Installierte Produktionskapazität	0,1 Millionen Tonnen MOP (2013)
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Michigan Becken *Evaporite Member, Salina Group,* Oberes Silur
Kalirohstoff	Sylvinit
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	26 Prozent K_2O
Gewinnbare Vorräte	*Recoverable reserves* 40 Millionen Tonnen
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Soltechnische Gewinnung fester Kalirohsalze
Aufbereitungsverfahren	Technische Eindampf-/Kühlkristallisation
Kaliprodukte	MOP *granular*
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände Versenkung in den geologischen Untergrund mit derzeit zwei aktiven Bohrungen Flüssige Rückstände Versenkung in den geologischen Untergrund
Flächeninanspruchnahme	Solfeld 8 Hektar Produktions- und Hilfsanlagen über Tage 12 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Transport auf dem Landweg mittels LKW zu den lokalen Abnehmern



4 BELARUSKALI, BELARUS

Die OAO BELARUSKALI (BELARUSKALI) produziert als Hauptprodukte ausschließlich Kalidüngemittel und diese nur in der Region Minskaja Woblasz in der Republik Belarus.

Im Jahre 2013 produzierte BELARUSKALI rund 7 Millionen Tonnen MOP und war damit der viertgrößte Kalidüngemittelproduzent der Welt. Nach der heute installierten Produktionskapazität rangiert BELARUSKALI auf Platz 4 der weltgrößten Kalidüngemittelproduzenten.

Nur 15 Prozent der Kalidüngemittelproduktion von BELARUSKALI werden im eigenen Land verbraucht, der weitaus größere Anteil von 85 Prozent dagegen in mehr als 50 Länder exportiert. Die Hauptabnehmer liegen in Europa, Ostasien, in den Mittelmeerländern, Südafrika, Indien, China, Süd- und Nordamerika.

Die 6 Produktionsstandorte von BELARUSKALI liegen alle südlich von Minsk, nahe der Stadt Soligorsk in Belarus.

BELARUSKALI betreibt auf seinen sechs Standorten ausschließlich Bergmännische, Schneidende Gewinnung in Teufenlagen von 400 bis 1.100 Meter.

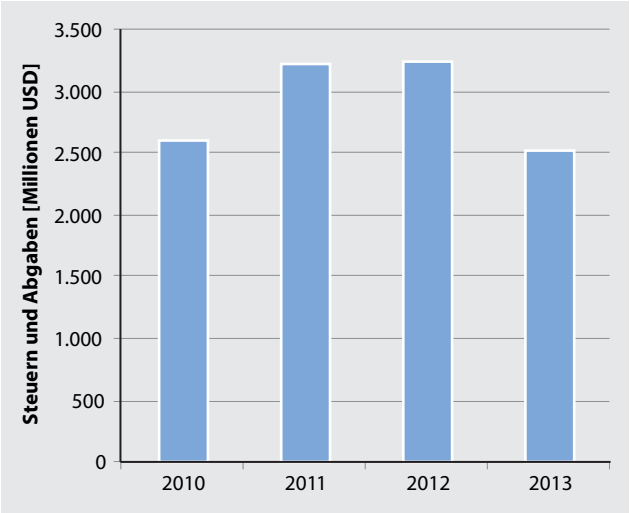
In 4 Aufbereitungsanlagen werden die sylvinitischen Rohsalze hauptsächlich durch Flotation, ein kleinerer Anteil mittels Heißverlösung und Kristallisation, zu verkaufsfähigen Kalidüngemitteln aufbereitet.

BELARUSKALI plant seine Kapazitäten bis 2017 auf 11,4 Millionen Tonnen MOP pro Jahr zu erhöhen. Diese Kapazitätserhöhungen sollen durch das Erreichen der geplanten Endkapazität in den Kalibergwerken Soligorsk 5 (Krasnoslobodsky) und 6 (Berezowsky) mit je 6 Millionen Tonnen Rohsalz pro Jahr realisiert werden. Das im Bau befindliche Kalibergwerk Petrikovsk soll im Jahr 2019 mit einer Produktion von 1,5 Millionen Tonnen MOP pro Jahr starten.

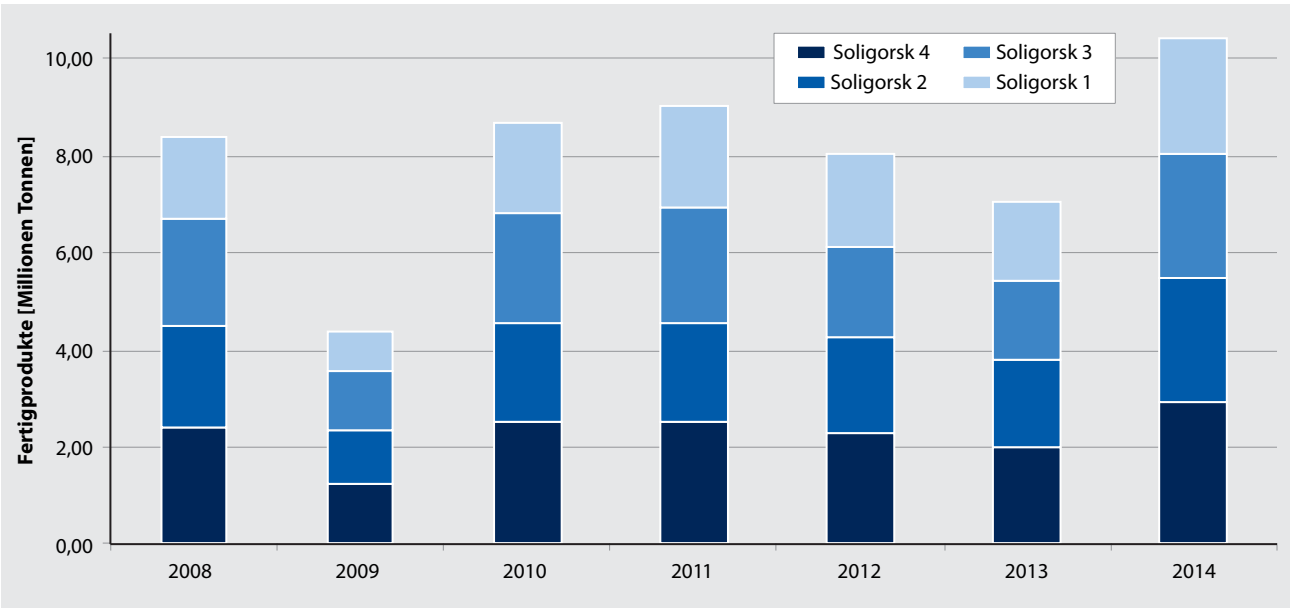
4.1 Meilensteine der Kalidüngemittelproduktions- und Unternehmensgeschichte

1949	Entdeckung *Starobinskoje* Kalilagerstätte
1958	Bau des Kaliwerkes Soligorsk 1
1961	Beginn der Förderung von Kalirohsalzen im Kaliwerk Soligorsk 1
1963	Beginn der Kalidüngemittelproduktion des Kaliwerkes Soligorsk 1
1965	Beginn der Kalidüngemittelproduktion des Kaliwerkes Soligorsk 2
1969	Beginn der Kalidüngemittelproduktion des Kaliwerkes Soligorsk 3
1970	Zusammenschluss der drei Kaliwerke zum Kombinat BELARUSKALI
1975	Reorganisierung in die Produktionsvereinigung BELARUSKALI
1979	Anschluss des neu erbauten Kaliwerkes Soligorsk 4 an die Produktionsvereinigung BELARUSKALI
2009	Erste Förderung von Kalirohsalzen im Kalibergwerk Soligorsk 5 (Krasnoslobodsky), welche zur Aufbereitungsanlage des Kaliwerkes Soligorsk 2 geliefert werden
2012	Erste Förderung von Kalirohsalzen im Kalibergwerk Soligorsk 6 (Berezowsky), welche zur Aufbereitungsanlage des Kaliwerkes Soligorsk 1 geliefert werden

4.2 Betriebs- und volkswirtschaftliche Kennziffern des Unternehmens BELARUSKALI



Umsatzentwicklung aus der Kaliproduktion von BELARUSKALI im Zeitraum von 2010 bis 2013



Entwicklung der Kalidüngemittelproduktion von BELARUSKALI im Zeitraum von 2008 bis 2014

4.3 Kaliwerk Soligorsk 4, Minskaja Woblasz, Belarus



Übersicht des Kaliwerkes Soligorsk 4, BELARUSKALI, mit den Produktionsanlagen über Tage, der kompakten Schüttguthalde für die festen Aufbereitungsrückstände und den Becken für die Klärung sowie Speicherung der flüssigen Aufbereitungsrückstände und Schlämme beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, im Satellitenbild



Gesamtansicht der Produktionsanlagen über Tage des Kaliwerkes Soligorsk 4, BELARUSKALI



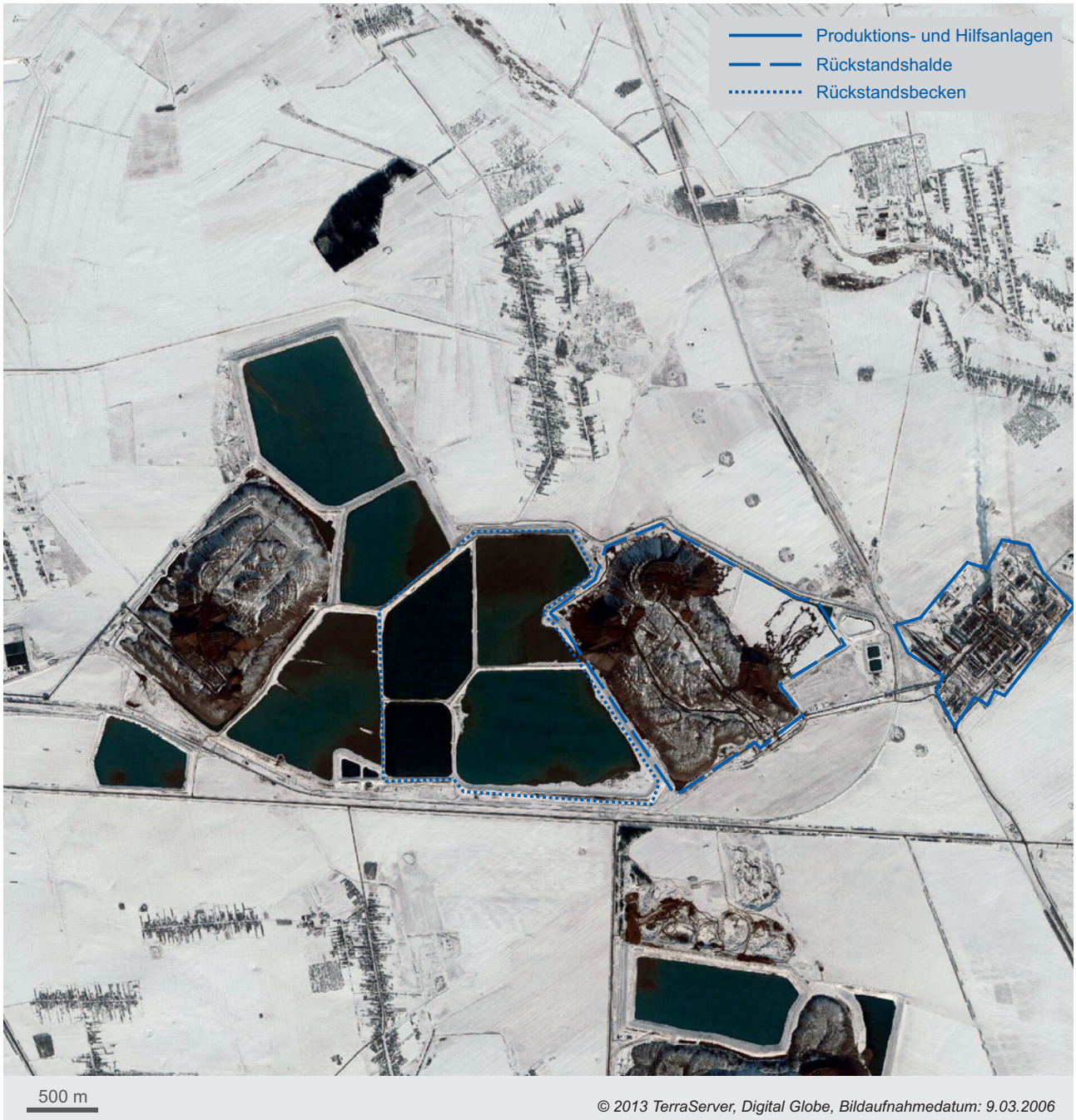
Gesamtansicht der kompakten Schüttguthalde für die festen Aufbereitungsrückstände des Kaliwerkes Soligorsk 4, BELARUSKALI

Überblick Kaliwerk Soligorsk 4

Geografische Lage	20 Kilometer westlich der Stadt Soligorsk, (weißrussisch: Salihorsk), Minskaja Woblasz (Oblast Minsk), Republik Belarus
Produktionseinrichtungen	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze
Historie	1971 Baubeginn des Kaliwerkes Soligorsk 4 1979 Beginn der Kalidüngemittelproduktion
Tatsächliche Produktion	2,92 Millionen Tonnen MOP (2014)
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Starobin Becken Kalilager III, II und I, Oresski-Folge, *Famennian*, Oberes Devon
Kalirohstoff	Sylvinit
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	15 Prozent K_2O
Gewinnbare Vorräte	Bilanzvorräte[12] 240 Millionen Tonnen Rohsalz
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Schneidende Gewinnung im Strebbruchbau
Aufbereitungsverfahren	Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation
Kaliprodukte	MOP *standard* und MOP *granular*
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände (2014) Vollständige Aufhaldung von mehr als 10 Millionen Tonnen Flüssige Rückstände Einleitung in Sammelbecken Teilweises Verbringen nach unter Tage Versenkung in den geologischen Untergrund
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage 126 Hektar Rückstandshalde 180 Hektar Rückstandsbecken 130 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Transport mittels Eisenbahn zu den lokalen Abnehmern und für den Export zu den Ostseehäfen Klaipeda, in Litauen, Ventspils in Lettland, sowie den Schwarzmeerhäfen Mykolajiw und Odessa in der Ukraine

12 Diese Vorratsmengen sind gemäß den gesetzlichen Bestimmungen der Republik Belarus als sogenannte Bilanzvorräte ausgewiesen. Nach den in der Russischen Föderation, in der Republik Belarus und auch in China – aber auch in anderen Ländern Afrikas und Asiens – geltenden Regeln für die Berechnung von Vorräten mineralischer Rohstoffe, werden Bilanzvorräte von Außerbilanzvorräten sowie von prognostischen Vorräten unterschieden. Bilanzvorräte sind die nachgewiesenen Rohstoffressourcen, deren Nutzung nach den zum Zeitpunkt der Erkundung bestehenden technisch-ökonomischen Konditionen möglich ist. Innerhalb dieser Vorratsgruppe wurde nach steigendem Untersuchungsgrad in die Klassen C2, C1, B, A unterschieden. Außerbilanzvorräte bezeichnen die nachgewiesenen Rohstoffressourcen, deren Nutzung nach den zum Zeitpunkt der Erkundung bestehenden technisch-ökonomischen Konditionen nicht möglich, zukünftig aber denkbar ist. Innerhalb dieser Vorratsgruppe wurde nach steigendem Untersuchungsgrad in die Klassen c2, c1 unterschieden. Prognostische Vorräte bezeichnen die Rohstoffressourcen, die mit wissenschaftlichen Methoden begründet voraussagbar sind, jedoch im Vorratsfeld gar nicht (Vorratsklasse δ2) oder nur unzureichend (Vorratsklasse δ1) aufgeschlossen sind.

4.4 Kaliwerk Soligorsk 3, Minskaja Woblasz, Belarus



Übersicht des Kaliwerkes Soligorsk 3, BELARUSKALI, mit den Produktionsanlagen über Tage, der kompakten Schüttguthalde für die festen Aufbereitungsrückstände und den Becken für die Klärung sowie Speicherung der flüssigen Aufbereitungsrückstände und Schlämme beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, im Satellitenbild



Gesamtansicht der Produktionsanlagen über Tage des Kaliwerkes Soligorsk 3, BELARUSKALI



Gesamtansicht der kompakten Schüttguthalde für die festen Aufbereitungsrückstände des Kaliwerkes Soligorsk 3, BELARUSKALI

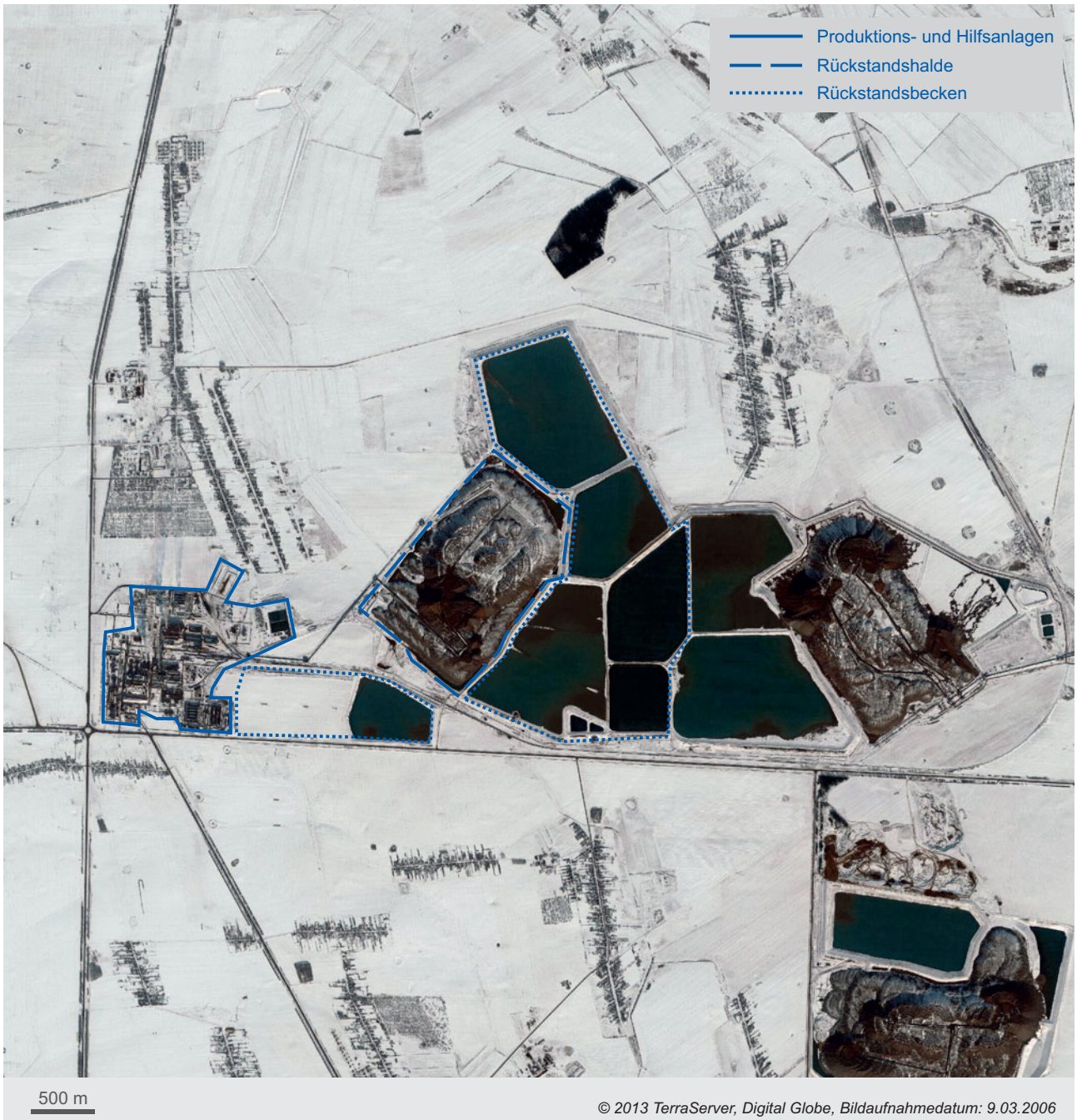


Teilansicht der kompakten Schüttguthalde mit den Absetzanlagen für die festen Aufbereitungsrückstände des Kaliwerkes Soligorsk 3, BELARUSKALI

Überblick Kaliwerk Soligorsk 3

Geografische Lage	9 Kilometer nordöstlich der Stadt Soligorsk (weißrussisch: Salihorsk), Minskaja Woblasz (Oblast Minsk), Republik Belarus
Produktionseinrichtungen	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze
Historie	1969 Beginn der Kalidüngemittelproduktion
Tatsächliche Produktion	2,57 Millionen Tonnen MOP (2014)
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Starobin Becken Kalilager III, II und I, Oresski-Folge, *Famennian*, Oberes Devon
Kalirohstoff	Sylvinit
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	16 Prozent K_2O
Gewinnbare Vorräte	Bilanzvorräte 174 Millionen Tonnen Rohsalz
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Schneidende Gewinnung im Strebbruchbau
Aufbereitungsverfahren	Flotation
Kaliprodukte	MOP *standard* und MOP *granular*
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände (2014) Vollständige Aufhaldung von mehr als 8 Millionen Tonnen Flüssige Rückstände Einleitung in Sammelbecken Teilweises Verbringen nach unter Tage Versenkung in den geologischen Untergrund
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage 90 Hektar Rückstandshalde 223 Hektar Rückstandsbecken 160 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Transport mittels Eisenbahn zu den lokalen Abnehmern und für den Export zu den Ostseehäfen Klaipeda, in Litauen, Ventspils in Lettland, sowie den Schwarzmeerhäfen Mykolajiw und Odessa in der Ukraine

4.5 Kaliwerk Soligorsk 2, Minskaja Woblasz, Belarus



Übersicht des Kaliwerkes Soligorsk 2, BELARUSKALI, mit den Produktionsanlagen über Tage, der kompakten Schüttguthalde für die festen Aufbereitungsrückstände und den Becken für die Klärung sowie Speicherung der flüssigen Aufbereitungsrückstände und Schlämme beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, im Satellitenbild



Gesamtansicht der Produktionsanlagen über Tage des Kaliwerkes Soligorsk 2, BELARUSKALI



Tagesschächte und Aufbereitungsgebäude des Kaliwerkes Soligorsk 2, BELARUSKALI

Überblick Kaliwerk Soligorsk 2

Geografische Lage	10 Kilometer nördlich der Stadt Soligorsk (weißrussisch: Salihorsk), Minskaja Woblasz (Oblast Minsk), Republik Belarus
Produktionseinrichtungen	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze
Historie	1965 Beginn der Kalidüngemittelproduktion 2009 Zusätzliche Verarbeitung von Rohsalzen aus dem Kaliberg-werk Soligorsk 5 (Krasnoslobodsky)
Tatsächliche Produktion	2,57 Millionen Tonnen MOP (2014)
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Starobin Becken Kalilager III, II und I, Oresski-Folge, *Famennian*, Oberes Devon
Kalirohstoff	Sylvinit
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	15 Prozent K_2O
Gewinnbare Vorräte	Bilanzvorräte 57 Millionen Tonnen Rohsalz
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Schneidende Gewinnung im Strebbruchbau
Aufbereitungsverfahren	Flotation
Kaliprodukte	MOP *standard* und MOP *granular*
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände (2014) Vollständige Aufhaldung von etwa 7 Millionen Tonnen Flüssige Rückstände Einleitung in Sammelbecken Teilweises Verbringen nach unter Tage Versenkung in den geologischen Untergrund
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage 120 Hektar Rückstandshalde 180 Hektar Rückstandsbecken 410 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Transport mittels Eisenbahn zu den lokalen Abnehmern und für den Export zu den Ostseehäfen Klaipeda, in Litauen, Ventspils in Lettland, sowie den Schwarzmeerhäfen Mykolajiw und Odessa in der Ukraine

4.6 Kaliwerk Soligorsk 1, Minskaja Woblasz, Belarus



Übersicht des Kaliwerkes Soligorsk 1, BELARUSKALI, mit den Produktionsanlagen über Tage, der kompakten Schüttguthalde für die festen Aufbereitungsrückstände und den Becken für die Klärung sowie Speicherung der flüssigen Aufbereitungsrückstände und Schlämme beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, im Satellitenbild



Teilansicht der Produktionsanlagen über Tage sowie der kompakten Schüttguthalde für die festen Aufbereitungsrückstände (Hintergrund) des Kaliwerkes Soligorsk 2, BELARUSKALI



Teilansicht der kompakten Schüttguthalde für die festen Aufbereitungsrückstände (Hintergrund rechts) sowie der Becken für die Klärung sowie Speicherung der flüssigen Aufbereitungsrückstände und Schlämme beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen des Kaliwerkes Soligorsk 2, BELARUSKALI

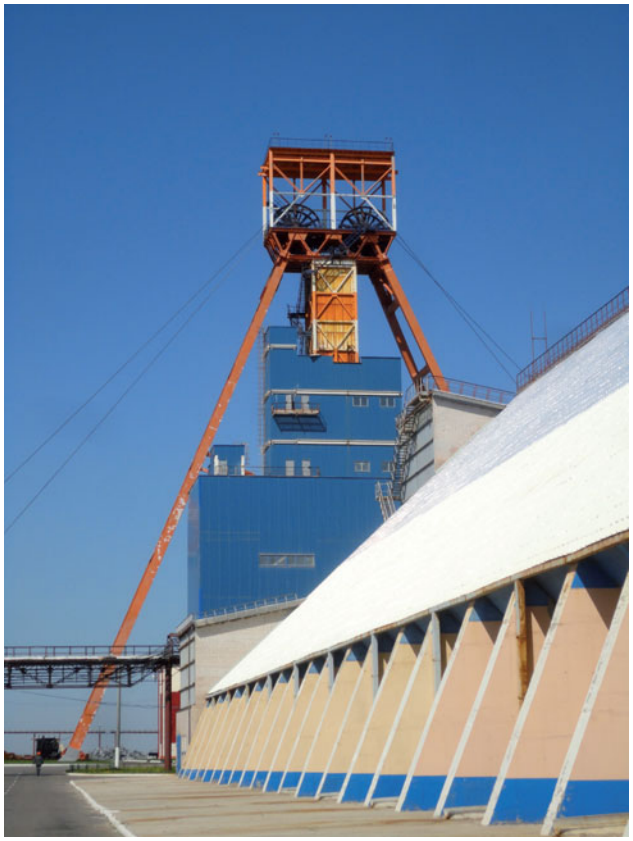
Überblick Kaliwerk Soligorsk 1

Geografische Lage	4 Kilometer nordöstlich der Stadt Soligorsk (weißrussisch: Salihorsk), Minskaja Woblasz (Oblast Minsk), Republik Belarus	
Produktionseinrichtungen	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	
Historie	1958	Baubeginn des Kaliwerkes Soligorsk 1
	1963	Beginn der Kalidüngemittelproduktion
	2012	Zusätzliche Verarbeitung von Rohsalzen aus dem Kalibergwerk Soligorsk 6 (Berezowsky)
Tatsächliche Produktion	2,34 Millionen Tonnen MOP (2014)	
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Starobin Becken Kalilager III, II und I, Oresski-Folge, *Famennian*, Oberes Devon	
Kalirohstoff	Sylvinit	
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	13 – 14 Prozent K_2O	
Gewinnbare Vorräte	Bilanzvorräte	60 Millionen Tonnen Rohsalz
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Schneidende Gewinnung im Strebbruchbau	
Aufbereitungsverfahren	Flotation	
Kaliprodukte	MOP *standard* und MOP *granular*	
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände (2014)	Vollständige Aufhaldung von mehr als 8 Millionen Tonnen
	Flüssige Rückstände	Einleitung in Sammelbecken Teilweises Verbringen nach unter Tage Versenkung in den geologischen Untergrund
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage	134 Hektar
	Rückstandshalde	200 Hektar
	Rückstandsbecken	140 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Transport mittels Eisenbahn zu den lokalen Abnehmern und für den Export zu den Ostseehäfen Klaipeda, in Litauen, Ventspils in Lettland, sowie den Schwarzmeerhäfen Mykolajiw und Odessa in der Ukraine	

4.7 Kalibergwerk Soligorsk 5 (Krasnoslobodsky), Minskaja Woblasz, Belarus



Übersicht des Kaliwerkes Soligorsk 5 (Krasnoslobodsky), BELARUSKALI, mit den Tagesschächten und den Nebenanlagen über Tage, im Satellitenbild



Förderschacht und Tagesanlagen des Kalibergwerkes Soligorsk 5 (Krasnoslobodsky), BELARUSKALI



Serviceschacht und Tagesanlagen des Kalibergwerkes Soligorsk 5 (Krasnoslobodsky), BELARUSKALI

Überblick Kalibergwerk Soligorsk 5 (Krasnoslobodsky)

Geografische Lage	15 Kilometer nordwestlich der Stadt Soligorsk (weißrussisch: Salihorsk), Minskaja Woblasz (Oblast Minsk), Republik Belarus
Produktionseinrichtungen	Bergwerk und 7,5 Kilometer lange Bandanlage an der Tagesoberfläche zu den Aufbereitungsanlagen des Kaliwerkes Soligorsk 2
Historie	2009 Beginn der Förderung von Kalirohsalzen
Installierte Produktionskapazität	6 Millionen Tonnen Rohsalz (2014)
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Starobin Becken Kalilager III, II und I, Oresski-Folge, *Famennian*, Oberes Devon
Kalirohstoff	Sylvinit
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	15 Prozent K_2O
Gewinnbare Vorräte	Bilanzvorräte 170 Millionen Tonnen Rohsalz
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Schneidende Gewinnung im Strebbruchbau
Aufbereitungsverfahren	KEINE Aufbereitung; NUR Gewinnung
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage 40 Hektar

4.8 Kalibergwerk Soligorsk 6 (Berezowsky), Minskaja Woblasz, Belarus



Übersicht des Kaliwerkes Soligorsk 6 (Berezowsky), BELARUSKALI, mit den Tagesschächten und den Nebenanlagen über Tage, im Satellitenbild

Überblick Kalibergwerk Soligorsk 6 (Berezowsky)

Geografische Lage	10 Kilometersüdöstlich der Stadt Soligorsk (weißrussisch: Salihorsk), Minskaja Woblasz (Oblast Minsk), Republik Belarus
Produktionseinrichtungen	Bergwerk und 11 Kilometer lange Bandanlage an der Tagesoberfläche zu den Aufbereitungsanlagen des Kaliwerkes Soligorsk 1
Historie	2009 Beginn der Förderung von Kalirohsalzen
Installierte Produktionskapazität 2015	6 Millionen Tonnen Rohsalz
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Starobin Becken Kalilager III, II und I, Oresski-Folge, *Famennian*, Oberes Devon
Kalirohstoff	Sylvinit
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	15 Prozent K_2O
Gewinnbare Vorräte	Bilanzvorräte 155 Millionen Tonnen Rohsalz
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Schneidende Gewinnung im Strebbruchbau
Aufbereitungsverfahren	KEINE Aufbereitung; NUR Gewinnung
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage 25 Hektar



5 CHINA

Alle chinesischen Produzenten stellten im Jahre 2013 gemeinsam mehr als 6 Millionen Tonnen Kalidüngemittel her. Damit reiht sich China als Land auf Platz 5 der Kalidüngemittelproduzenten ein, weshalb es in der nach der tatsächlichen Produktionsgröße sortierten Auflistung an dieser Stelle platziert worden ist. Die Kapazitäten der mindestens 24 Produktionsstandorte sind dabei jedoch von sehr unterschiedlicher Größe, müssten nach ihrer tatsächlichen individuellen Produktion alle samt im hinteren Drittel dieser Liste aufgeführt sein.

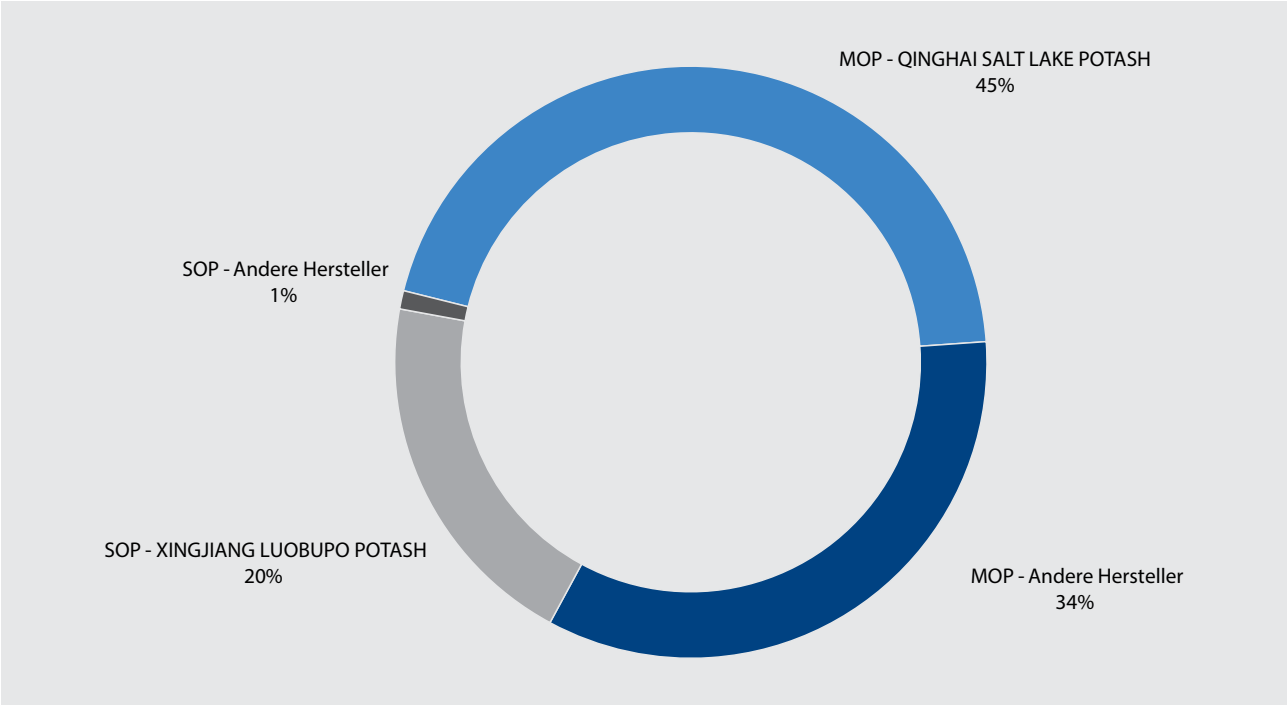
Obgleich die chinesischen Produzenten nicht alle gesellschaftsrechtlich miteinander verbunden sind, werden sie bei der Statistik und auch bei der Beschreibung der dort betriebenen Methoden, Verfahren und Anlagen zusammengefasst. Die von ihnen produzierten Kalidüngemittel werden ausschließlich in China vertrieben, decken aber nur 30 Prozent des Bedarfes. Die Produktionsstandorte sind in den westlichen Provinzen Qinghai und Xinjiang lokalisiert, wo natürliche Lösungen aus Salzseen für die Herstellung von MOP und SOP/SOPM-Düngemittel genutzt werden.

QINGHAI SALT LAKE POTASH CO. (QSL) ist der größte Produzent in China. Dieser Konzern besteht aus 6 Tochterunternehmen, welche alle im Qaidam Becken, etwa 60 Kilometer nordöstlich von Golmud, produzieren, wo die Gesellschaft über Nutzungsrechte des 120 Quadratkilometer großen Salzsees verfügt. QSL ist eine börsennotierte Aktiengesellschaft, die an dem Finanzhandelsplatz in Shenzhen (SZSE:000792) gehandelt wird.

SDIC XINJIANG LUOBUPO POTASH CO., LTD. ist der größte Produzent von SOP in China, weshalb dieser auch nachfolgend ausführlicher behandelt werden soll. Weiterhin existieren mehrere mittlere und zahlreiche kleinere Produzenten, die nicht immer in der Lage sind, international übliche Produktstandards zu erfüllen.

China plante, seine Kapazitäten bis Ende 2015 um 2 Millionen Tonnen pro Jahr zu erweitern, was sowohl bei kleineren Produzenten sowie durch eine neue Anlage bei QSL erreicht werden soll. Des Weiteren soll langfristig die SOP-Kapazität um 1,1 Millionen Tonnen gesteigert werden.

5.1 Meilensteine der Kalidüngemittelproduktions- und Unternehmensgeschichte sowie betriebs- und volkswirtschaftliche Kennziffern



Anteile der Produzenten an der Kalidüngemittelproduktion in China im Jahr 2013

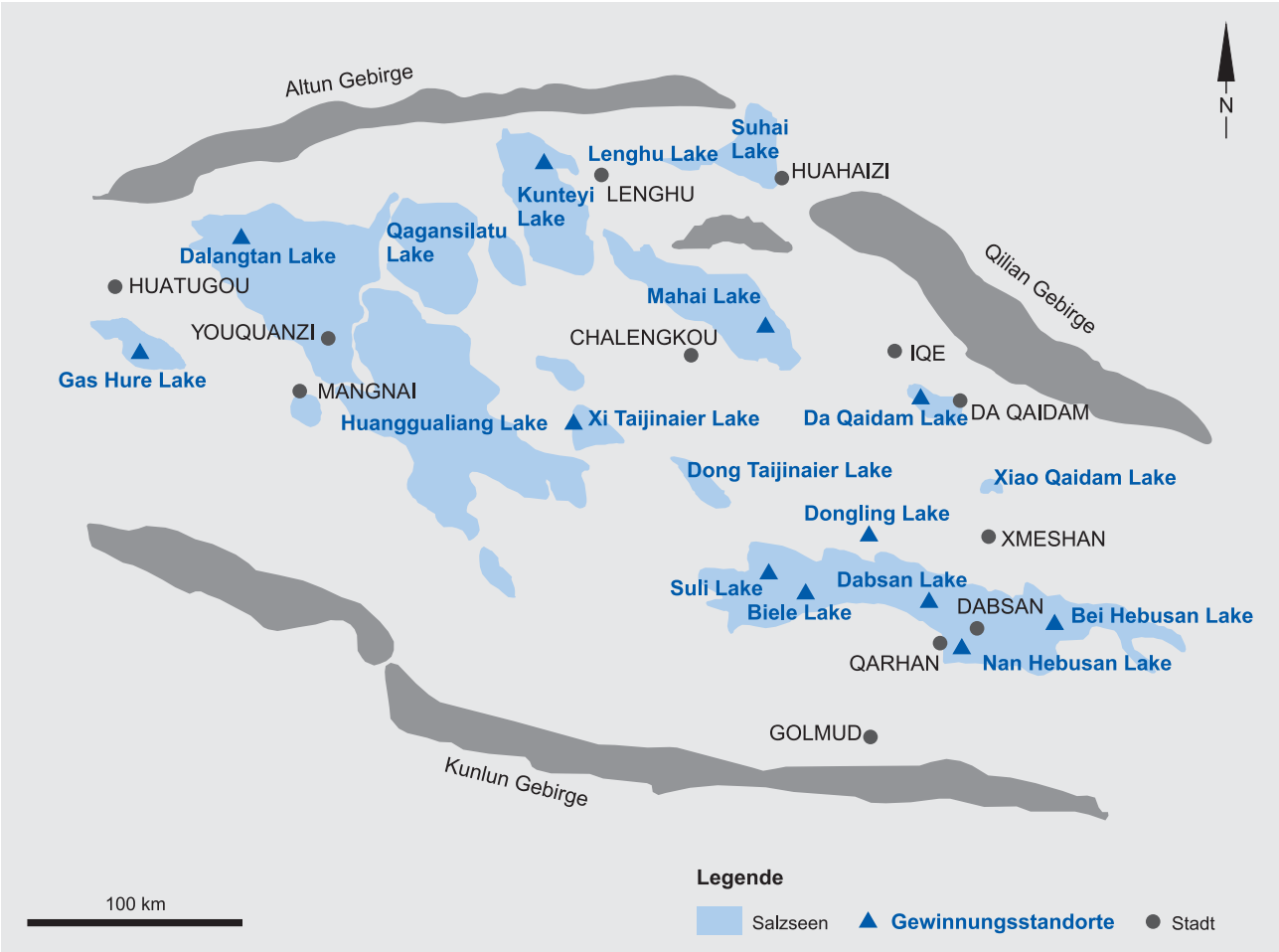
QINGHAI SALT LAKE POTASH CO. (QSL)[13]

1958	Gründung der QSL zur Nutzung der chinesischen Lagerstätten bei Golmud, Herstellung von Kalidüngemitteln unterschiedlicher Qualitäten mit einfachsten Verfahren und viel Handarbeit
1997	Börsengang mit 18,49 Prozent staatlicher Beteiligung, SINOCHEM CORPORATION als zweitgrößter *Shareholder* ebenfalls mit 18,49 Prozent, heute größter Kalidüngemittelhersteller in China mit mehreren Produktionsstätten, alle in der Qinghai Provinz lokalisiert
2004	Produktionskapazität < 500.000 Tonnen MOP, Expansionsprojekte zur Steigerung der Produktionskapazität auf eine Million Tonnen
2011	Zusammenschluss mit QINGHAI SALT LAKE INDUSTRY GROUP Start der geplanten Kapazitätserhöhungen um eine Million Tonnen pro Jahr
2012	Produktion von Kalidüngemittel beträgt 86% (entspricht etwa 900 Millionen USD) am Gesamtumsatz von QSL
2014	Produktionskapazität beträgt etwa 4,5 Millionen Tonnen Fertigprodukte

13 Aufgrund der Vielzahl der Produzenten sollen an dieser Stelle nur die zwei Hauptproduzenten QINGHAI SALT LAKE POTASH CO. und SDIC XINJIANG LUOBUPO POTASH CO., LTD. berücksichtigt werden.

SDIC XINJIANG LUOBUPO POTASH CO., LTD.

2000	Gründung der XINJIANG LUOBUPO POTASH als Tochtergesellschaft der 1995 gegründeten SDIC[14]
2004	Beginn der Kalidüngemittelproduktion, vorrangig SOP in der Xingjiang Provinz mit einer Kapazität von 40.000 Tonnen SOP pro Jahr
2008	Steigerung der Kapazität auf 1,20 Millionen Tonnen pro Jahr
2012	Der Jahresumsatz beträgt etwa 700 Millionen USD
2013	Anschluss der Produktionsstandorte der XINJIANG LUOBUPO POTASH an das chinesische Eisenbahnnetz
2014	Produktionskapazität beträgt etwa 1,5 Millionen Tonnen Fertigprodukte



Schematische Darstellung des Qaidam Beckens mit Produktionsstandorten

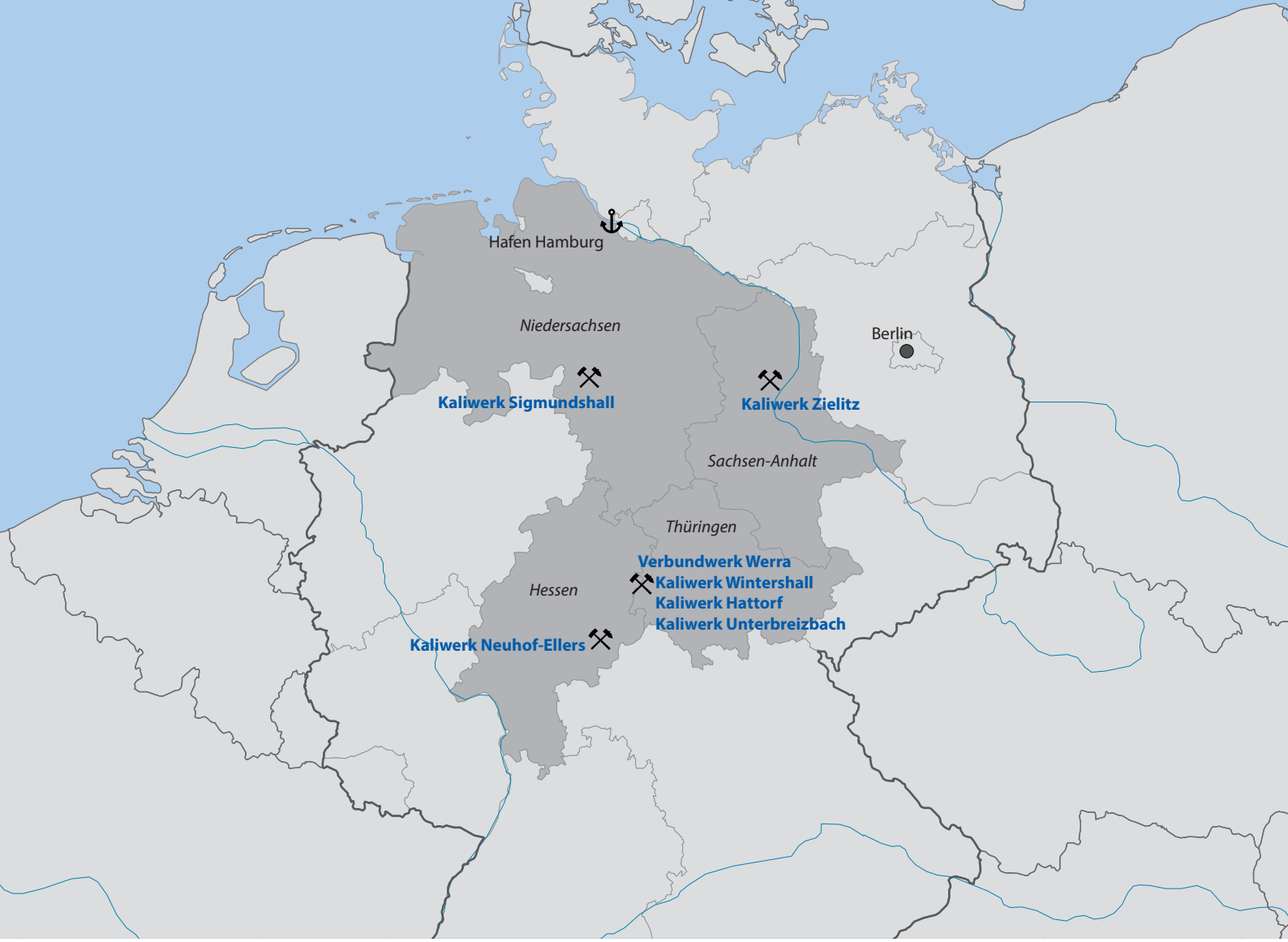
14 SDIC ist der Abkürzung für State Development & Investment Corporation, ein chinesisches Staatsunternehmen mit zahlreichen Tochterunternehmen in der Energiebranche, im Kohlebergbau und im Düngemittelgeschäft.

Auflistung der größten chinesischen MOP- und SOP-Produzenten und ihrer Kapazitäten im Jahr 2013

MOP-Produzenten	**Kapazität [t]**
QINGHAI SALT LAKE GROUP	2.600.000
QINGHAI ZANGGE POTASH	700.000
QINGHAI AVIC RESOURCES	400.000
QINGHAI CITIC GUOAN TECHNOLOGY	300.000
QINGHAI SALT LAKE CHEMICALS	200.000
SOP-Produzenten	
XINGJIANG LUOBOPO POTASH	1.500.000
XINGJIANG YARET CHEMICAL INDUSTRY	k.A.
QINGHAI BINDI POTASH CO.	480.000
QINGHAI GAODUAN SALT LAKE SCIENCE & TECHNOLOGY	k.A.

Überblick China

Geografische Lage	MOP (SOPM)-Produktion: Qaidam Becken, nördlich des Qinghai-Tibet-Plateaus in der Qinghai Provinz in Westchina SOP Produktion: Südöstlich des Tarim Beckens, nahe Lop Nur in der Xinjiang Provinz in Westchina	
Produktionseinrichtungen	Anlagen zur Gewinnung natürlicher Lösungen und Anlagen zur Aufbereitung natürlicher Lösungen	
Tatsächliche Produktion	4,20 Millionen Tonnen MOP 2,02 Millionen Tonnen SOP (2013)	
Installierte Produktionskapazität	5,50 Millionen Tonnen KCl pro Jahr 3,20 Millionen Tonnen SOP pro Jahr (2014)	
Lagerstätte und deren Stratigrafie	MOP und SOPM Produktion: Mehr als 40 Salzseen im Qaidam Becken/Qinghai Provinz SOP und MOP Produktion: Lop Nur Lake/Xinjiang Provinz, Natürliche Lösungen	
Kalirohstoff	Kalium-haltige Lösungen im Oberflächengewässer	
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der gewonnenen Kalirohstoffe	Rund 1 Prozent K_2O in den natürlichen Lösungen, mehr als 23 Prozent im Rohsalz	
Gewinnbare Vorräte	735 Millionen Tonnen KCl in der Qinghai Provinz 136 Millionen Tonnen in der Xinjiang Provinz	
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Gewinnung oberflächennaher natürlicher Salzlösungen	
Aufbereitungsverfahren	Solare Evaporation und natürliche Kristallisation, an einzelnen Standorten auch kombiniert mit Flotation und/oder technischer Eindampf-/Kühlkristallisation	
Kaliprodukte	MOP (Marke Yanqiao) , SOP (verschiedene Qualitäten), SOPM	
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände	Rückführung in die Salzseen von mehr als 40 Millionen Tonnen pro Jahr im Qaidam Becken
	Flüssige Rückstände	Rückführung in die Salzseen
Transport der Fertigprodukte	Per LKW und Eisenbahn innerhalb Chinas	



6 K+S KALI, DEUTSCHLAND

Die K+S KALI GMBH (K+S) ist eine 100prozentige Tochtergesellschaft der K+S AG, dem einzigen im DAX notierten Rohstoffunternehmen, das am Finanzhandelsplatz in Frankfurt (FWB:SDF) gehandelt wird.

Das Kali- und Magnesium-Geschäft nimmt einen Anteil von etwa 60 Prozent am Gesamtumsatz der K+S GRUPPE ein. Im Jahre 2013 produzierte K+S rund 7 Millionen Tonnen Kalium-haltiger Fertigprodukte und war damit der fünftgrößte Kalidüngemittelproduzent der Welt. Nach der heute installierten Produktionskapazität rangiert K+S auf Platz 5 der weltgrößten Kalidüngemittelproduzenten.

Etwa die Hälfte aller produzierten Düngemittel und Spezialprodukte werden exportiert, vornehmlich in Länder West- und Südeuropas, nach Brasilien, China, Indien und Südostasien.

K+S gewinnt in 6 Kalibergwerken in den Bundesländern Thüringen, Hessen, Sachsen-Anhalt und Niedersachsen in Deutschland in Teufenlagen zwischen 400 und 1.400 Meter Kalirohsalze mittels Bergmännischer Gewinnung durch Bohren und Sprengen. An einem weiteren Standort, dem ehemaligen Kaliwerk Bergmannssegen-Hugo findet lediglich eine Veredlung von Zwischenprodukten, nicht aber die hauptsächlichen Aufbereitungsschritte zur Konzentration von Wertstoffen zur Erzeugung von Kalidüngemitteln statt[15].

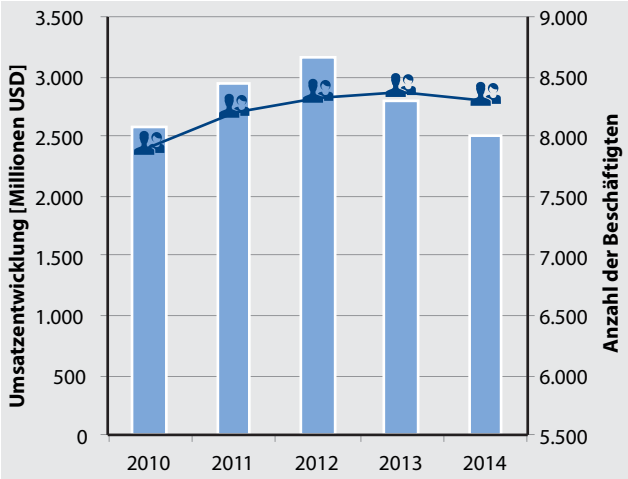
Durch die Akquisition der kanadischen POTASH ONE verfügt K+S zukünftig über die Möglichkeit, die jährliche Produktionskapazität mit dem Legacy Projekt langfristig um mindestens 2,85 Millionen Tonnen zu erhöhen. Der Produktionsstart ist für 2016 geplant. Das Legacy Projekt ist das erste Projekt der K+S GRUPPE zur Gewinnung fester Kalirohsalze mittels Soltechnischer Gewinnung.

15 Daher wird dieser Standort im folgenden nicht näher beschrieben und auch in der Zählung der weltweiten Standorte nicht berücksichtigt.

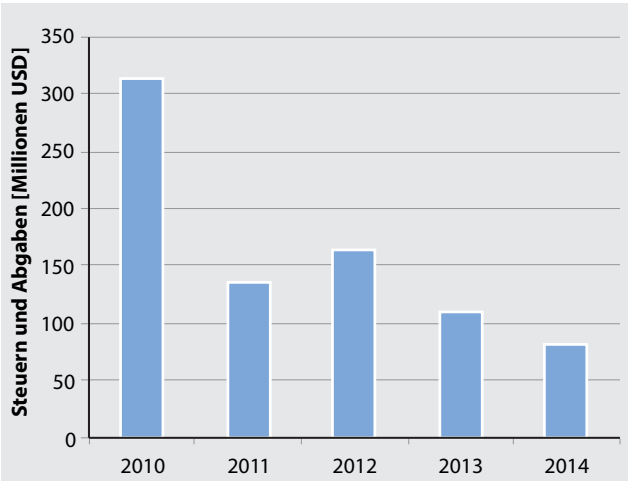
6.1 Meilensteine der Kalidüngemittelproduktions- und Unternehmensgeschichte

1889	Gründung der "AKTIENGESELLSCHAFT FÜR BERGBAU UND TIEFBOHRUNG" in Goslar, aus der später die SALZDETFURTH AG – die älteste Vorläuferin der heutigen K+S AKTIENGESELLSCHAFT – hervorgeht
1894	Gründung der KALIBOHRGESELLSCHAFT WINTERSHALL (seit 1899 "Gewerkschaft Wintershall")
1899	Beginn der Kalidüngemittelproduktion in Salzdetfurth, Firmierung als KALIWERKE SALZDETFURTH AG
1906	Gründung des BURBACH KONZERNS
1928	Umbenennung in BURBACH-KALIWERKE AG
1937	Gründung der VEREINIGTEN KALIWERKE SALZDETFURTH AG
1945	Trennung der deutschen Kali- und Düngemittelindustrie in Ost- und Westdeutschland; 40 Prozent der damaligen Produktionskapazitäten befinden sich auf dem Gebiet der westalliierten Besatzungszonen (ab 1949 Bundesrepublik Deutschland); 60 Prozent auf dem Gebiet der damaligen sowjetischen Besatzungszone (ab 1949 Deutsche Demokratische Republik)
1955	WINTERSHALL AG übernimmt die BURBACH-KALIWERK AG
1970	Zusammenschluss aller inländischen Kali- und Steinsalzaktivitäten von Wintershall und Salzdetfurth in der neu gegründeten KALI UND SALZ GMBH
1971	Umwandlung in KALI UND SALZ AG
1990	Gründung der MITTELDEUTSCHEN KALI AG (MdK) aus dem VEB KOMBINAT KALI
1993	Zusammenschluss aller Kali- und Steinsalzaktivitäten der MdK und der bisherigen KALI UND SALZ AG: Gründung der KALI UND SALZ GMBH, des Gemeinschaftsunternehmens von K+S und der TREUHANDANSTALT
1994	Umbenennung der bisherigen KALI UND SALZ AG in KALI UND SALZ BETEILIGUNGS AG (Holding)
1998	Vollständige Übernahme des Anteils der BUNDESANSTALT FÜR VEREINIGUNGSBEDINGTE SONDERAUFGABEN (früher: TREUHANDANSTALT) an der KALI UND SALZ GMBH durch K+S; Aufnahme von K+S in den MDAX
1999	Umbenennung im Zuge der Neuausrichtung in K+S AKTIENGESELLSCHAFT Übernahme der COMPO und Gründung von FERTIVA
2002	Bündelung der Salzaktivitäten von K+S und SOLVAY in ein *joint venture* ESCO EUROPEAN SALT COMPANY (ESCO)
2004	ESCO geht zu 100 Prozent an K+S, K+S übernimmt den Granulierstandort COMPAGNIE DE COMPACTAGE DE WITTENHEIM (CCW) der französischen SOCIÉTÉ COMMERCIALE DES POTASSES D'ALSACE (SCPA) im Elsass
2006	Erwerb des chilenischen Salzproduzenten SOCIEDAD PUNTA DE LOBOS (SPL)
2008	Aufnahme von K+S in den DAX
2009	Erwerb des nordamerikanischen Salzproduzenten MORTON SALT
2011	Übernahme der kanadischen *Junior Mining Company* POTASH ONE und Verkauf von COMPO
2012	Beginn der Bauarbeiten für ein neues Kaliwerk in der kanadischen Provinz Saskatchewan und Verkauf der K+S NITROGEN (früher: FERTIVA)

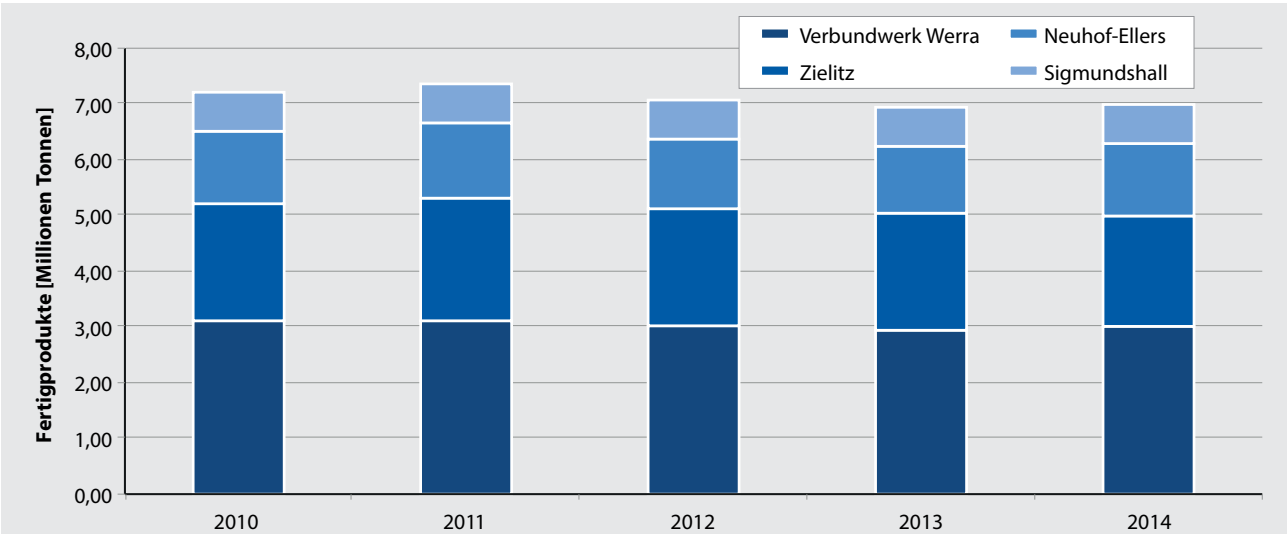
6.2 Betriebs- und volkswirtschaftliche Kennziffern für das Geschäftsfeld Kali- und Magnesium-Produkte der K+S GRUPPE



Umsatzentwicklung und Anzahl der Beschäftigten für den Geschäftsbereich Kali- und Magnesium-Produkte der K+S GRUPPE in den Jahren 2010 bis 2014



Entwicklung der Steuern und Abgaben auf Erträge für den Geschäftsbereich Kali- und Magnesium-Produkte der K+S GRUPPE im Zeitraum von 2010 bis 2014



Entwicklung der Kalidüngemittelproduktion in den Kaliwerken von K+S im Zeitraum von 2010 bis 2014

6.3 Verbundwerk Werra, Hessen/Thüringen, Deutschland



Übersicht des Kaliwerkes Wintershall, Hessen, K+S, mit den Produktionsanlagen über Tage, der kompakten Schüttguthalde für die festen Aufbereitungsrückstände und den Becken für die Zwischenspeicherung der flüssigen Aufbereitungsrückstände beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, im Satellitenbild



Übersicht des Kaliwerkes Hattorf, Hessen, K+S, mit den Produktionsanlagen über Tage, der kompakten Schüttguthalde für die festen Aufbereitungsrückstände und den Becken für die Zwischenspeicherung der flüssigen Aufbereitungsrückstände beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, im Satellitenbild



Übersicht des Kaliwerkes Unterbreizbach, Thüringen, K+S, mit den Produktionsanlagen über Tage sowie der ehemaligen, heute zurück gebauten, kompakten Schüttguthalde für die festen Aufbereitungsrückstände und den Becken für die Zwischenspeicherung der flüssigen Aufbereitungsrückstände beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, im Satellitenbild





Gesamtansicht der Produktionsanlagen über Tage und kompakte Schüttguthalden (Hintergrund) des Kaliwerkes Wintershall, K+S [Foto mit freundlicher Genehmigung von K+S KALI GmbH, Kassel, Deutschland]

Gesamtansicht der Produktionsanlagen über Tage des Kaliwerkes Unterbreizbach, K+S [Foto mit freundlicher Genehmigung von K+S KALI GmbH, Kassel, Deutschland]



Gesamtansicht der Produktionsanlagen über Tage und der kompakte Schüttguthalde des Kaliwerkes Hattorf, K+S, im Luftbild [Foto mit freundlicher Genehmigung von K+S KALI GmbH, Kassel, Deutschland]

Überblick Verbundwerk Werra

Geografische Lage	Grenzbereich zwischen den Bundesländern Hessen (Standorte Hattorf und Wintershall) im Landkreis Hersfeld-Rotenburg und Thüringen (Standort Unterbreizbach) im Wartburgkreis in Deutschland.
Produktionseinrichtungen	Kaliwerke Hattorf, Wintershall und Unterbreizbach mit ... ... jeweils einem eigenen Bergwerk ... jeweils einer eigenen Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze
Historie	1900 Baubeginn Schacht Grimberg (heute Werk Wintershall) 1908 Beginn der Förderung von Rohsalzen im Werk Hattorf 1910 Beginn der Förderung von Rohsalzen im Werk Unterbreizbach 1997 Verbund der ehemals eigenständigen Werke Hattorf (HA), Wintershall (WI) und Unterbreizbach (UB) und Merkers/Springen 2004 Untertägige Förderverbindung zwischen dem thüringischen Kaliwerk Unterbreizbach und dem hessischen Kaliwerk Hattorf
Tatsächliche Produktion	3,01 Millionen Tonnen Kalium- und Magnesium-haltige Produkte (2014)
Installierte Produktionskapazität	3,25 Millionen Tonnen Kalium- und Magnesium-haltige Produkte (2014)
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Werra-Fulda Becken Kalilager Thüringen und Hessen, sowie sog. Begleitflöz, Werra-Folge, Zechstein, Oberes Perm
Kalirohstoff	Sylvinit, Carnallitit und Hartsalz
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	8 – 14 Prozent K_2O, 11 – 12 Prozent $MgSO_4$
Gewinnbare Vorräte[16]	Wintershall, Hattorf 572,6 Millionen Tonnen Rohsalz (entspricht 76,6 Millionen Tonnen KCl und 78,3 Millionen Tonnen Kieserit) Unterbreizbach 82,2 Millionen Tonnen Rohsalz (entspricht 27,9 Millionen Tonnen KCl und 7,1 Millionen Tonnen Kieserit)
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Gewinnung durch Bohren und Sprengen im Kammerpfeilerbau mit quadratischen Pfeilern sowie Kuppenabbau mit Versatz

16 *"Die angegebenen gewinnbaren Vorräte (Reserven) wurden zuletzt zum 31. Dezember 2012 ermittelt und sind mit den internationalen Bezeichnungen "proven" und "probable reserves" vergleichbar."* (K+S 2013a, Finanzbericht 2012, Seite 216)

Aufbereitungsverfahren	Wintershall, Hattorf	Flotation, Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation, ESTA®
	Unterbreizbach	Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation, Flotation
Kaliprodukte	MOP, SOP, weitere Produktpalette mit mehr als 20 verschiedenen Kalium- und Magnesium-haltigen Produkten	
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände 2014	Insgesamt mehr als 14 Millionen Tonnen, davon: • Spülversatz von >1,4 Millionen Tonnen • Aufhaldung von >13 Millionen Tonnen
	Flüssige Rückstände 2014	Insgesamt 7,5 Millionen Kubikmeter (entspricht 2,6 Millionen Tonnen Salzfracht), davon: • Versenkung in den geologischen Untergrund (Plattendolomit, Zechstein) von >4 Millionen Kubikmeter (entspricht etwa 1,6 Millionen Tonnen Salzfracht) • Einleitung in Fließgewässer von >3 Millionen Kubikmeter (entspricht etwa einer Million Tonnen Salzfracht)

Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage	Wintershall	38 Hektar
		Hattorf	44 Hektar
		Unterbreizbach	18 Hektar
	Rückstandshalden	Wintershall	92 Hektar
		Hattorf	81 Hektar
	Rückstandsbecken	Wintershall	7 Hektar
		Hattorf	9 Hektar
		Unterbreizbach	2 Hektar

Transport der Fertigprodukte	Transport auf dem Landweg mittels LKW und Eisenbahn zu den lokalen Abnehmern in Deutschland und Europa und für Überseetransporte zu den Kalikais der K+S TRANSPORT GMBH im Hafen Hamburg, Nordsee, Deutschland

6.4 Kaliwerk Zielitz, Sachsen-Anhalt, Deutschland



Übersicht des Kaliwerkes Zielitz, Sachsen-Anhalt, K+S, mit den Produktionsanlagen über Tage und der kompakten Schüttguthalden für die festen Aufbereitungsrückstände, im Satellitenbild



Teilansicht der Produktionsanlagen über Tage sowie der Verwaltungsgebäude des Kaliwerkes Zielitz, K+S [Foto mit freundlicher Genehmigung von K+S KALI GmbH, Kassel, Deutschland]



Teilansicht der Produktionsanlagen über Tage des Kaliwerkes Zielitz, K+S [Foto mit freundlicher Genehmigung von K+S KALI GmbH, Kassel, Deutschland]

Überblick Kaliwerk Zielitz

Geografische Lage	20 Kilometer nördlich von Magdeburg, nahe der Stadt Wolmirstedt im Landkreis Börde, im Bundesland Sachsen-Anhalt in Deutschland
Produktionseinrichtungen	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze
Historie	1973 Beginn der Kalidüngemittelproduktion in der damaligen DDR 1993 Verbund der K+S GRUPPE
Tatsächliche Produktion	2,1 Millionen Tonnen Kalium-haltige Produkte (2014)
Installierte Produktionskapazität	2,5 Millionen Tonnen Kalium-haltige Produkte (2014)
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Scholle von Calvörde Kalilager Ronnenberg, Leine-Folge, Zechstein, Oberes Perm
Kalirohstoff	Sylvinit
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	17,2 Prozent K_2O im Bergwerksfeld Zielitz 1, 11,5 Prozent K_2O im Bergwerksfeld Zielitz 2
Gewinnbare Vorräte	434,8 Millionen Tonnen Rohsalz
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Gewinnung durch Bohren und Sprengen im Kammerpfeilerbau mit quadratischen Pfeilern
Aufbereitungsverfahren	Flotation, Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation
Kaliprodukte	MOP *standard* und MOP *granular*, Industriekaliprodukte (mehrere Qualitäten), Produkte für die Lebensmittel-, Futtermittel- und pharmazeutische Industrie
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände 2014 Aufhaldung von 9,9 Millionen Tonnen Flüssige Rückstände 2014 Einleitung in Fließgewässer von etwa 0,5 Millionen Kubikmeter (entspricht 0,17 Millionen Tonnen Salzfracht)
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage 76 Hektar Rückstandshalden insgesamt 192 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Transport auf dem Landweg mittels LKW und Eisenbahn zu den lokalen Abnehmern in Deutschland und Europa und für Überseetransporte zu den Kaikais der K+S TRANSPORT GMBH im Hafen Hamburg, Nordsee, Deutschland

6.5 Kaliwerk Neuhof-Ellers, Hessen, Deutschland



Übersicht des Kaliwerkes Neuhof-Ellers, Hessen, K+S, mit den Produktionsanlagen über Tage, der kompakten Schüttguthalde für die festen Aufbereitungsrückstände und den Becken für die Zwischenspeicherung der flüssigen Aufbereitungsrückstände beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, im Satellitenbild



Gesamtansicht der Produktionsanlagen über Tage und der kompakte Schüttguthalde des Kaliwerkes Neuhof-Ellers, K+S, im Luftbild [Foto mit freundlicher Genehmigung von K+S KALI GmbH, Kassel, Deutschland]



Teilansicht der Produktionsanlagen über Tage und der kompakte Schüttguthalde des Kaliwerkes Neuhof-Ellers, K+S [Foto mit freundlicher Genehmigung von K+S KALI GmbH, Kassel, Deutschland]

Überblick Kaliwerk Neuhof-Ellers

Geografische Lage	Westlich der Ortschaft Neuhof im Landkreis Fulda und etwa 15 Kilometer südlich von Fulda im Bundesland Hessen in Deutschland.
Produktionseinrichtungen	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze
Historie	1913 Beginn der Kalidüngemittelproduktion 1926 bis 1947 Stilllegung 1947 Wiederinbetriebnahme der Kalidüngemittelproduktion 1974 Inbetriebnahme der weltweit ersten in Neuhof entwickelten ESTA®-Anlage
Tatsächliche Produktion	1,25 Millionen Tonnen Kalium- und Magnesium-haltige Produkte (2014)
Installierte Produktionskapazität	0,6 Millionen Tonnen KCl (2014)
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Werra-Fulda Becken Kalilager Thüringen und Hessen, sowie sog. Begleitflöz, Werra-Folge, Zechstein, Oberes Perm
Kalirohstoff	Hartsalz und untergeordnet Carnallitit
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	10 – 11 Prozent K_2O, 20 Prozent $MgSO_4$
Gewinnbare Vorräte	100,8 Millionen Tonnen Rohsalz, entspricht 16,3 Millionen Tonnen KCl und 20 Millionen Tonnen Kieserit
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Gewinnung durch Bohren und Sprengen im Kammerpfeilerbau mit quadratischen Pfeilern
Aufbereitungsverfahren	Flotation, ESTA®
Kaliprodukte	MOP, Kieserit, Kornkali, Magnesia-Kainit
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände 2014 Aufhaldung von etwa 2,4 Millionen Tonnen Flüssige Rückstände 2014 Einleitung in Fließgewässer von 0,65 Millionen Kubikmeter (entspricht 0,2 Millionen Tonnen Salzfracht)
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage 22 Hektar Rückstandshalde 83 Hektar Rückstandsbecken 2 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Transport auf dem Landweg mittels LKW und Eisenbahn zu den lokalen Abnehmern in Deutschland und Europa und für Überseetransporte zu den Kalikais der K+S TRANSPORT GMBH im Hafen Hamburg, Nordsee, Deutschland

6.6 Kaliwerk Sigmundshall, Niedersachsen, Deutschland



Übersicht des Kaliwerkes Sigmundshall, Niedersachsen, K+S, mit den Produktionsanlagen über Tage und der kompakten Schüttguthalde für die festen Aufbereitungsrückstände, im Satellitenbild



Gesamtansicht der Produktionsanlagen über Tage und der kompakte Schüttguthalde für die festen Aufbereitungsrückstände des Kaliwerkes Sigmundshall, K+S, im Luftbild [Foto mit freundlicher Genehmigung von K+S KALI GmbH, Kassel, Deutschland]



Teilansicht der Produktionsanlagen über Tage des Kaliwerkes Sigmundshall, K+S [Foto mit freundlicher Genehmigung von K+S KALI GmbH, Kassel, Deutschland]

Überblick Kaliwerk Sigmundshall

Geografische Lage	25 Kilometer nordwestlich von Hannover, etwa 5 Kilometer südlich vom Steinhuder Meer bei Wunstorf, Region Hannover im Bundesland Niedersachsen in Deutschland
Produktionseinrichtungen	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze
Historie	1906 Beginn der Kalidüngemittelproduktion 1930 bis 1948 Stilllegung der Kalidüngemittelproduktion 1949 Wiederaufnahme der Kalidüngemittelproduktion 2001 Beginn der Kieseritproduktion
Tatsächliche Produktion	0,7 Millionen Tonnen Kalium- und Magnesium-haltige Produkte (2014)
Installierte Produktionskapazität	0,75 Millionen Tonnen Kalium-- und Magnesium-haltige Produkte (2014)
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Norddeutsches Becken – Salzstock Bokeloh Kalilager Staßfurt, Staßfurt-Folge und Kalilager Ronnenberg, Leine-Folge, Zechstein, Oberes Perm
Kalirohstoff	Sylvinit und Hartsalz
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	Sylvinit mit 13 Prozent K_2O, Hartsalz mit 10 Prozent K_2O und 26 Prozent MgO
Gewinnbare Vorräte	26,3 Millionen Tonnen Rohsalz, entspricht 4,6 Millionen Tonnen KCl und 4,0 Millionen Tonnen Kieserit
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Gewinnung durch Bohren und Sprengen im Weitungsbau mit Versatz
Aufbereitungsverfahren	Flotation, Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation, ESTA®
Kaliprodukte	MOP, ESTA®-Kieserit, MONTANAL[17] und Industriekali
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände 2014 Aufhaldung von etwa 1,36 Millionen Tonnen Trockenversatz von etwa 0,34 Millionen Tonnen Flüssige Rückstände 2014 Einleitung in Fließgewässer von 0,5 Millionen Kubikmeter (entspricht 0,15 Millionen Tonnen Salzfracht
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage 16 Hektar Rückstandshalde 50 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Transport auf dem Landweg mittels LKW und Eisenbahn zu den lokalen Abnehmern in Deutschland und Europa und für Überseetransporte zu den Kalikais der K+S TRANSPORT GMBH im Hafen Hamburg, Nordsee, Deutschland

17 MONTANAL besteht aus 29% KCl uns 68% NaCl und wird überwiegend als Abdecksalz bei der Aluminiumproduktion aus aluminiumhaltigem Schrott eingesetzt.



7 ICL FERTILIZERS, ISRAEL, SPANIEN UND GROSSBRITANNIEN

ICL FERTILIZERS (ICL) gehört zur ISRAEL CHEMICALS LTD. GROUP, ein weltweit agierendes Unternehmen, welches neben Düngemitteln auch eine Vielzahl von Grundstoffen für die chemische Industrie herstellt. ISRAEL CHEMICALS LTD. GROUP ist ein börsennotiertes Unternehmen, das an den Finanzhandelsplätzen in Tel Aviv (TASE:ICL) und in New York (NYSE:ICL) gehandelt wird.

Das Kalidüngemittelgeschäft nimmt einen Anteil von etwa 30 Prozent am Gesamtumsatz von ICL ein. Im Jahre 2013 produzierte ICL etwa 5,1 Millionen Tonnen MOP und war damit der sechsgrößte Kalidüngemittelproduzent der Welt. Nach der heute installierten Produktionskapazität rangiert ICL auf Platz 6 der weltgrößten Kalidüngemittelproduzenten. Mehr als 80 Prozent der produzierten Kalidüngemittel werden im Ausland vertrieben; die Hauptabnehmer sind Brasilien, China und Indien.

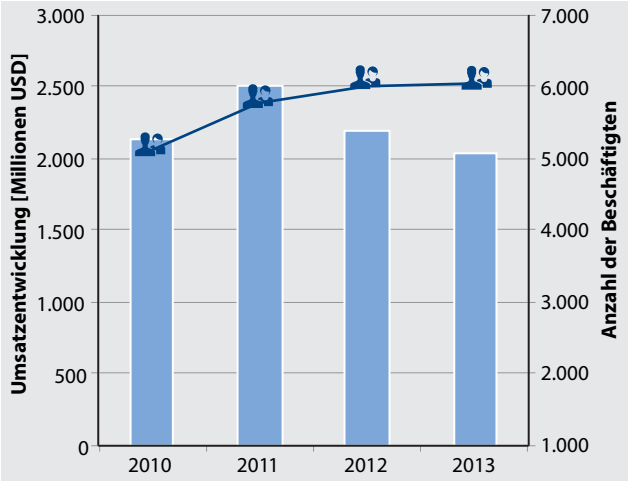
ICL betreibt seine Kalidüngemittelproduktion an 3 Standorten im Toten Meer in Israel mit DEAD SEA S.A., LTD. (DSW), in Katalonien in Spanien mit ICL IBERIA SÚRIA & SALLENT S.A. (ICL IBERIA S & S) und in Borough Redcar and Cleveland in Großbritannien mit CLEVELAND POTASH LTD. (CPL). Am Toten Meer in Israel werden natürliche Lösungen als Kalirohstoffe gewonnen. ICL betreibt auf seinen Kalibergwerken in Spanien in Teufen zwischen 450 und 900 Meter und Großbritannien in Teufen zwischen 1.200 und 1.500 Meter Bergmännischen Abbau von Sylvinit in Schneidender Gewinnung . In den drei Aufbereitungsanlagen in Spanien und Großbritannien werden die sylvinitischen Rohsalze hauptsächlich durch Flotation aufbereitet. Die wertstoffarmen natürlichen Lösungen aus dem Toten Meer werden zunächst durch solare Evaporation und natürliche Kristallisation, folgend mittels Flotation, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation zu verkaufsfähigen Kalidüngemitteln aufbereitet.

ICL IBERIA plant zusätzlich zu einer bereits kurz vor Vollendung stehenden Modernisierung im Kaliwerk Súria künftig weitere Kapazitätserhöhung auf 1,1 Millionen Tonnen MOP pro Jahr. CLEVELAND POTASH beabsichtigt die Produktion von *Polysulphate*-Produkten auf 0,6 Millionen Tonnen zu erweitern.

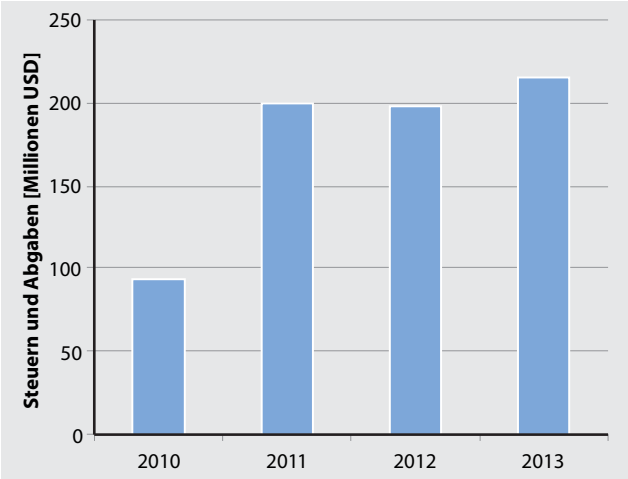
7.1 Meilensteine der Kalidüngemittelproduktions- und Unternehmensgeschichte

1930	Gründung der PALESTINE POTASH COMPANY LTD. und Errichtung der ersten Produktionsanlage am Nordufer des Toten Meeres in Kalia Beginn der Kalidüngemittelproduktion
1934	Bau einer weiteren Produktionsanlage am südlichen Ufer des Toten Meeres, im Bereich Sdom
1951	Gründung von DEAD SEA WORKS LTD. (DSW) als staatliches Unternehmen
1980	DSW beginnt mit dem Bau von Anlagen zur kalten Kristallisation
1994	DSW Baubeginn eines Kraftwerks
1998	ICL FERTILIZERS erwirbt den spanischen Kaliproduzenten und gründet daraus IBERPOTASH S.A.
1999	Die OFER GROUP kauft die ISRAEL CORPORATION, welche ICL kontrolliert
2001	DSW und ROTEM AMFERT NEGEV fusionieren zu ICL FERTILIZERS
2002	ICL FERTILIZERS erwirbt das Kaliwerk Boulby in Großbritannien und gründet CLEVELAND POTASH LTD.
2014	Umfirmierung der früheren IBERPOTASH S.A. in die ICL IBERIA SÚRIA & SALLENT S.A.

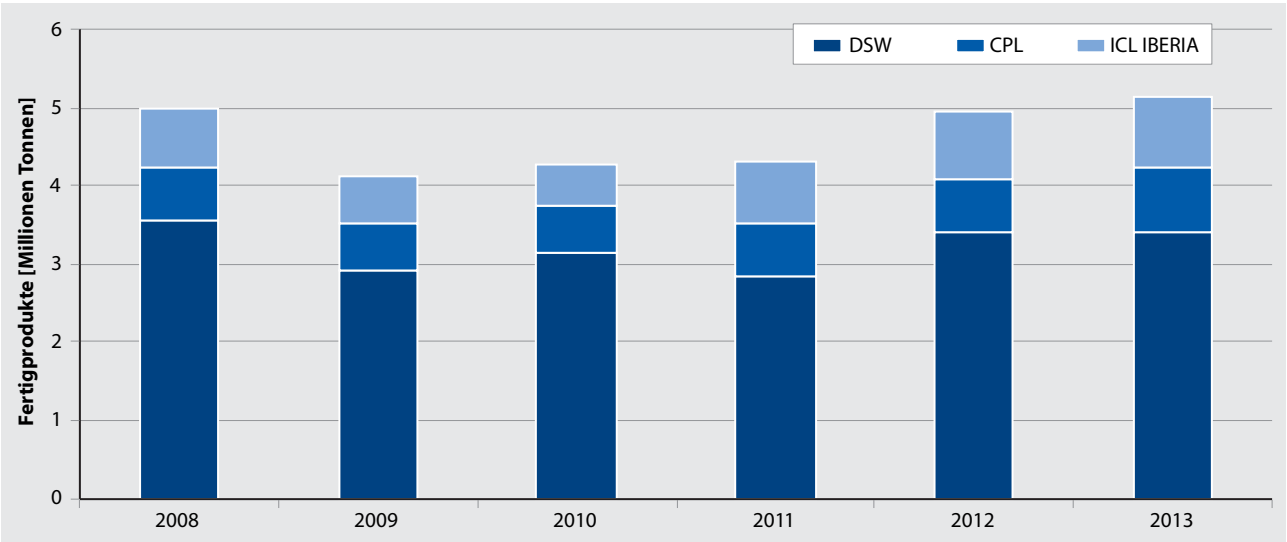
7.2 Betriebs- und volkswirtschaftliche Kennziffern für das Geschäftsfeld Kalidüngemittelproduktion im Konzern ISRAEL CHEMICAL LTD.



Umsatzentwicklung und Anzahl der Beschäftigten in der Kalidüngemittelproduktion von ICL im Zeitraum von 2010 bis 2013



Entwicklung der Steuern und Abgaben auf Erträge aus der Kalidüngemittelproduktion von ICL im Zeitraum 2010 bis 2013



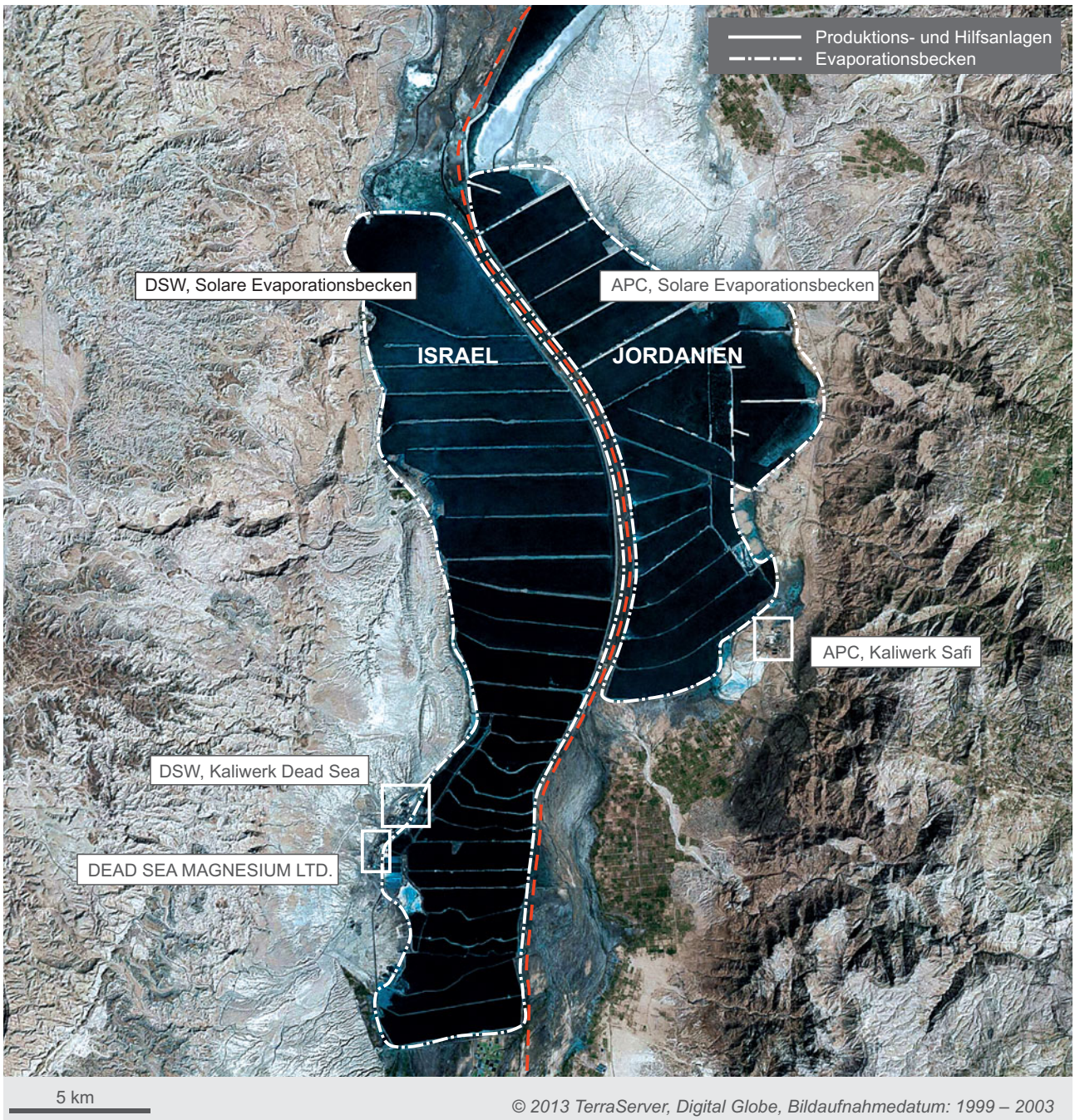
Entwicklung der Kalidüngemittelproduktion in den Kaliwerken von ICL im Zeitraum von 2008 bis 2013

7.3 Kaliwerk Dead Sea von DEAD SEA WORKS, Südbezirk, Israel



Übersicht des Kaliwerkes Dead Sea, Israel, DSW sowie des Werkes DEAD SEA MAGNESIUM LTD.[18], ICL, welches Nebenprodukte von DEAD SEA WORKS verwertet, mit den Produktionsanlagen sowie Teilen der Becken für die solare Evaporation der wertstoffarmen natürlichen Lösungen, im Satellitenbild

18 DEAD SEA MAGNESIUM LTD. (DSM): DSW liefert DSM Magnesiumchlorid-Lösungen zur Herstellung von Magnesium-Metall und Magnesium-Legierungen.



Flächeninanspruchnahme für den Betrieb der Becken zur solaren Evaporation der wertsfoffarmen natürlichen Lösungen Evaporationsbecken von DSW, Israel und APC, Jordanien, am Südrand des Toten Meeres, im Satellitenbild



Teilansicht der Produktionsanlagen des Kaliwerkes Dead Sea, DSW [Foto mit freundlicher Genehmigung von Josef Carrach, Be'er Sheva, Israel]



Pumpstation zum Transport der werstoffarmen natürlichen Lösungen aus dem Toten Meer in die Becken zur solaren Evaporation des Kaliwerkes Dead Sea, DSW [Foto mit freundlicher Genehmigung von Josef Carrach, Be'er Sheva, Israel]

Überblick Kaliwerk Dead Sea

Geografische Lage	Südlich des Toten Meeres, etwa 60 Kilometer südlich von Jerusalem, im sogenannten Südbezirk in Israel
Produktionseinrichtungen	Anlagen zur Gewinnung natürlicher Lösungen und Anlagen zur Aufbereitung natürlicher Lösungen
Historie	1930 Beginn der Kalidüngemittelproduktion unter PALESTINE POTASH COMPANY LTD. 1948 Okkupation und Zerstörung der nördlichen Produktionsanlagen durch arabische Legion der jordanischen Streitkräfte 1951 Verstaatlichung des Unternehmens 1953 Umbenennung in DEAD SEA WORKS
Tatsächliche Produktion	3,39 Millionen Tonnen MOP (2013)
Installierte Produktionskapazität	4,10 Millionen Tonnen MOP pro Jahr (2014)
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Totes Meer
Kalirohstoff	Kalium-haltige Lösungen im Oberflächengewässer
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der gewonnenen Kalirohstoffe	0,7 Prozent K_2O
Gewinnbare Vorräte	150 bis 170 Millionen Kubikmeter pro Jahr an Lösungen aus dem Toten Meer, limitiert durch staatlich genehmigte Abpumpraten
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Gewinnung natürlicher Lösungen aus dem Toten Meer
Aufbereitungsverfahren	Solare Evaporation und natürliche Kristallisation, Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation, Flotation
Kaliprodukte	MOP *standard* und MOP *granular*, Industriekali
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände: Rückführung in das Tote Meer, etwa 8,8 Tonnen pro Tonne Produkt Flüssige Rückstände: Rückführung in das Tote Meer
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage: 150 Hektar Becken für die solare Evaporation: >15.000 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Mittels Transportband etwa 20 Kilometer durch die Negev zur nächsten Bahnverladung Mittels LKW zu den Häfen von Ashdot, Mittelmeer, Israel und Eilat, Rotes Meer, Israel

7.4 Kaliwerke und Kalibergwerke von ICL IBERIA S & S, Katalonien, Spanien



Übersicht des Kalibergwerkes Cabanasas, Katalonien, Spanien, ICL IBERIA S & S, mit Tagesschächten und Nebenanlagen über Tage sowie der mit den Produktionsanlagen über Tage sowie der kompakten Schüttguthalde für die festen Aufbereitungsrückstände und den Becken für die Klärung sowie Speicherung der flüssigen Aufbereitungsrückstände beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, im Satellitenbild



Übersicht des Kaliwerkes Súria, Katalonien, Spanien, ICL IBERIA S & S, mit den Produktionsanlagen über Tage sowie der kompakten Schüttguthalde für die festen Aufbereitungsrückstände und den Becken für die Klärung sowie Speicherung der flüssigen Aufbereitungsrückstände beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, im Satellitenbild



Übersicht des Kalibergwerkes Villafruns, Katalonien, Spanien, ICL IBERIA S & S, mit den Produktionsanlagen über Tage sowie der kompakten Schüttguthalde für die festen Aufbereitungsrückstände und den Becken für die Klärung sowie Speicherung der flüssigen Aufbereitungsrückstände beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, im Satellitenbild



© 2013 TerraServer, Digital Globe, Bildaufnahmedatum: 13.09.2011

Übersicht der Aufbereitungsanlage Sallent, Katalonien, Spanien, ICL IBERIA S & S , mit den Produktionsanlagen über Tage sowie der kompakten Schüttguthalden für die festen Aufbereitungsrückstände und den Becken für die Klärung sowie Speicherung der flüssigen Aufbereitungsrückstände beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, im Satellitenbild



Gesamtansicht der Produktionsanlagen über Tage sowie der Kompakthalde für die festen Aufbereitungsrückstände und den Becken für die Zwischenspeicherung der aufgrund von Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, Kalibergwerk Cabanasas, ICL IBERIA S & S



Tagesschacht Balsareny, Nebenanlagen und ehemalige kompakte Schüttguthalde für die festen Aufbereitungsrückstände und den Becken für die Zwischenspeicherung der flüssigen Aufbereitungsrückstände beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen des Kalibergwerkes Villafruns, ICL IBERIA S & S, im Luftbild



Gesamtansicht des Kaliwerkes Sallent, ICL IBERIA S & S, mit Produktionsanlagen über Tage, Produktspeicher und kompakte Schüttguthalden (Hintergrund) , im Luftbild



Teilansicht des Kaliwerkes Súria, ICL IBERIA S & S, mit Produktionsanlagen über Tage, Aufbereitungsgebäuden, Produktspeicher, kompakter Schüttguthalden (Hintergrund) und Baumaßnahmen zum PHOENIX-Plan (Vordergrund links), im Luftbild

Überblick Kaliwerke und Kalibergwerke von ICL IBERIA S & S

Geografische Lage	Nahe der Städte Súria und Sallent in der Provinz Barcelona, in Katalonien, in Nordspanien
Produktionseinrichtungen	Bergwerke Súria, Cabanasas und Villafruns[19] und Aufbereitungsanlagen für feste Kalirohsalze in Súria und Sallent
Historie	1925 Beginn der Kalidüngemittelproduktion in Súria 1929 Beginn der Kalidüngemittelproduktion in Sallent durch POTASAS IBÉRICAS, S.A. 1948 Beginn der Förderung von Kalirohsalzen im Kalibergwerk Cabanasas 1972 Beginn der Förderung von Kalirohsalzen im Kalibergwerk Villafruns (Balsareny) durch POTASAS DE LLOBREGAT (ERT) 1982 Verstaatlichung von MPS und Umbenennung zu SÚRIA K (INI) 1991 Erwerb von POTASAS DEL LLOBREGAT durch INI und Vereinigung mit dem Kalibergwerk Súria zu IBERPOTASH S.A. 2014 Umfirmierung der früheren IBERPOTASH S.A. in die ICL IBERIA SÚRIA & SALLENT
Tatsächliche Produktion	0,91 Millionen Tonnen MOP (2013)
Installierte Produktionskapazität	1,00 Millionen Tonnen MOP pro Jahr (2014)
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Navarra Katalonisches Becken *Capa* A und B, *Cardona Formation*, Mittleres Tertiär
Kalirohstoff	Sylvinit
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	16 – 18 Prozent K_2O
Gewinnbare Vorräte	Für 100 Jahre Produktion
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Schneidende Gewinnung im Langkammerpfeilerbau
Aufbereitungsverfahren	Flotation
Kaliprodukte	MOP *standard* und MOP *granular*
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände: Aufhaldung von etwa 2,2 Millionen Tonnen pro Jahr; Einleitung aufgelöster fester Rückstände durch eine Rohrleitung in das ca. 100 Kilometer entfernte Mittelmeer Flüssige Rückstände: Einleitung durch eine Rohrleitung in das Mittelmeer
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage: insgesamt 35 Hektar Rückstandshalden: insgesamt 100 Hektar Rückstandsbecken: 2 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Mittels Eisenbahn zum Hafen von Barcelona (Mittelmeer), Spanien

19 2011 teilte ICL mit, dass die Produktion am Standort Súria ausgebaut und aufgrund der höheren Kosten am Standort Sallent geschlossen werden soll.

7.5 Kaliwerk Boulby von CLEVELAND POTASH, Borough of Redcar and Cleveland, Großbritannien



Übersicht des Kaliwerkes Boulby, Borough Redcar und Cleveland, Großbritannien, CLEVELAND POTASH, mit den Produktionsanlagen über Tage, im Satellitenbild



Gesamtansicht der Produktionsanlagen über Tage des Kaliwerkes Boulby, CLEVELAND POTASH, im Luftbild



Teilansicht der Produktspeicher und Verladeeinrichtungen des Kaliwerkes Boulby, CLEVELAND POTASH, im Luftbild

Überblick Kaliwerk Boulby

Geografische Lage	30 Kilometer südlich von Teesport an der Nordseeküste der *North York Moors*, im *Borough of Redcar and Cleveland* in Nordostengland		
Produktionseinrichtungen	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze		
Historie	1969	Baubeginn des Kaliwerkes Boulby unter IMPERIAL CHEMICAL INDUSTRIES (ICI)	
	1973	Beginn der Förderung von Kalirohsalzen	
	1977	Beginn der Produktion von Kalidüngemitteln	
	2002	Erwerb des Kaliwerkes Boulby durch ICL und Gründung von CLEVELAND POTASH	
	2011	Beginn der Förderung von Polyhalit und Produktion von *Polysulphate*™[20]	
Tatsächliche Produktion	0,70 Millionen Tonnen MOP 0,13 Millionen Tonnen *Polysulphate*™ (2013)		
Installierte Produktionskapazität	1,00 Million Tonnen MOP pro Jahr (2014)		
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Zechstein Becken *Boulby Potash Bed, Teeside Group*, Zechstein, Oberes Perm		
Kalirohstoff	Sylvinit, Polyhalit		
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	24 Prozent K_2O		
Gewinnbare Vorräte	Sylvinitvorräte für weitere 25 Jahre Produktion		
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Schneidende Gewinnung im Langkammerpfeilerbau		
Aufbereitungsverfahren	Hauptsächlich Flotation und für kleinere Rohsalzanteile beziehungsweise für Teilmengen von Flotationsrückständen auch Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation		
Kaliprodukte	MOP *standard* und MOP *granular*, *Polysulphate*™		
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände	Einleitung des größten Anteils der festen Aufbereitungsrückstände als Suspension in die Nordsee von etwa 0,7 Millionen Tonnen pro Jahr Dickstoffversatz der unlöslichen Bestandteile von etwa 0,2 Millionen Tonnen pro Jahr	
	Flüssige Rückstände	Einleitung in die etwa 1 Kilometer entfernte Nordsee	
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage		24 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Transport mittels LKW ist limitiert auf 150.000 Tonnen pro Jahr (wegen Naturschutzgebiet) Transport mittels Eisenbahn zum Hafen in der Teesside Area, Nordsee		

20 Polysulphate ist ein Mineraldünger mit folgenden Bestandteilen: 48% SO_3, 14% K_2O 6% MgO und 17% CaO



8 ARAB POTASH COMPANY, JORDANIEN

ARAB POTASH COMPANY PLC. (APC) wurde 1956 gegründet und produziert hauptsächlich Kalidüngemittel und diese ausschließlich am Toten Meer in Jordanien.

APC ist ein börsennotiertes Unternehmen, das am Finanzhandelsplatz in Amman (ASE:APOT) gehandelt wird.

Im Jahre 2013 produzierte APC etwa 1,7 Millionen Tonnen MOP.

Die Hauptabsatzmärkte von APC liegen, begünstigt durch die geografische Lokation des Überseehafens Aqaba, am Roten Meer gelegen, hauptsächlich in Asien. Etwa 80 Prozent der Produktion werden vornehmlich nach Indien, China, Malaysia, Indonesien und Thailand exportiert.

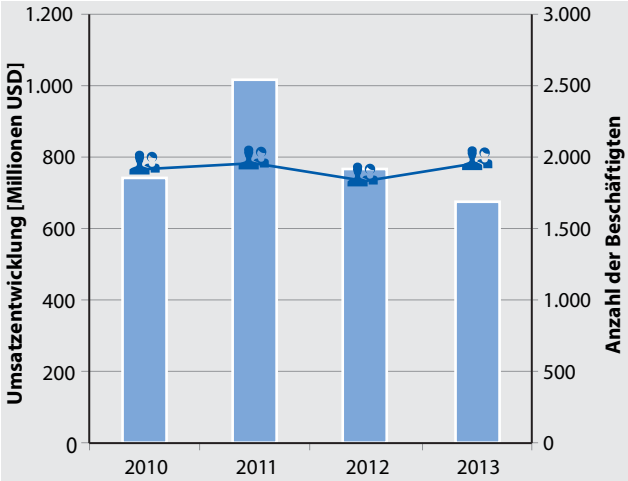
APC nutzt wertstoffarme natürliche Lösungen aus dem Toten Meer als Rohstoffgrundlage. Diese natürlichen Lösungen werden zunächst durch solare Evaporation und natürliche Kristallisation, folgend mittels Flotation, Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation zu verkaufsfähigen Kalidüngemitteln aufbereitet.

APC plant eine Erhöhung seiner Kapazität auf insgesamt 3,20 Millionen Tonnen pro Jahr. In einem ersten Schritt sollen Engstellen in der Heißverlösungsanlage beseitigt und die Kapazität somit um 0,3 Millionen Tonnen erhöht werden.

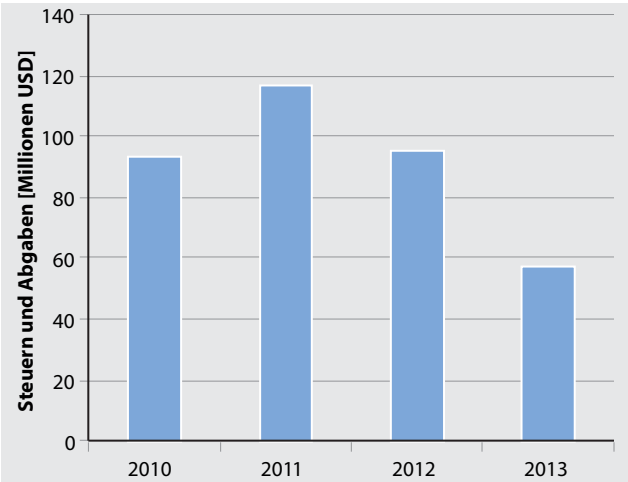
8.2 Meilensteine der Kalidüngemittelproduktions- und Unternehmensgeschichte

1956	Gründung des Unternehmens als panarabisches *joint venture* zur Gewinnung von Kalisalzen aus dem Toten Meer, Anfänge zur Projektumsetzung
1976	Erste Testversuche zur Verarbeitung
1979	Baubeginn der Gewinnungs- und Aufbereitungsanlagen
1983	Beginn der Kalidüngemittelproduktion mit einer Kapazität von 1,2 Millionen Tonnen MOP
1994	Inbetriebnahme einer zweiten Verarbeitungsanlage und Erweiterung der Kapazität auf 1,8 Millionen Tonnen MOP
2003	PCS erwirbt 26 Prozent der Anteile an APC und ist heute mit 28 Prozent Beteiligung der größte Anteilsnehmer, zweitgrößter Anteilsnehmer ist der jordanische Staat mit 27 Prozent
2011	Inbetriebnahme einer zweiten Kristallisationsanlage

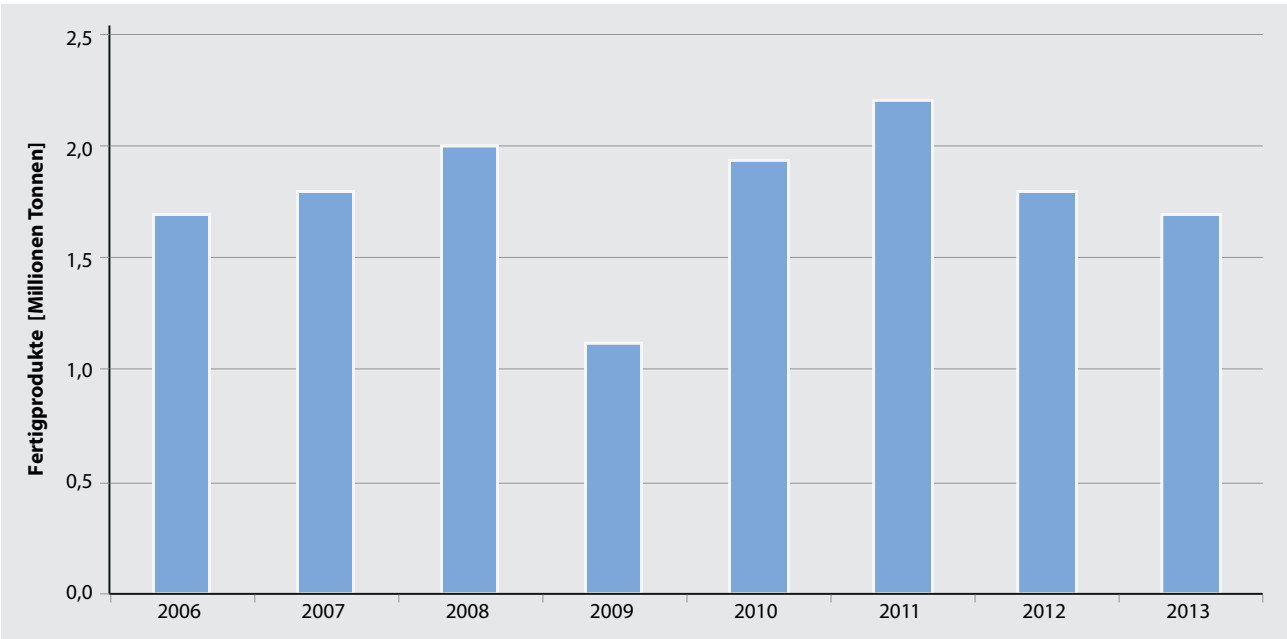
8.1 Betriebs- und volkswirtschaftliche Kennziffern des Unternehmens Arab Potash Company



Umsatzentwicklung und Anzahl der Beschäftigten von APC im Zeitraum von 2010 bis 2013



Entwicklung der Steuern und Abgaben auf Erträge aus der Kalidüngemittelproduktion von APC im Zeitraum von 2010 bis 2013



Entwicklung der Kalidüngemittelproduktion von APC im Zeitraum von 2006 bis 2013

8.3 Kaliwerk Safi, Gouvernement al-Karak, Jordanien



Übersicht des Kaliwerkes Safi, Jordanien, APC, mit den Produktionsanlagen sowie Teilen der Becken für die solare Evaporation der wertstoffarmen natürlichen Lösungen, im Satellitenbild



Teilansicht der Produktionsanlagen des Kaliwerkes Safi, APC [Foto mit freundlicher Genehmigung von Sue Hutton, Loughborough, Großbritannien]



Teilansicht der Verarbeitungsanlagen des Kaliwerkes Safi, APC

Überblick Kaliwerk Safi[21]

Geografische Lage	Südliches Ende des Toten Meeres, 200 Kilometer nördlich vom Hafen Aqaba und 100 Kilometer südlich von Amman, im Gouvernement al-Karak in Jordanien	
Produktionseinrichtungen	Anlagen zur Gewinnung natürlicher Lösungen und Aufbereitungsanlage für natürliche Lösungen	
Tatsächliche Produktion	1,70 Millionen Tonnen MOP (2013)	
Installierte Produktionskapazität	2,45 Millionen Tonnen MOP (2014)	
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Totes Meer Natürliche Lösungen	
Kalirohstoff	Kalium-haltige Lösungen im Oberflächengewässer	
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der gewonnenen Kalirohstoffe	0,7 Prozent K_2O	
Gewinnbare Vorräte	100 bis 110 Millionen Kubikmeter pro Jahr an Lösungen aus dem Toten Meer, Konzession des Jordanischen Staates zur Gewinnung und Aufbereitung der Lösungen aus dem Toten Meer bis 2058	
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Gewinnung von natürlichen Lösungen aus dem Toten Meer	
Aufbereitungsverfahren	Solare Evaporation und natürliche Kristallisation, Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation, Flotation	
Kaliprodukte	> 90 Prozent MOP *standard*, 7 Prozent MOP *granular* und 2 Prozent Industriekali	
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände	Rückführung in das Tote Meer, etwa 8,8 Tonnen pro Tonne Produkt
	Flüssige Rückstände	Rückführung in das Tote Meer, etwa 1,6 Tonnen pro Tonne Produkt
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage	80 Hektar
	Becken für die solare Evaporation	11.000 Hektar
	Rückstandshalde	200 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Transport mittels LKW von etwa 77 Prozent der Produkte zum Hafen nach Aqaba, Rotes Meer Transport der übrigen Produkte auf der Straße zu den lokalen Abnehmern	

21 Da das Kaliwerk Safi in Jordanien der einzige Produktionsstandort für Kalidüngemittel von APC ist, wird auf eine gesonderte Tabelle zur Historie des Werkes verzichtet



9 AGRIUM, KANADA

AGRIUM INC. (AGRIUM) ist ein Düngemittelproduzent, der neben Kalidüngemitteln vor allem stickstoff-, phosphat- und schwefelhaltige Dünger in Saskatchewan, Kanada, in Idaho, USA, in Argentinien und in Ägypten hergestellt.

AGRIUM ist ein börsennotiertes Unternehmen, das an den Finanzhandelsplätzen in Toronto (TSX:AGU) und New York (NYSE:AGU) gehandelt wird.

Das Kalidüngemittelgeschäft nimmt einen Anteil von nur 5 Prozent am Gesamtumsatz ein.

Im Jahre 2013 produzierte AGRIUM etwa 1,7 Millionen Tonnen MOP.

Etwa 50 Prozent der Produkte werden in Nordamerika verkauft.

Für die Produktion von Kalidüngemitteln werden an einem Standort in Saskatchewan, Kanada, sylvinitische Rohsalze in Teufen zwischen 1.000 und 1.100 Metern sylvinitische Kalirohsalze in Bergmännischer, Schneidender Gewinnung abgebaut.

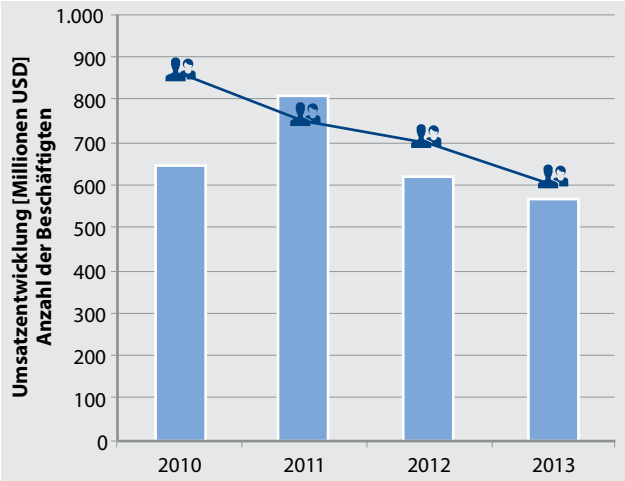
An diesem Standort werden die sylvinitischen Kalirohsalze durch Flotation zu verkaufsfähigen Kalidüngemitteln verarbeitet.

Durch Expansion des Kaliwerkes Vanscoy soll eine voraussichtliche Steigerung der Kapazität um 50 Prozent auf 3 Millionen Tonnen pro Jahr erfolgen. Das bedeutet eine zusätzliche jährliche Produktionskapazität von einer Million Tonnen. Der erste Abschnitt zur Realisierung des Projekts wurde in der zweiten Hälfte des Jahres 2014 abgeschlossen. Die Erreichung der endgültigen Kapazität ist für 2017 geplant.

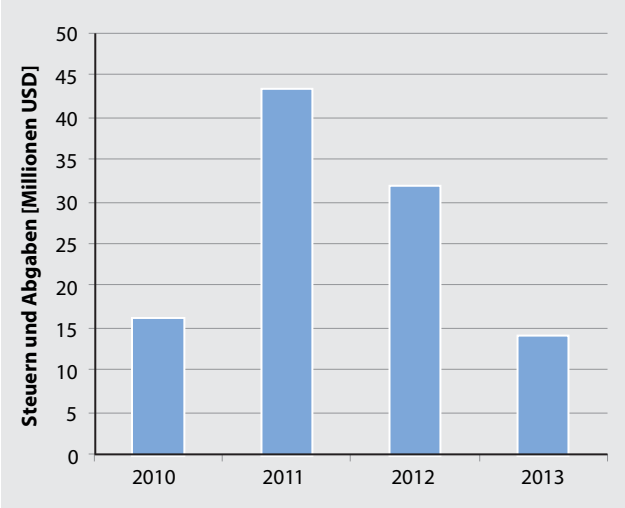
9.1 Meilensteine der Kalidüngemittelproduktions- und Unternehmensgeschichte

1931	Gründung von COMINCO FERTILIZERS LTD. (COMINCO), dem Vorläufer des heutigen Unternehmens AGRIUM
1969	Beginn der Kalidüngemittelproduktion im Kaliwerk Vanscoy
1995	Umbenennung von COMINCO in AGRIUM INC.
1996	AGRIUM geht an die New Yorker Börse
2009	AGRIUM INC. bündelt alle Aktivitäten in Nordamerika unter CROP PRODUCTION SERVICES (CPS)
2014	Erster Schritt der Kapazitätserweiterungen des Kaliwerkes Vanscoy sind abgeschlossen

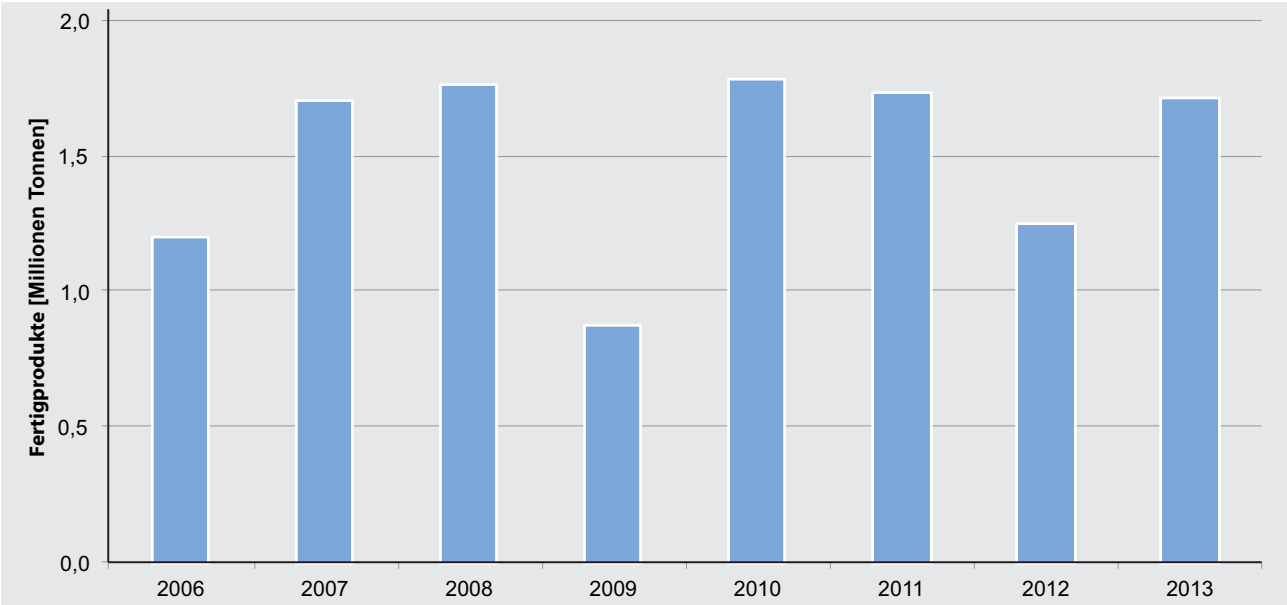
9.2 Betriebs- und volkswirtschaftliche Kennziffern für das Geschäftsfeld Kalidüngemittelprodukte im Konzern AGRIUM



Umsatzentwicklung und Anzahl der Beschäftigten in der Kalidüngemittelproduktion von AGRIUM im Zeitraum von 2010 bis 2013



Entwicklung der Steuern und Abgaben auf Erträge aus der Kalidüngemittelproduktion von AGRIUM im Zeitraum von 2010 bis 2013



Entwicklung der Kalidüngemittelproduktion im Kaliwerk Vanscoy von AGRIUM im Zeitraum von 2006 bis 2013

9.3 Kaliwerk Vanscoy, Saskatchewan, Kanada



Übersicht des Kaliwerkes Vanscoy, AGRIUM, mit den Produktionsanlagen über Tage, der Spülhalde für die festen Aufbereitungsrückstände und den Becken für die Klärung sowie Speicherung der Transportlösungen beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, im Satellitenbild



Gesamtansicht der Produktionsanlagen über Tage des Kaliwerkes Vanscoy, AGRIUM, im Luftbild



Teilansicht der Spülhalde für die festen Aufbereitungsrückstände und der Becken für die Klärung und Speicherung der Transportlösungen beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen des Kaliwerkes Vanscoy, AGRIUM, im Luftbild

Überblick Kaliwerk Vanscoy[22]

Geografische Lage	30 Kilometer südwestlich von Saskatoon, in der Provinz Saskatchewan in Kanada	
Produktionseinrichtungen	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	
Installierte Produktionskapazität	2,25 Millionen Tonnen MOP pro Jahr (2014)	
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Westkanadisches Becken *Patience Lake Member, Prairie Evaporite Formation, Elk Point Group*, Givet, Mittleres Devon	
Kalirohstoff	Sylvinit	
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	24 Prozent K_2O	
Gewinnbare Vorräte	*Proven reserves*	65,8 Millionen Tonnen (entspricht 46 Jahre Produktion)
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Schneidende Gewinnung im Langkammerpfeilerbau	
Aufbereitungsverfahren	Hauptsächlich Flotation und für kleinere Rohsalzanteile beziehungsweise für Teilmengen von Flotationsrückständen auch Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation	
Kaliprodukte	MOP *standard* und MOP *granular*	
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände	Aufhaldung von etwa 90 Prozent der festen Rückstände Versenkung aufgelöster fester Aufbereitungsrückstände durch Bohrungen in 1.675 Metern Teufe in den geologischen Untergrund (*Deadwood-Winnipeg Formation*), etwa 0,6 Millionen Tonnen pro Jahr
	Flüssige Rückstände	Versenkung in den geologischen Untergrund
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage	100 Hektar
	Rückstandshalde	370 Hektar
	Rückstandsbecken	160 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Ein Großteil der Produkte wird auf dem Landweg mittels Eisenbahn zu den lokalen Abnehmern in den USA transportiert; Land- und Überseetransporte durch die Vermarktungsfirma CANPOTEX; Transport auf dem Landweg mittels Eisenbahn mit CANADIAN PAZIFIC (CP) oder CANADIAN NATIONAL RAILWAYS (CN) zu den etwa 1.500 Kilometer entfernten Pazifikhäfen Vancouver, British Columbia, Kanada, oder Portland, Oregon, USA	

22 Da das Kaliwerk Vanscoy in Saskatchewan der einzige Produktionsstandort für Kalidüngemittel von AGRIUM ist, wird auf eine gesonderte Tabelle zur Historie des Werkes verzichtet.



10 SOCIEDAD QUÍMICA Y MINERA, CHILE

SOCIEDAD QUÍMICA Y MINERA DE CHILE S.A. (SQM) produziert ausschließlich in Chile auf der Grundlage von Mineralsalzen neben Düngemitteln auch Grundstoffe für die chemische Industrie. SQM ist ein börsennotiertes Unternehmen, das am Finanzhandelsplatz in Santiago de Chile (IPSA:SQM) gehandelt wird. Das Kalidüngemittelgeschäft nimmt einen Anteil von mehr als 50 Prozent am Gesamtumsatz ein.

SQM produziert sowohl MOP als auch SOP in separaten Aufbereitungsanlagen. Als Rohstoffbasis dienen wertstoffarme natürliche Lösungen aus dem Salar de Atacama, Nordchile. Als zusätzliche Rohstoffquelle verwertet SQM – gemessen an der Gesamtwertstoffbilanz jedoch nur in den geringe Mengen – KCl-reiche Rückstände aus der der Lithiumproduktion des Unternehmens SOCIEDAD CHILENA DE LITHIO (SCL).

Die wertstoffarmen natürlichen Lösungen werden zunächst durch solare Evaporation und natürliche Kristallisation sowie in der Folge mittels Flotation und Umsetzungsprozessen zu Kalidüngemitteln verarbeitet.

Im Jahre 2013 produzierte SQM etwa 1,9 Millionen Tonnen MOP und SOP. Mehr als 70 Prozent der Kalidüngemittelproduktion wird exportiert, vornehmlich nach Latein- und Südamerika, aber auch nach Belgien, Frankreich und China.

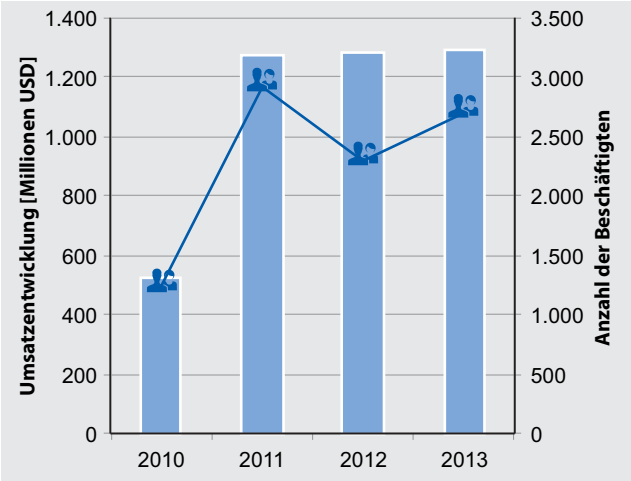
SQM produziert sowohl MOP als auch SOP in separaten Anlagen aus natürlichen Lösungen aus dem Salar de Atacama in Nordchile. Weiterhin bekommt SQM von SOCIEDAD CHILENA DE LITHIO (SCL), einem Lithiumhersteller, KCl-reiche Rückstände der Lithiumproduktion zur Verwertung geliefert.

Aus den natürlichen Lösungen werden zunächst mittels Evaporation Kristallisate als Zwischenprodukte erzeugt, die dann flotativ zu Kalidüngemitteln weiterverarbeitet werden. Die Produktion von MOP wurde gegenüber der Produktion von SOP in den letzten Jahren forciert.

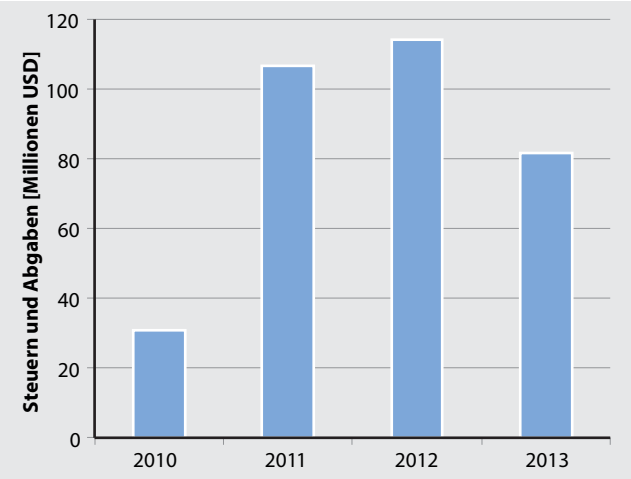
10.1 Meilensteine der Kalidüngemittelproduktions- und Unternehmensgeschichte

1968	Gründung der SOCIEDAD QUÍMICA Y MINERA DE CHILE als anteilig staatliches Unternehmen zusammen mit COMPAÑÍA NITRATERA ANGLO LAUTARO S.A.
1971	SQM wird verstaatlicht, CORFO, ein chilenisches Staatsunternehmen, kontrolliert 100 Prozent
1983	Beginn der Privatisierungsphase
1988	Endgültige Privatisierung des Unternehmens
1995	Beginn der Kalidüngemittelproduktion des Kaliwerkes Salar de Atacama
2012	Erweiterung der Kalidüngemittelproduktionskapazität auf 2 Millionen Tonnen pro Jahr

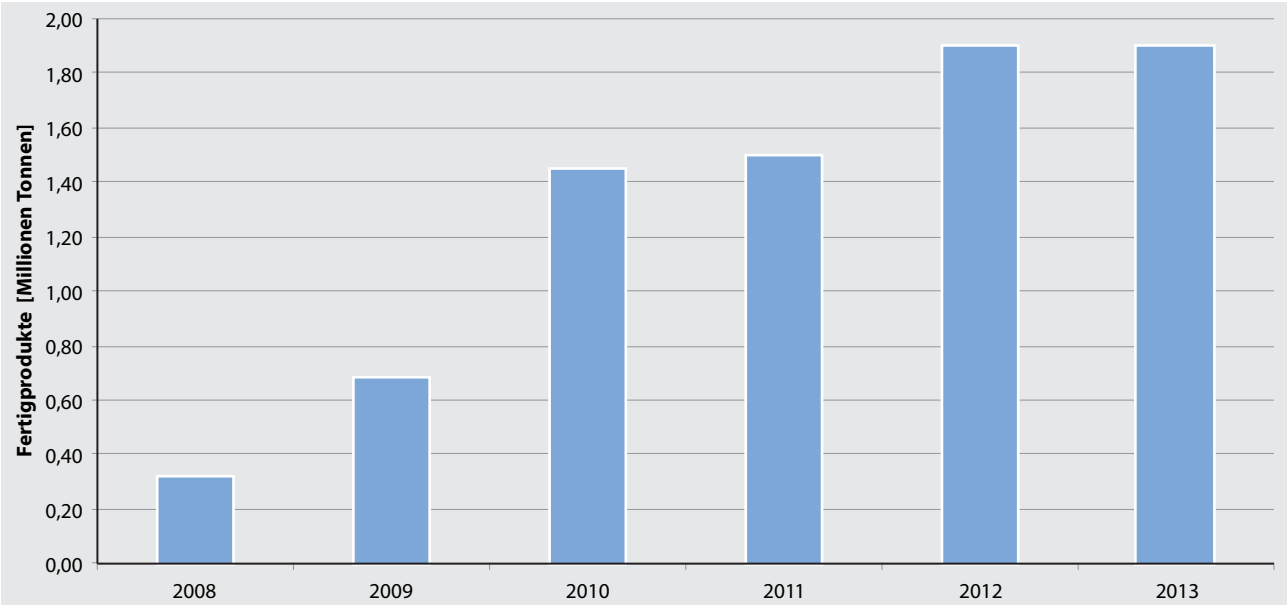
10.2 Betriebs- und volkswirtschaftliche Kennziffern für das Geschäftsfeld Kalidüngemittelprodukte im Konzern SQM



Umsatzentwicklung und Anzahl der Beschäftigten in der Kalidüngemittelproduktion von SQM im Zeitraum von 2010 bis 2013



Entwicklung der Steuern und Abgaben auf Erträge aus der Kalidüngemittelproduktion von SQM im Zeitraum von 2010 bis 2013



Kalidüngemittelproduktion von SQM im Zeitraum von 2008 bis 2013

10.3 Kaliwerk Salar de Atacama, Antofagasta, Chile



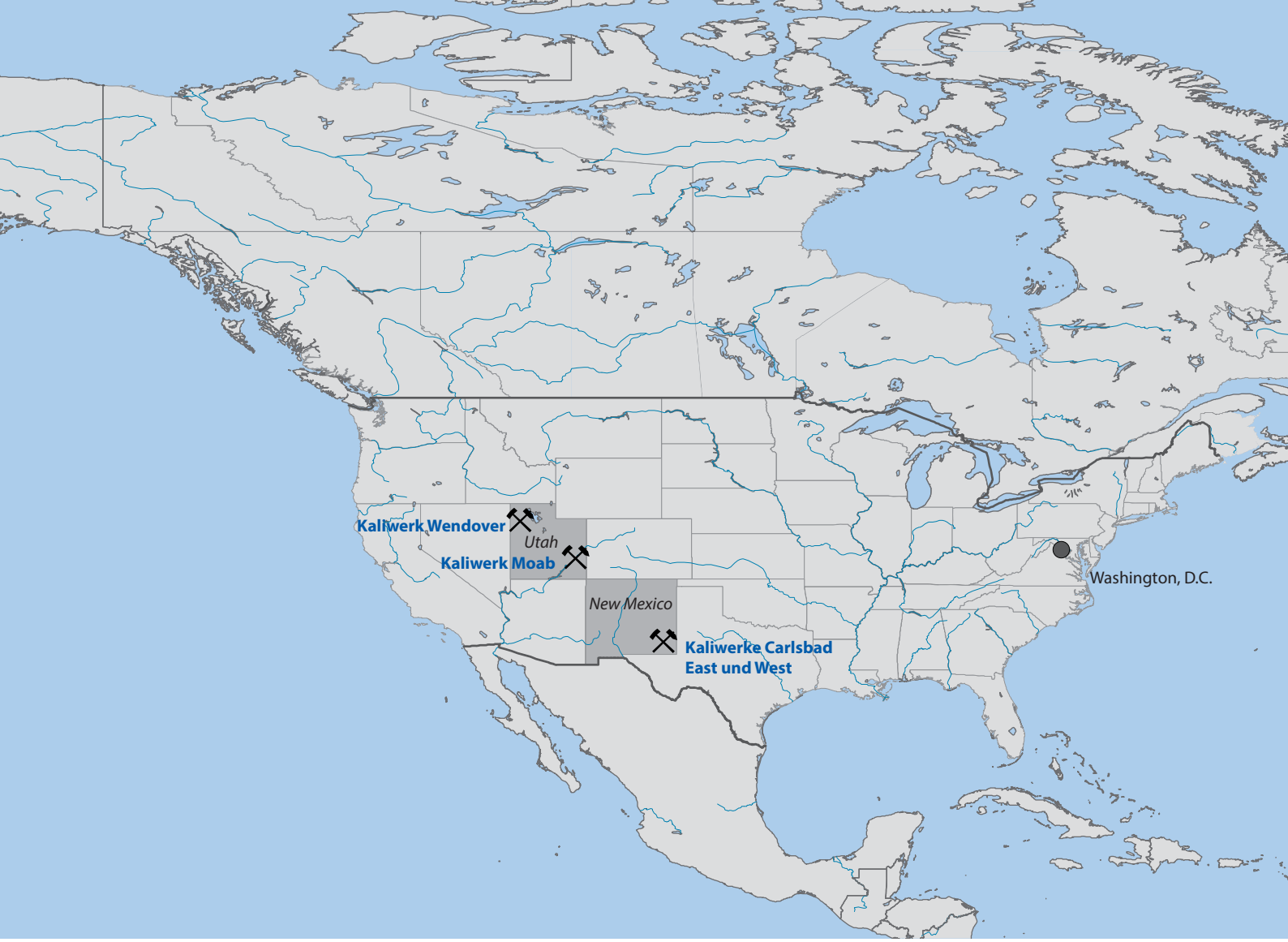
Übersicht des Kaliwerkes Salar de Atacama, Antofagasta, Chile, SQM, mit den Produktionsanlagen sowie den Becken für die solare Evaporation der wertstoffarmen natürlichen Lösungen, im Satellitenbild

Überblick Kaliwerk Salar de Atacama[23]

Geografische Lage	Salar de Atacama, am Fuß der Anden, in der Region Antofagasta im Norden von Chile	
Produktionseinrichtungen	Anlagen zur Gewinnung natürlicher Lösungen und Aufbereitungsanlagen für natürliche Lösungen	
Tatsächliche Produktion	1,90 Millionen Tonnen MOP + SOP (2013)	
Installierte Produktionskapazität	2,30 Millionen Tonnen MOP + SOP, untergeordnet Kaliumnitrat (NOP) (2013)	
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Salar de Atacama	
Kalirohstoff	Kalium-haltige oberflächennahe Lösungen[24]	
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der gewonnenen Kalirohstoffe	1,5 Prozent K_2O	
Gewinnbare Vorräte	Für die nächsten 30 Jahre	
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Drainage oberflächennaher Evaporite	
Aufbereitungsverfahren	Solare Evaporation und natürliche Kristallisation sowie Flotation	
Kaliprodukte	MOP *standard* und MOP *granular*, SOP, Kaliumnitrat	
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände	Rückführung in den Salar de Atacama Aufhaldung
	Flüssige Rückstände	Rückführung in den Salar de Atacama
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage	160 Hektar
	Becken für die solare Evaporation	3.000 Hektar
	Rückstandshalden	100 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Transport mittels LKW auf der Straße nach Cola Sur und dann per Eisenbahn zum Hafen von Tocopilla, Pazifik	

23 Da das Kaliwerk Salar de Atacama in Chile der einzige Produktionsstandort für Kalidüngemittel von SQM ist, wird auf eine gesonderte Tabelle zur Historie des Werkes verzichtet.

24 Das sind natürliche, gering wertstoffhaltige Lösungen, die in Oberflächengewässern, sogenannten Salzseen, oder aber als Porenwässer in oberflächennahen Grundwasserleitern gespeichert sind.



11 INTREPID POTASH, USA

INTREPID POTASH INC. (INTREPID) produziert fast ausschließlich Kalidüngemittel, sowohl MOP als auch SOP. INTREPID ist ein börsennotiertes Unternehmen, das an dem Finanzhandelsplatz in New York (NYSE:IPI) gehandelt wird. Im Jahre 2013 produzierte INTREPID fast 0,7 Millionen Tonnen MOP und SOP. Die Kalidüngemittel werden ausschließlich auf dem US amerikanischen Markt verkauft.

INTREPID ist der zweitgrößte Kaliproduzent in den USA und betreibt seine Produktion an drei Standorten in den Bundesstaaten Utah und New Mexico.

In 2 Kalibergwerken nahe Carlsbad, New Mexico, USA, werden in Teufen zwischen 245 und 450 Metern mittels Bergmännischer, Schneidender Gewinnung sylvinitische und untergeordnet langbeinititische Rohsalze abgebaut. Im und um das ehemalige Kalibergwerk Moab, Utah, USA, wird in Teufen zwischen 1.200 und 1.400 Metern wird Sylvinit soltechnisch gewonnen. Außerdem werden in einem Kaliwerk, in Wendover, Utah, USA, wertstoffarme natürliche Lösungen des Great Salt Lake als Rohstoffquelle zur Produktion von Kalidüngemitteln gewonnen.

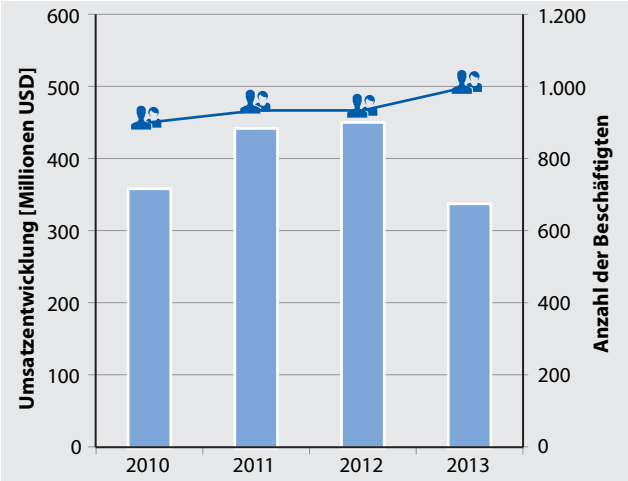
Die sylvinitischen und langbeinitischen Rohsalze werden in derzeit 4 Aufbereitungsanlagen hauptsächlich durch Flotation und in geringen Anteilen auch mittels Heißverlösung und Kristallisation zu Kalidüngemitteln aufbereitet. Die technischen Lösungen aus der Soltechnischen Gewinnung und auch die wertstoffarmen natürlichen Lösungen werden zunächst durch solare Eindapfung und natürliche Kristallisation und in der Folge durch Flotation zu Kalidüngemitteln aufbereitet.

Das zur Zeit in der Bauphase befindliche Carlsbad *HB Solar Solution Mine* Projekt von INTREPID sieht eine Kapazitätserhöhung von 150.000 bis 200.000 Tonnen pro Jahr ab 2017 vor. Dabei soll ein geflutetes Kalibergwerk künftig durch soltechnische Gewinnung, ähnlich wie in Moab, Utah, USA, genutzt werden. Die Aufbereitung der dabei künftig gewonnenen technischen Lösungen soll mittels solarer Eindampfung und natürlicher Kristallisation erfolgen. Die dabei geernteten Kristallisate sollen in der Aufbereitungsanlage des Kaliwerkes Carlsbad West mittels Flotation zu Kalidüngemitteln aufbereitet werden.

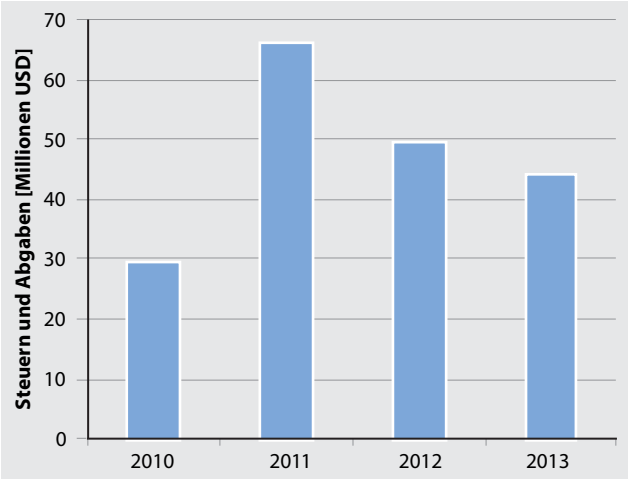
11.1 Meilensteine der Kalidüngemittelproduktions- und Unternehmensgeschichte

2000	Gründung von INTREPID und Erwerb des Kaliwerkes Moab von PCS
Februar 2004	INTREPID erwirbt die Vermögensanteile der MISSISSIPPI POTASH, INC. und der EDDY POTASH, INC. in Carlsbad, New Mexico von der MISSISSIPPI CHEMICAL COMPANY.
April 2004	Übernahme des Kaliproduzenten REILLY CHEMICAL, INC. in Wendover, Utah
2008	Namenswechsel von INTREPID MINING LLC zu INTREPID POTASH INC.

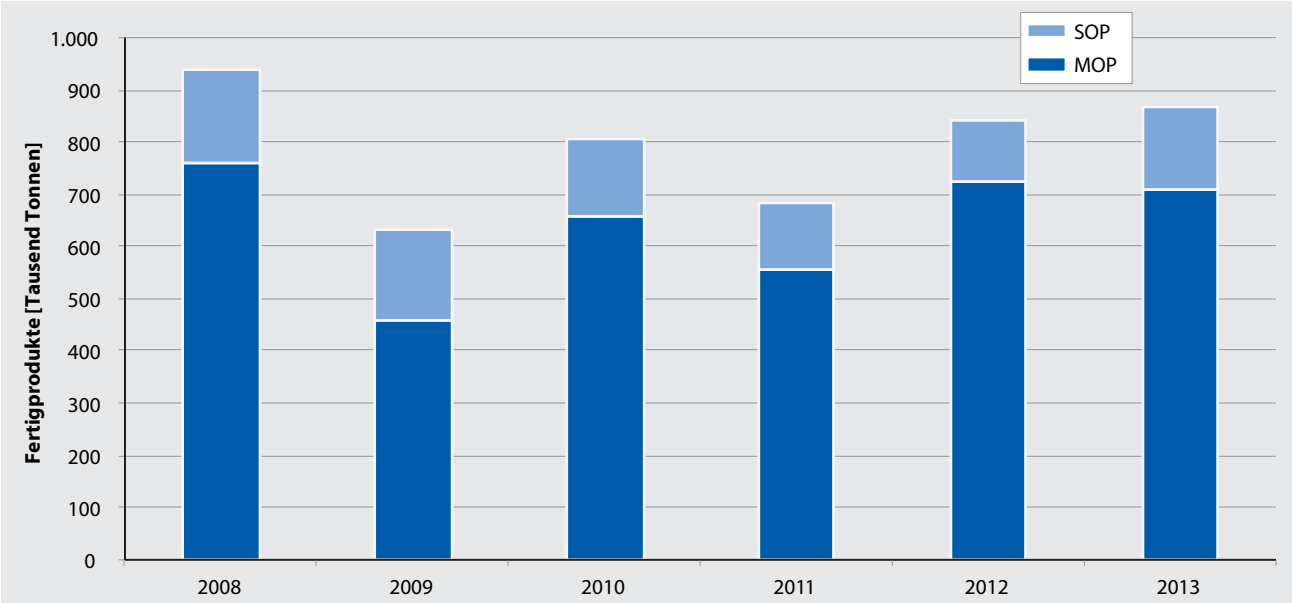
11.2 Betriebs- und volkswirtschaftliche Kennziffern des Unternehmens INTREPID



Umsatzentwicklung und Anzahl der Beschäftigten in der Kalidüngemittelproduktion von INTREPID im Zeitraum von 2010 bis 2013

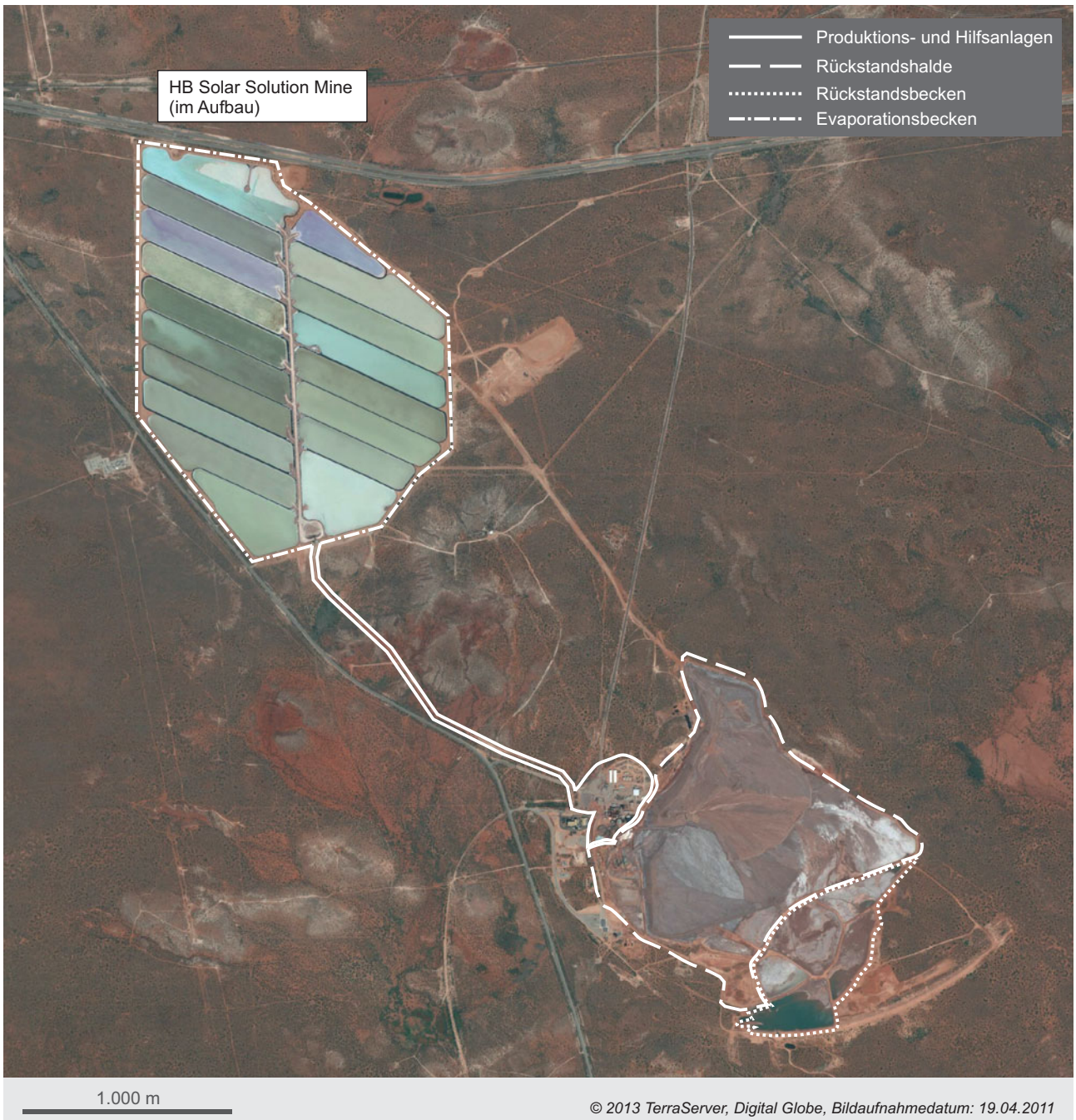


Entwicklung der Steuern und Abgaben auf Erträge aus der Kalidüngemittelproduktion von INTREPID im Zeitraum von 2010 bis 2013



Produktionsvolumen an MOP und SOP von INTREPID im Zeitraum von 2008 bis 2013

11.3 Kaliwerke Carlsbad East und Carlsbad West, New Mexico, USA



Übersicht des Kaliwerkes Carlsbad West, New Mexico, USA, INTREPID, mit den Produktionsanlagen über Tage, der Spülhalde für die festen Aufbereitungsrückstände und den Becken für die Klärung sowie Speicherung der Transportlösungen beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen sowie den Evaporationsbecken der im Aufbau befindlichen *HB Solar Solution Mine*, im Satellitenbild



Übersicht des Kaliwerkes Carlsbad East, New Mexico, USA, INTREPID, mit den Produktionsanlagen über Tage, der Spülhalde für die festen Aufbereitungsrückstände und den Becken für die Klärung sowie Speicherung der Transportlösungen beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, im Satellitenbild



Teilansicht der Granulierungs- und Speicheranlagen des Kaliwerkes Carlsbad am Standort *North Facility*, INTREPID [Foto mit freundlicher Genehmigung von INTREPID]

Überblick Kaliwerke Carlsbad East und Carlsbad West

Geografische Lage	30 Kilometer östlich von Carlsbad, im Südosten von New Mexico in den USA
Produktionseinrichtungen	Zwei Bergwerke (*East Mine* und *West Mine*) Zwei Aufbereitungsanlagen in Carlsbad East und West Kompaktierungs-, Speicher- und Verladeanlagen in *Carlsbad North*[25] *HB Solar Solution Mine* mit Evaporationsbecken im Aufbau
Historie	1931 Beginn der Kalidüngemittelproduktion in der East Mine 1965 Beginn der Kalidüngemittelproduktion in der West Mine 1996 Übernahme durch MISSISSIPPI CHEMICAL COMPANY 2004 Erwerb durch INTREPID von der MISSISSIPPI CHEMICAL COMPANY
Tatsächliche Produktion	0,521 Millionen Tonnen MOP und 0,160 Millionen Tonnen SOP (TRIO®)[26] (2013)

25 Am Standort Carlsbad North, welcher sich etwa 8km nördlich der Carlsbad West Mine befindet, errichtete INTREPID eine Granulierungsanlage mit Speicher- und Verladeeinrichtungen. Dort werden die Kalisalze aus der Carlsbad West Mine und der zukünftigen HB Mine granuliert und verladen.

26 TRIO ist ein sulfatisches Düngemittel und besteht aus etwa 22% K_2O, 11% Mg und 22% SO_4.

Installierte Produktionskapazität	0,80 Millionen Tonnen MOP pro Jahr und 0,25 Millionen Tonnen SOP (TRIO®) pro Jahr (2013)	
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Delaware Becken *McNutt Member, Salado Formation, Ochoan,* Oberes Perm	
Kalirohstoff	Sylvinit, Langbeinitit	
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	Sylvinit: 12 – 14 Prozent K_2O, Langbeinitit: 12 Prozent K_2O und etwa 20 Prozent $MgSO_4$	
Gewinnbare Vorräte	*Proven reserves* Sylvinit	Carlsbad West: 210 Millionen Tonnen mit 22 Prozent KCl, entspricht einer Lebensdauer von >170 Jahren Carlsbad East: 62 Millionen Tonnen mit 18,7 Prozent KCl, entspricht einer Lebensdauer von >61 Jahren
	Proven reserves Langbeinit	Carlsbad East: 90 Millionen Tonnen, entspricht einer Lebensdauer von >97 Jahren
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Schneidende Gewinnung im Langkammerpfeilerbau	
Aufbereitungsverfahren	Carlsbad East Carlsbad West	Heißverlösung und technische Eindampf-/Kühlkristallisation Flotation
Kaliprodukte	MOP *standard* und *granular*, SOP (TRIO®) *standard* und *granular*	
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände Flüssige Rückstände	Vollständige Aufhaldung Einleitung in Sammelbecken
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage	13 Hektar Carlsbad West 48 Hektar Carlsbad East
	Rückstandshalden	120 Hektar Carlsbad West 240 Hektar Carlsbad East
	Rückstandsbecken	30 Hektar Carlsbad West 50 Hektar Carlsbad East
	Becken für die solare Evaporation	230 Hektar *HB Solar Solution Mine*
Transport der Fertigprodukte	90 Prozent der Fertigprodukte mittels Eisenbahn und 10 Prozent mittels LKW zu den lokalen Abnehmern	

11.4 Kaliwerk Moab, Utah, USA



Übersicht des Kaliwerkes Kaliwerkes Moab, Utah, USA, INTREPID, mit den Produktionsanlagen über Tage und den Evaporationsbecken zur natürlichen Kristallisation der technischen Lösungen aus der Soltechnischen Gewinnung sowie den Becken für die Klärung sowie Speicherung der Transportlösungen beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, im Satellitenbild



Teilansicht des Kaliwerkes Moab, INTREPID mit den Becken zur solaren Evaporation der technischen Lösungen, im Luftbild [Foto mit freundlicher Genehmigung von INTREPID]

Überblick Kaliwerk Moab

Geografische Lage	12 Kilometer südwestlich von Moab, im Osten von Utah in den USA
Produktionseinrichtungen	Solfeld zur Gewinnung technischer Lösungen Anlagen zur Aufbereitung technischer Lösungen
Historie	1963 Errichtung des Kaliwerkes durch TEXAS GULF SULPHUR COMPANY zur bergmännischen Gewinnung von Kalirohsalzen 1970 Aufgrund der Schlagwettergefährdung im Bergwerk Änderung der Produktionsart in eine Kombination aus soltechnischer Gewinnung und Evaporation 1995 Erwerb durch PCS von TEXAS GULF 2000 Erwerb durch INTREPID von PCS
Tatsächliche Produktion	0,105 Millionen Tonnen MOP (2013)
Installierte Produktionskapazität	0,108 Millionen Tonnen MOP pro Jahr (2013)
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Paradox Becken *Paradox Member, Hermosa Formation, Pennsylvanian*, Oberes Karbon
Kalirohstoff	Sylvinit
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	13 – 15 Prozent K_2O im Rohsalz
Gewinnbare Vorräte	*Proven reserves:* 18 Millionen Tonnen
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Soltechnische Gewinnung aus einem ersoffenen Kalibergwerk und seit 2003 auch durch Bohrungen ins Kalilager
Aufbereitungsverfahren	Solare Evaporation und natürliche Kristallisation sowie Flotation
Kaliprodukte	MOP *standard* und MOP *granular*
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände Aufhaldung Flüssige Rückstände Rückführung in das abgesoffene Bergwerk
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage 28 Hektar Rückstandshalde 30 Hektar Rückstandsbecken 8 Hektar Becken für die solare Evaporation 190 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Mittels Eisenbahn und LKW zu den lokalen Abnehmern

11.5 Kaliwerk Wendover, Utah, USA



Übersicht des Kaliwerkes Wendover, Utah, USA, INTREPID, mit den Produktionsanlagen sowie den Becken für die solare Evaporation der wertstoffarmen natürlichen Lösungen, im Satellitenbild



© 2013 TerraServer, Digital Globe, Bildaufnahmedatum: 04.09.2011

Detailansicht des Kaliwerkes Wendover, Utah, USA, INTREPID, mit den Produktionsanlagen sowie den Becken für die solare Evaporation der wertstoffarmen natürlichen Lösungen, im Satellitenbild



Teilansicht des Kaliwerkes Wendover, INTREPID mit den Becken zur solaren Evaporation der wertstoffarmen natürlichen Lösungen [Foto mit freundlicher Genehmigung von William Keddell, Miami, Florida, USA]

Überblick Kaliwerk Wendover

Geografische Lage	5 Kilometer östlich von Wendover, im Nordwesten von Utah in den USA
Produktionseinrichtungen	Anlagen zur Gewinnung natürlicher Lösungen Anlagen zur Aufbereitung natürlicher Lösungen
Historie	1939 Beginn der Kalidüngemittelproduktion 2012 Übernahme durch INTREPID von REILLY CHEMICAL, INC.
Tatsächliche Produktion	0,039 Millionen Tonnen MOP (2013)
Installierte Produktionskapazität	0,10 Millionen Tonnen MOP pro Jahr (2013)
Lagerstätte und deren Stratigrafie	*Utah Desert* Flache Aquifere der *Bonneville Salt Flats*
Kalirohstoff	Kalium-haltige oberflächennahe Porenwässer
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der gewonnenen Kalirohstoffe	17 – 20 Prozent K_2O im Rohsalz
Gewinnbare Vorräte	Vorräte für weitere 30 Jahre Produktion vorhanden
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Lösungsgewinnung aus flachen Kalium-haltigen oberflächennahen Porenwässer
Aufbereitungsverfahren	Solare Evaporation und natürliche Kristallisation sowie Flotation
Kaliprodukte	MOP *standard* und MOP *granular*
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände Rückführung in den Salzsee Flüssige Rückstände Rückführung in den Salzsee Mg-haltige Restlösung wird als Enteisungsmittel verkauft
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage 42 Hektar Evaporationsbecken 20.000 Hektar Rückstandsbecken 30 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Mittels Eisenbahn und LKW zu den lokalen Abnehmern



12 VALE, BRASILIEN

VALE S.A. (VALE) ist eines der drei größten Bergbauunternehmen der Welt und baut vor allem Eisenerz, Kupfer, Platin, Gold, Silber, Kohle und Bauxit ab. VALE ist ein börsennotiertes Unternehmen, das an den Finanzhandelsplätzen in Sao Paulo (BM&F Bovespa: VALE3, VALE5), New York (NYSE: VALE, VALE.P), Madrid (BMAD: XVALO, XVALP), Amsterdam (Euronext: VALE3, VALE5), Hong Kong (SEHK: 6210, 6230) und Indonesien (IDX: INCO) gehandelt wird.

Das Kalidüngemittelgeschäft nimmt einen Anteil von etwa 5 Prozent am Gesamtumsatz von VALE ein.

Im Jahre 2013 produzierte VALE etwa eine halbe Million Tonnen MOP. Alle Produkte werden auf dem einheimischen Markt vertrieben, decken aber lediglich 7 Prozent des brasilianischen Marktes ab.

An nur einem Standort im Nordosten Brasiliens, im Staat Sergipe, baut VALE im Kalibergwerk in Teufen zwischen 500 und 750 Metern mittels Bergmännischer, Schneidender Gewinnung sylvinitische Rohsalze ab.

Die sylvinitischen Rohsalze werden dort durch Flotation zu Kalidüngemitteln verarbeitet.

VALE plant bereits seit mehreren Jahren, die Produktionskapazitäten an diesem Standort zu erweitern und künftig auch carnallitische Rohsalze durch Soltechnische Gewinnung abzubauen. VALE betreibt eigens dazu bereits seit mehreren Jahren eine Pilotanlage. Die geplante Kapazität des erweiterten Werkes soll 1,2 Millionen Tonnen MOP pro Jahr betragen.

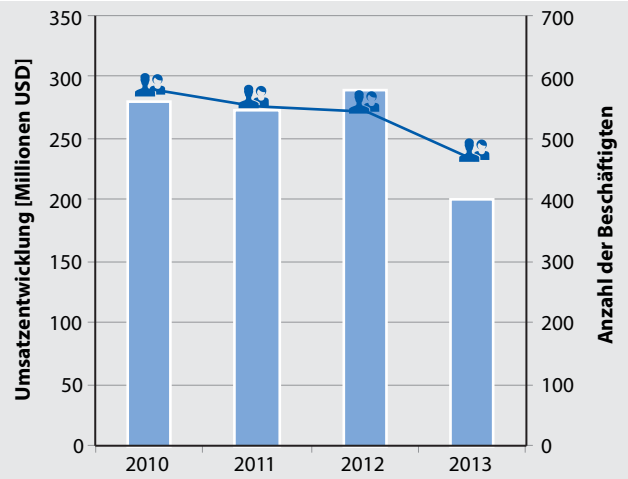
Weiterhin baut VALE eine neue Produktionsanlage zur Soltechnischen Gewinnung von Sylvinit am Rio Colorado, in der Provinz Mendoza, Argentinien, mit einer geplanten Produktionskapazität von annähernd 4 Millionen Tonnen MOP pro Jahr, deren Fortführung seit März 2013 aus wirtschaftlichen Gründen vorerst ausgesetzt wurde.

12.1 Meilensteine der Kalidüngemittelproduktions- und Unternehmensgeschichte

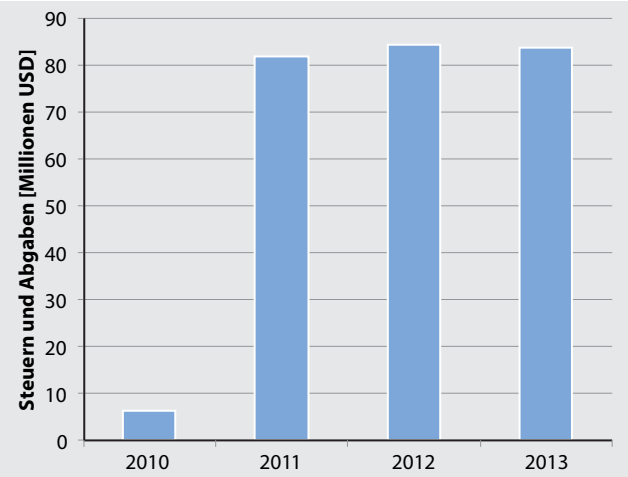
1942	Gründung des staatlichen Unternehmens COMPANHIA VALE DO RIO DOCE (CVRD)
1970	Entdeckung der Sylvinitlagerstätte während Explorationsarbeiten für Erdgas durch PETROBAS Errichtung des Kaliwerkes Taquari Vassouras
1974	CVRD wird zum weltweit größten Exporteur von Eisenerz bis zum heutigen Tag
1985	Beginn der Kalidüngemittelproduktion
1992	Inbetriebnahme des einzigen Kaliwerkes in Brasilien, Taquari Vassouras
1997	Privatisierung der CVRD[27]
2007	Umbenennung in VALE

[27] VALE nutzt dort in einer Art *contract mining* die Lagerstättenkonzession Taquari-Vassouras die der PETROMISA S.A., einem Tochterunternehmen des brasilianischen Öl- und Gaskonzerns PETROBRAS S.A. gehört.

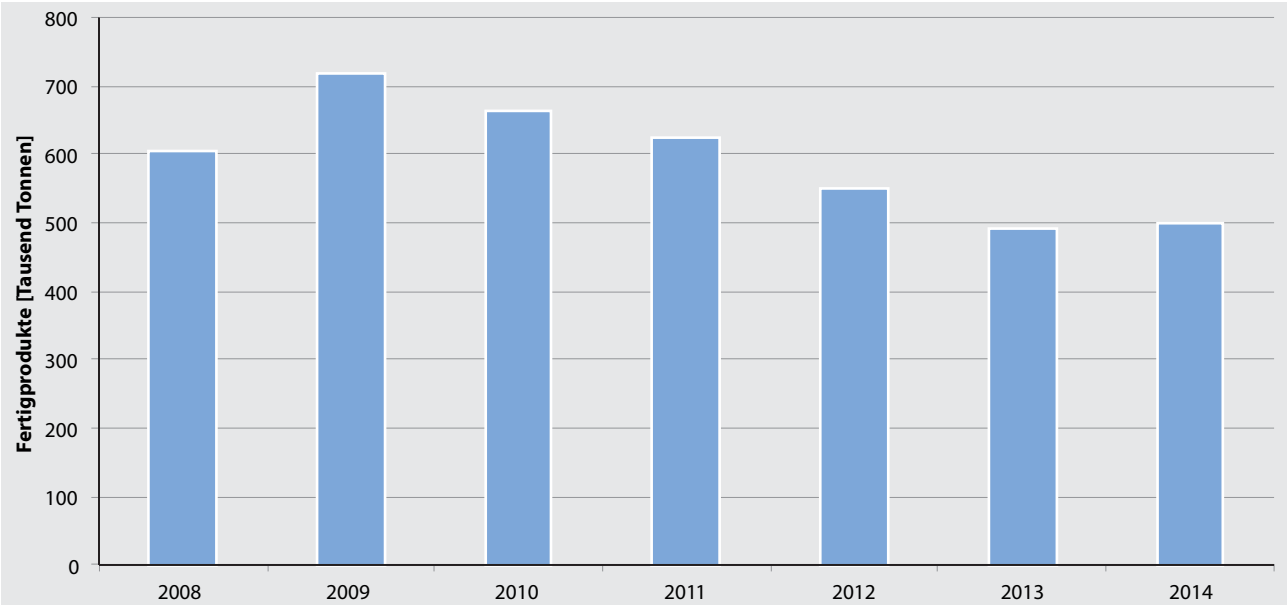
12.2 Betriebs- und volkswirtschaftliche Kennziffern für das Geschäftsfeld Kalidüngemittelprodukte im Konzern VALE



Umsatzentwicklung und Anzahl der Beschäftigten in der Kalidüngemittelproduktion von VALE im Zeitraum von 2010 bis 2013



Entwicklung der Steuern und Abgaben auf Erträge aus der Kalidüngemittelproduktion von VALE im Zeitraum von 2010 bis 2013



Entwicklung der Kalidüngemittelproduktion im Kaliwerk Taquari Vassouras von VALE im Zeitraum von 2008 bis 2014

12.3 Kaliwerk Taquari Vassouras, Sergipe, Brasilien



Übersicht des Kaliwerkes Taquari Vassouras, Brasilien, VALE, mit den Produktionsanlagen über Tage, der Spülhalde für die festen Aufbereitungsrückstände und den Becken für die Klärung sowie Speicherung der Transportlösungen beziehungsweise der durch Niederschlagseinwirkung auf den Haldenkörper anfallenden Salzlösungen, im Satellitenbild

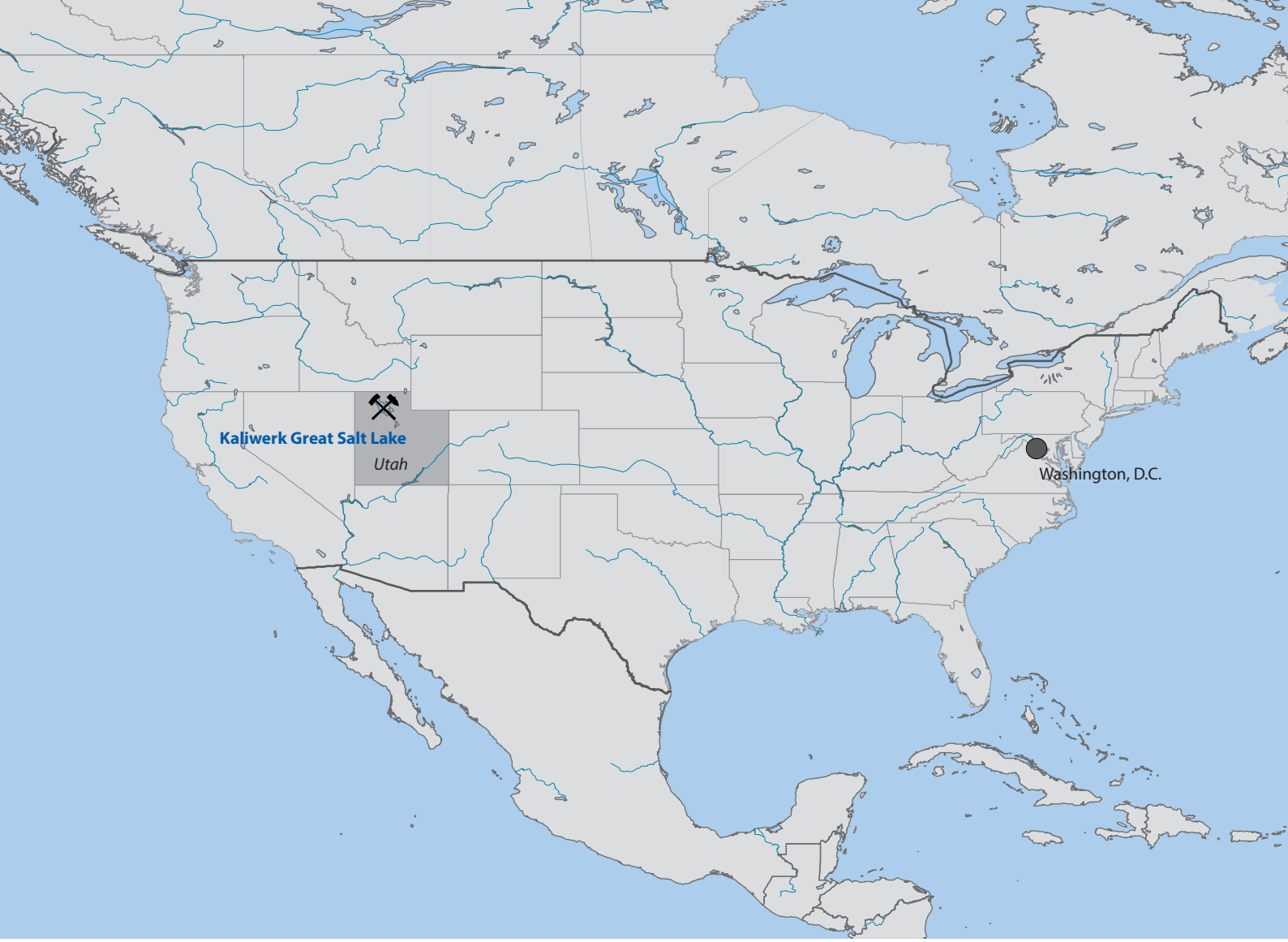


Tagesschacht und Nebenanlagen einschließlich der Gebäude zur Kühlung der Frischwetter (rechts) des Kaliwerkes Taquari Vassouras, VALE [Foto mit freundlicher Genehmigung von Flavio de Lima Faria, Belo Horizonte, Brasilien]

Überblick Kaliwerk Taquari Vassouras[28]

Geografische Lage	40 Kilometer nördlich von Aracaju und etwa 5 Kilometer nördlich von Rosário do Catete, 20 Kilometer westlich der Atlantikküste in der nordöstlichen Region des Staates Sergipe in Brasilien	
Produktionseinrichtungen	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	
Tatsächliche Produktion	0,49 Millionen Tonnen MOP (2013)	
Installierte Produktionskapazität	0,85 Millionen Tonnen MOP pro Jahr (2014)	
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Sergipe Becken – Taquari Vassouras *Ibura Member, Muribeca Formation*, Apt, Untere Kreide	
Kalirohstoff	Sylvinit	
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	20 – 24 Prozent K_2O	
Gewinnbare Vorräte	*Proven reserves*	7,8 Millionen Tonnen Sylvinit
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Schneidende Gewinnung im Langkammerpfeilerbau	
Aufbereitungsverfahren	Flotation	
Kaliprodukte	MOP *granular* (70%) und MOP *standard* (30%)	
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände	Einleitung von etwa 1,4 Millionen Tonnen pro Jahr als Suspension in den Südatlantik, via Pipeline über 37,4 Kilometer Länge zum Meer (bis 2 km hinter die Küstenlinie).
	Flüssige Rückstände	Einleitung in den Südatlantik
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage	85 Hektar
	Rückstandshalde	6 Hektar
	Rückstandsbecken	10 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Mittels LKW auf dem Landweg oder zum Hafen "*Terminal Marítimo Inácio Barbosa*" von Aracaju, Atlantik und dann per Schiff zu den lokalen Abnehmern in Brasilien	

28 Da das Kaliwerk Taquari Vassouras in Sergipe der einzige Produktionsstandort für Kalidüngemittel von VALE ist, wird auf eine gesonderte Tabelle zur Historie des Werkes verzichtet.



13 COMPASS MINERALS INTERNATIONAL, USA

COMPASS MINERALS INTERNATIONAL INC. (COMPASS) produziert neben Kalidüngemitteln vor allem Steinsalzerzeugnisse in Utah und Louisiana, USA, in Ontario, Kanada und in Großbritannien. In Großbritannien betreibt COMPASS außerdem die Entsorgung von Abfällen unter Tage.

COMPASS ist ein börsennotiertes Unternehmen, das am Finanzhandelsplatz in New York (NYSE:CMP) gehandelt wird.

Das Kalidüngemittelgeschäft nimmt einen Anteil von weniger als 20 Prozent am Gesamtumsatz von COMPASS ein.

Im Jahre 2013 produzierte COMPASS etwa 300.000 Tonnen MOP und SOP.

COMPASS vertreibt 70 Prozent seiner Kalidüngemittel auf dem US-amerikanischen Markt. 30 Prozent der Fertigprodukte werden exportiert, vornehmlich nach Mittel- und Südamerika, Japan und Australien.

COMPASS produziert Kalidüngemittel ausschließlich am Great Salt Lake in Utah, USA, wo in einer Produktionsanlage in der Nähe von Ogden, wo wertstoffarme natürlichen Lösungen des Great Salt Lake als Rohstoffquelle dienen.

Diese wertstoffarmen natürlichen Lösungen werden zunächst durch solare Evaporation und natürliche Kristallisation, in der Folge mittels Flotation sowie Heißverlösung und technischer Eindampf-/Kühlkristallisation zu verkaufsfähigen Kalidüngemitteln aufbereitet.

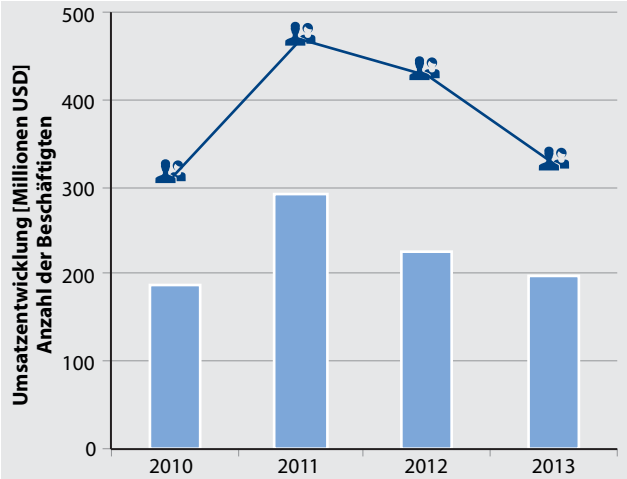
Durch Erweiterung der Evaporationsbecken und einer Erhöhung der Aufbereitungskapazität in den Produktionsanlagen plant COMPASS eine Erhöhung der SOP Produktion um 200.000 Tonnen pro Jahr bis 2017.

13.1 Meilensteine der Kalidüngemittelproduktions- und Unternehmensgeschichte

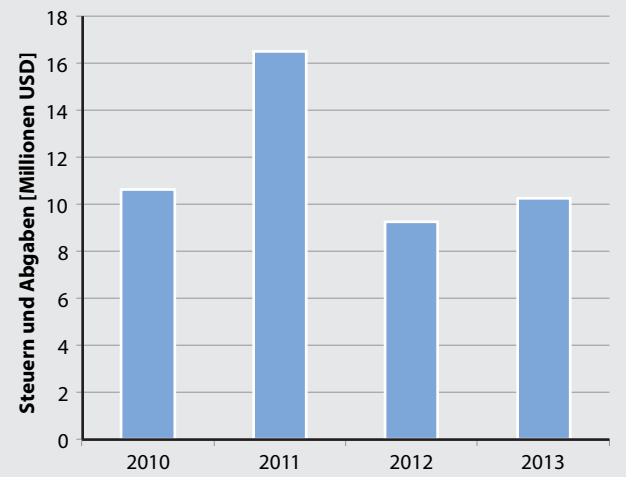
In Teilen des Unternehmens geht die Produktionsgeschichte bis ins 19. Jahrhundert zurück

1967	Erwerb der ersten Evaporationsbecken am *Great Salt Lake*
1968	Beginn der Kalidüngemittelproduktion bei Ogden in der *Bear River Bay*
In den 1980er Jahren	Konstruktion der "*Behrens Trench*" durch Peter Behrens, eine Verbindung vom östlichen zum westlichen Seeufer
1990	Beginn der Kalidüngemittelproduktion am westlichen Seeufer der *Clyman Bay*
2001	Erwerb von BIG QUILL RESOURCES, Kanadas führendem SOP Hersteller
2003	Firmengründung in der heutigen Form

13.2 Betriebs- und volkswirtschaftliche Kennziffern für das Geschäftsfeld Kalidüngemittelprodukte im Konzern COMPASS

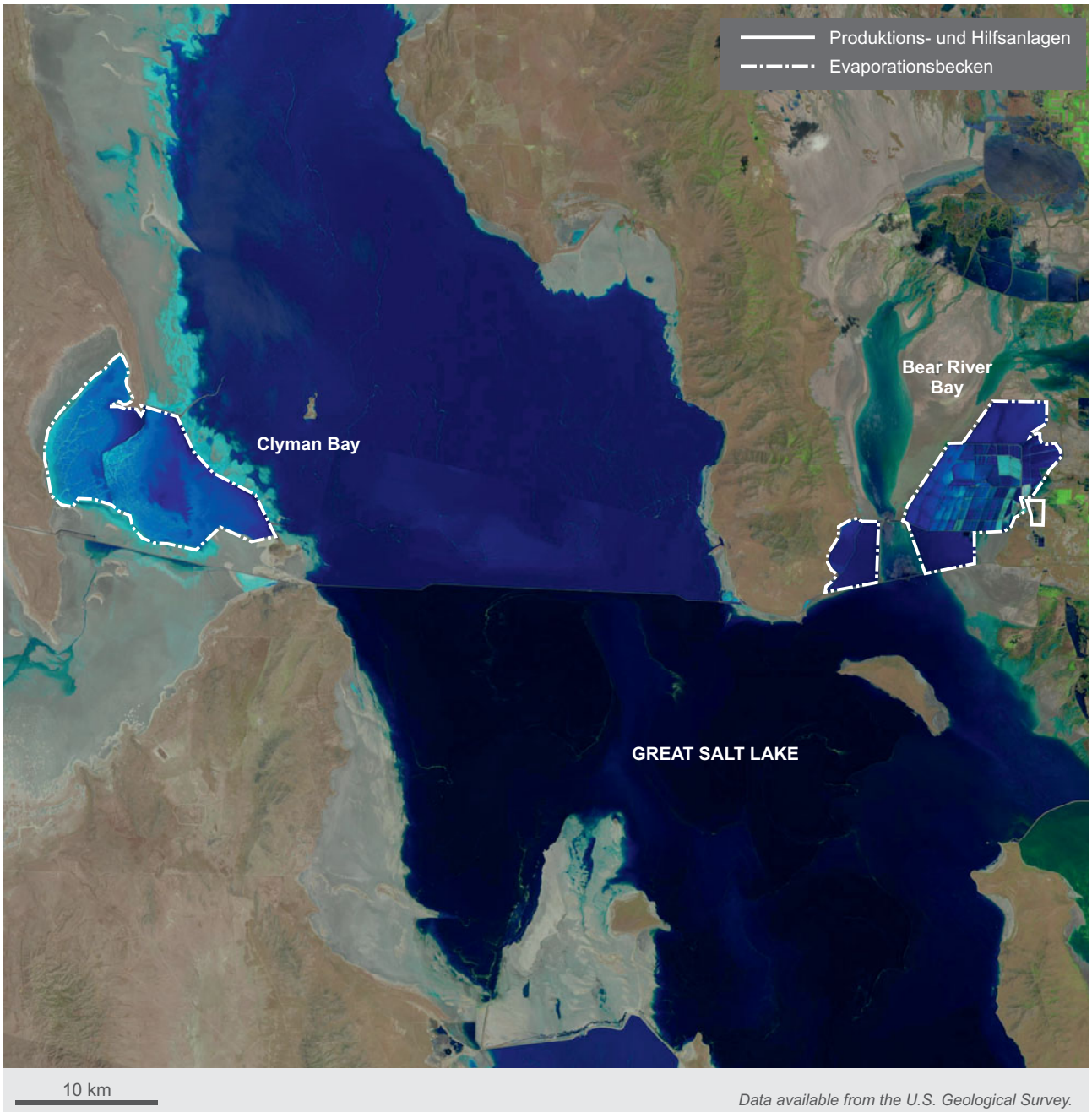


Umsatzentwicklung und Anzahl der Beschäftigten in der Kalidüngemittelproduktion von COMPASS im Zeitraum von 2010 bis 2013



Entwicklung der Steuern und Abgaben auf Erträge aus der Kalidüngemittelproduktion von COMPASS im Zeitraum von 2010 bis 2013

13.3 Kaliwerk Great Salt Lake, Utah, USA



Übersicht des Kaliwerkes Great Salt Lake, Utah, USA, COMPASS, mit den Produktionsanlagen sowie den Becken für die solare Evaporation der wertstoffarmen natürlichen Lösungen, im Satellitenbild



Teilansicht des Kaliwerkes Great Salt Lake, COMPASS mit den Produktionsanlagen über Tage sowie der Lagerfläche für Steinsalz [Foto mit freundlicher Genehmigung von Deseret News, Ravell Call, Salt Lake City, Utah, USA]



Teilansicht des Kaliwerkes Great Salt Lake, COMPASS mit den Becken zur solaren Evaporation der wertstoffarmen natürlichen Lösungen [Foto mit freundlicher Genehmigung von Deseret News, Ravell Call, Salt Lake City, Utah, USA]

Überblick Kaliwerk Great Salt Lake[29]

Geografische Lage	Östliche und westliche Uferseite des Great Salt Lake, im Bundesstaat Utah in den USA
Produktionseinrichtungen[30]	Anlagen zur Gewinnung natürlicher Lösungen und Anlagen zur Aufbereitung natürlicher Lösungen
Tatsächliche Produktion	0,30 Millionen Tonnen SOP (2013)
Installierte Produktionskapazität	0,35 Millionen Tonnen SOP pro Jahr (2014)
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Great Salt Lake
Kalirohstoff	Kalium-haltige Oberflächenwässer
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der gewonnenen Kalirohstoffe	1 – 2 Prozent K_2O
Gewinnbare Vorräte	Lizenz zum Abbau für 99 Jahre
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Gewinnung natürlicher Lösungen
Aufbereitungsverfahren	Solare Evaporation und natürliche Kristallisation, Flotation sowie technische Eindampf-/Kühlkristallisation
Kaliprodukte	SOP *granular* (70%) und SOP *standard* (30%)
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände: Rückführung in den Great Salt Lake Flüssige Rückstände: Rückführung in den Great Salt Lake
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage: 67 Hektar Becken für die solare Evaporation: 20.000 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Mittels LKW und Frachtkähnen auf Flüssen sowie mittels Eisenbahn zu den lokalen Abnehmern

29 Da das Kaliwerk Great Salt Lake in Utah der einzige Produktionsstandort für Kalidüngemittel von COMPASS ist, wird auf eine gesonderte Tabelle zur Historie des Werkes verzichtet.

30 Nach einem Jahr initialer Evaporation auf der Westseite (Clyman Bay) wird die konzentrierte Lösung über die unterirdische Leitung (*Behrens Trench*) in die Evaporationsbecken auf der Ostseite (Bear River Bay) transportiert und dort einer weiteren zweijährigen Evaporation unterzogen, um dann mittels Kristallisation und Flotation zu Kalidüngemitteln aufbereitet zu werden.



14 UZKIMYOSANAT, USBEKISTAN

GAK[31] UZKIMYOSANAT (UZKIMYOSANAT) ist ein staatliches Unternehmen und produziert seit 2010 in der neu errichteten Produktionsanlage Dechkanabad im Süden Usbekistans MOP.

Der Bau des Kaliwerkes wurde auf der Grundlage eines Ministerkabinettsbeschlusses von 2004 (Resolution Nr. 338) und einer im Jahr 2005 folgenden Anordnung des Präsidenten der Republik Usbekistan beschlossen und mit Hilfe chinesischer Investoren und russischer Erfahrungsträger auch bereits in einer ersten Ausbaustufe realisiert.

Im Jahre 2013 produzierte UZKIMYOSANAT erstmals fast 200.000 Tonnen MOP.

Zukünftig sollen mehr als 50 Prozent der Fertigprodukte nach Südostasien, darunter Sri Lanka, Malaysia und Singapur, vornehmlich aber nach China exportiert werden.

Der Produktionsstandort liegt in der Kashkadarya Region. Hier erfolgt der Abbau der sylvinitischen Kalirohsalze Bergmännisch mit Schneidender Gewinnung in Teufen 250 bis 400 Metern.

Die sylvinitischen Kalirohsalze werden durch Flotation zu verkaufsfähigen Kalidüngemitteln verarbeitet.

Die weitere Ausbaustufe des Kaliwerkes ist derzeit in Bau und soll bis 2016 eine zusätzliche Kapazität von 0,6 Millionen Tonnen Produkt liefern.

31 *Государственная акционерная компания УЗКИМЕСАНОАТ*; deutsch: Staatliche Aktiengesellschaft UZKIMYOSANAT

14.1 Kaliwerk Dechkanabad, Kashkadarya, Usbekistan



Übersicht des Kaliwerkes Dechkanabad, Usbekistan, UZKIMYOSANAT, mit den Produktionsanlagen über Tage und den Becken für die Klärung sowie Speicherung der flüssigen Rückstände



Teilansicht des Kaliwerkes Dechkanabad, UZKIMYOSANAT, mit Verwaltungsgebäuden und Lagerplätzen [Foto mit freundlicher Genehmigung von ГП ЗУМК, Perm, Russland]



Teilansicht des Kaliwerkes Dechkanabad, UZKIMYOSANAT, mit den Aufbereitungsanlagen über Tage [Foto mit freundlicher Genehmigung von ГП ЗУМК, Perm, Russland]

Überblick Kaliwerk Dechkanabad

Geografische Lage	Kashkadarya Region, im südlichen Landesteil von Usbekistan an der Grenze zu Turkmenistan	
Produktionseinrichtungen	Bergwerk und Aufbereitungsanlage für feste Kalirohsalze	
Historie	2010	Beginn der Kalidüngemittelproduktion
Tatsächliche Produktion	0,18 Millionen Tonnen MOP (2013)	
Geplante Produktionskapazität	0,60 Millionen Tonnen MOP pro Jahr (2016)	
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Buchara Becken, Tjubegatan Kalisalzlagerstätte Unteres Kalilager *Nizhny II*, Gaurdak Folge, Kimmeridge-Thiton, Oberes Jura	
Kalirohstoff	Sylvinit	
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	20 – 24 Prozent K_2O	
Gewinnbare Vorräte	Bilanzvorräte	200 Millionen Tonnen Sylvinit
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Schneidende Gewinnung	
Aufbereitungsverfahren	Flotation	
Kaliprodukte	MOP	
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände Flüssige Rückstände	Aufhaldung Einleitung in Sammelbecken
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage Rückstandsbecken	30 Hektar 4 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Mittels Eisenbahn zu den lokalen Abnehmern und zum Hafen	



15 DEUSA INTERNATIONAL, DEUTSCHLAND

Die DEUSA INTERNATIONAL GMBH (DEUSA) produziert Kalidüngemittel sowohl als Fertig- wie auch als als Zwischenprodukte ausschließlich in Thüringen, Deutschland.

DEUSA ist eine Beteiligung der SIEM INVESTMENTS, INC. mit Sitz in Cayman Islands.

Im Jahre 2013 produzierte DEUSA etwa 80.000 Tonnen Kalidüngemittel, daneben auch NaCl- und $MgCl_2$-Fertigprodukte.

2014 waren im Kaliwerk Kehmstedt/Bleicherode 85 Mitarbeiter beschäftigt.

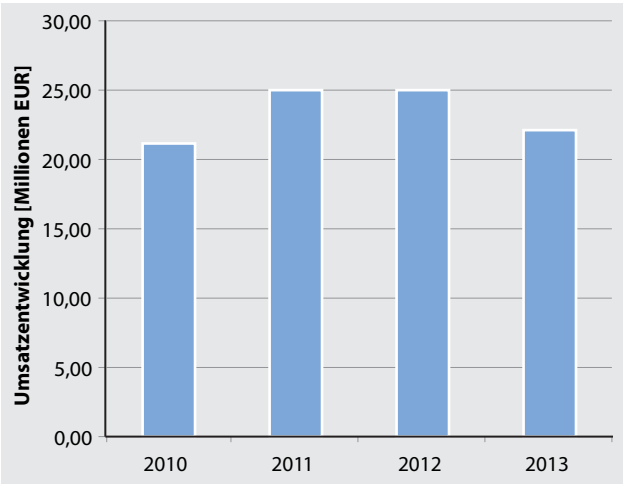
Die carnallitischen Kalisalze werden durch Soltechnische Gewinnung in Teufen von 340 bis 400 Metern abgebaut und mittels technischer Kristallisation aufbereitet. Das Kaliwerk Kehmstedt/Bleicherode besteht aus dem Solfeld zur Gewinnung technischer Lösungen in der Gemarkung Kehmstedt und einer etwa 2,5 km südwestlich davon, in Bleicherode gelegenen Anlage zu deren Aufbereitung.

DEUSA ist im Begriff, die Produktionskapazität auf 120.000 Tonnen pro Jahr zu erhöhen..

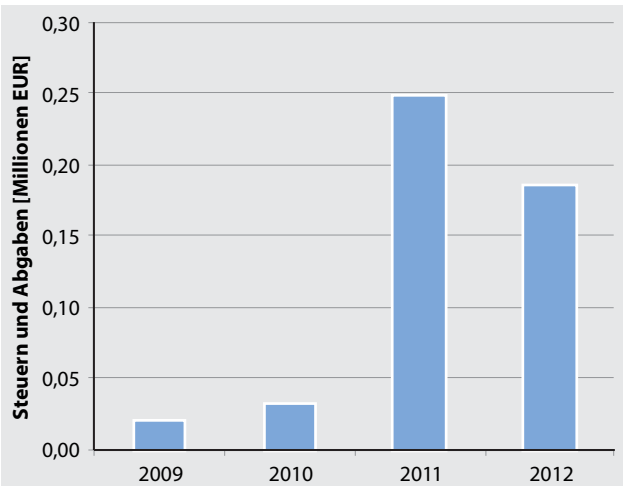
15.1 Meilensteine der Kalidüngemittelproduktions- und Unternehmensgeschichte

1979	Beginn der Solfeldentwicklung Kehmstedt
1988	Erprobung der kompletten Verfahrenskette für die soltechnische Gewinnung und Soleaufbereitung zu Kalidüngemitteln
1996	Inbetriebnahme einer neuen Anlage, die Bischofit produziert
2001	Umfirmierung in die heutige DEUSA INTERNATIONAL GMBH
2002	Bau einer neuen Kaliverladung mit Zwischenlager

15.2 Betriebs- und volkswirtschaftliche Kennziffern des Unternehmens DEUSA



Umsatzentwicklung in der Kalidüngemittelproduktion im Zeitraum von 2010 bis 2013



Entwicklung der Steuern und Abgaben auf Erträge aus der Kalidüngemittelproduktion im Zeitraum von 2009 bis 2012

15.3 Kaliwerk Kehmstedt/Bleicherode, Thüringen, Deutschland



Übersicht des Kaliwerkes Kehmstedt/Bleicherode, Deutschland, DEUSA mit den Produktionsanlagen über Tage und der teilweise begrünten Rückstandshalde sowie den Produktionsanlagen des ehemaligen Kaliwerkes Bleicherode, heute NDH ENTSORGUNGS-BETREIBERGESELLSCHAFT MBH



Teilansicht des Kaliwerkes Kehmstedt/Bleicherode, DEUSA, mit Produktionsanlagen über Tage und Solfeld, im Luftbild

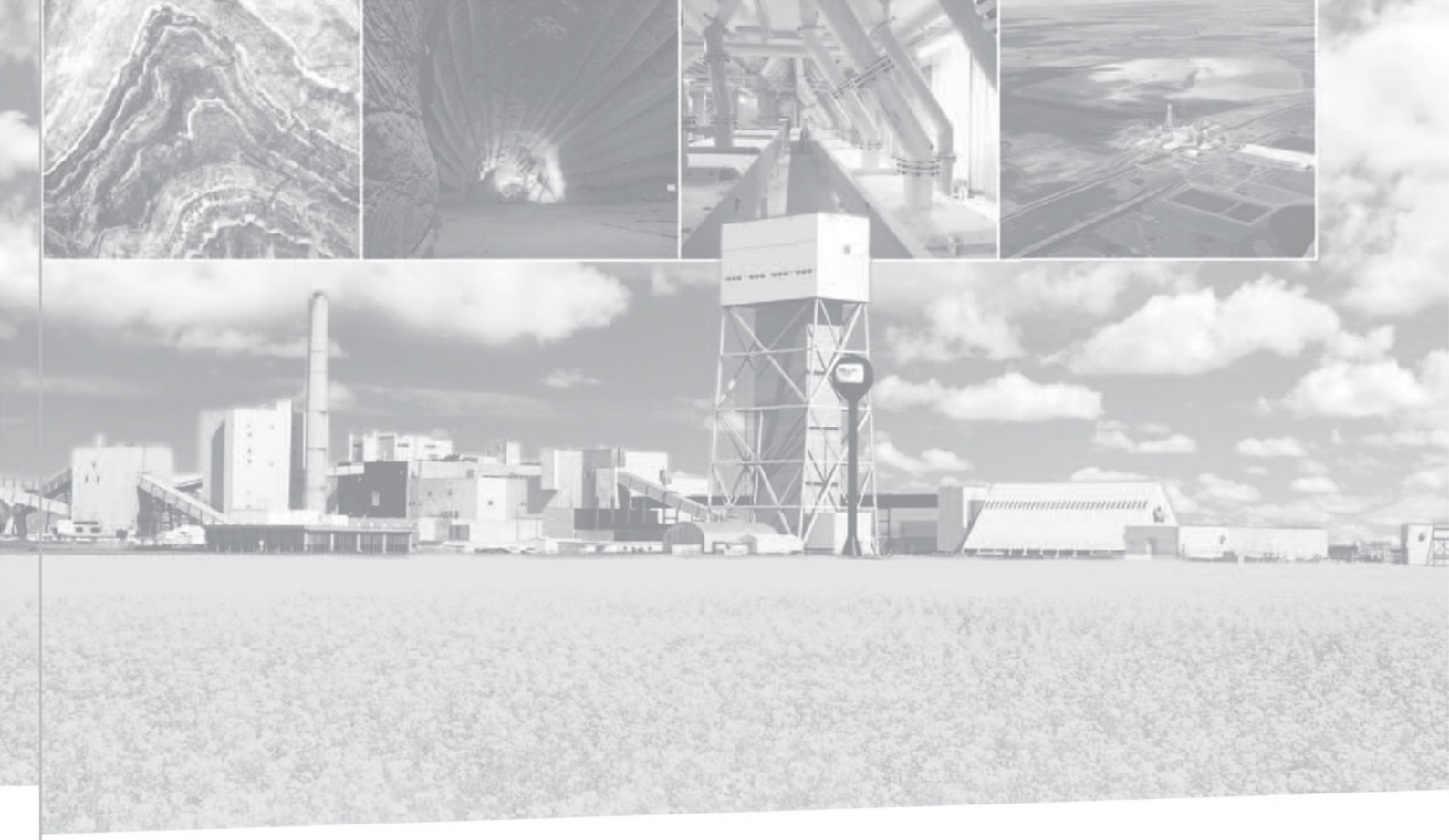


Aufbereitungsgebäude und Produktspeicher des Kaliwerkes Kehmstedt/Bleicherode, DEUSA, im Luftbild

Überblick Kaliwerk Kehmstedt/Bleicherode[32]

Geografische Lage	Südlich des Harzes nahe der Stadt Bleicherode, im Bundesland Thüringen in Deutschland	
Produktionseinrichtungen	Solfeld zur Gewinnung technischer Lösungen und Anlagen zur Aufbereitung technischer Lösungen	
Tatsächliche Produktion	80.000 Tonnen KCl pro Jahr (2013)	
Installierte Produktionskapazität	120.000 Tonnen KCl pro Jahr (2014)	
Lagerstätte und deren Stratigrafie	Südharz-Kalilagerstätte Kalilager Staßfurt, Staßfurt Folge, Zechstein, Oberes Perm	
Kalirohstoff	Carnallitit	
Durchschnittliche Wertstoffgehalte der abgebauten Rohsalze	12 Prozent K_2O	
Gewinnbare Vorräte	11 Millionen Tonnen KCl	
Gewinnungsmethode und Abbauverfahren	Soltechnische Gewinnung fester Kalirohsalze	
Aufbereitungsverfahren	Technische Eindampf-/Kühlkristallisation	
Kaliprodukte	KCl feucht und trocken	
Beseitigung der Aufbereitungsrückstände	Feste Rückstände Flüssige Rückstände	Rückführung in die ausgesalzenen Kavernen als Versatz Rückführung in die Kavernen und Einleitung in Fließgewässer
Flächeninanspruchnahme	Produktions- und Hilfsanlagen über Tage Solfeld	21 Hektar 34 Hektar
Transport der Fertigprodukte	Mittels Eisenbahn und LKW zu den Abnehmern des Zwischenproduktes	

32 Da das Kaliwerk Kehmstedt/Bleicherode in Thüringen der einzige Produktionsstandort für Kalidüngemittel von DEUSA ist, wird auf eine gesonderte Tabelle zur Historie des Werkes verzichtet.



ANHANG

Abkürzungsverzeichnis 479

Glossar 487

Referenzen 505

Bildnachweis 579

H. Rauche, *Die Kaliindustrie im 21. Jahrhundert,*
DOI 10.1007/978-3-662-46834-0, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Die folgenden Abkürzungen finden im vorliegenden Bericht Verwendung:

%	Prozent, Teil von Hundert, $\frac{1}{100}$
°C	Grad Celsius, Maßeinheit für die Temperatur
a	Jahr, Maßeinheit für die Zeit, im Mittel 365 Tage bzw. 8.760 Stunden
ABAO	Arbeitsschutz- und Brandschutzanordnung, in der ehemaligen DDR geltende Anordnung zum Arbeits- und Brandschutz und zur Sicherheit im Bergbau
ABBergV	Allgemeine Bundesbergverordnung, in der Bundesrepublik Deutschland geltende Verordnung zur Sicherheit und den Gesundheitsschutz sowie den Umweltschutz im Bergbau
ACRON	OAO ACRON, ein russisches Unternehmen, das die Lagerstättenkonzession Talitzkyij, Region Perm, Russland, besitzt und dort einen neuen Standort zur Kalidüngemittelproduktion auf Grundlage der bergmännischen Gewinnung fester Sylvinitrohsalze errichtet
AG	Aktiengesellschaft, eine Gesellschaftsform nach deutschem Recht
AGRIUM	AGRIUM INC., ein nordamerikanischer Düngemittelkonzern, der in Saskatchewan, Kanada, an einem Standort Kalidüngemittel aus festen Sylvinitrohsalzen herstellt
Al	Aluminium, chemisches Element
APC	ARAB POTASH COMPANY PLC., ein jordanischer Kaliproduzent, der auf Grundlage der natürlichen, wertstoffarmen Lösungen des Toten Meeres Kalidüngemittelprodukte herstellt

APMC	ASEAN POTASH MINING PUBLIC COMPANY LTD., ein thailändisches Unternehmen, das die Lagerstättenkonzession Bamnet Narong besitzt und dort mit dem sog. *Bamnet-Narong-Project* einen neuen Standort zur Kalidüngemittelproduktion auf Grundlage der Bergmännischen Gewinnung fester Carnallititrohsalze errichtet
APPC	ASIA PACIFIC POTASH CORPORATION LTD., ein thailändisches Unternehmen, das die Lagerstättenkonzession Udon North und Udon South besitzt und dort mit dem sog. *Udon-Project* einen neuen Standort zur Kalidüngemittelproduktion auf Grundlage der bergmännischen Gewinnung fester Sylvinitrohsalze errichtet
BAT	*Best Available Techniques*; siehe BVT
BBergG	Bundesberggesetz, in der Bundesrepublik Deutschland geltendes Gesetz zur systematischen zentralen Regelung des Privatrechts, bestehend aus fünf Büchern.
BGB	Bürgerliches Gesetzbuch
BHP B	BHP BILLITON PLC, das nach der Marktkapitalisierung weltgrößte Bergbauunternehmen, das mehrere Lagerstättenkonzessionen in Saskatchewan, Kanada, besitzt und dort mit dem sogenannten *Jansen-Project* zunächst einen neuen Standort zur Kalidüngemittelproduktion auf Grundlage der Bergmännischen Gewinnung fester Sylvinitrohsalzen errichtet
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz: Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge, in der Bundesrepublik Deutschland geltendes Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge
BKPRU	deutsche Transliteration der russischen Abkürzung БКПРУ für Березниковское Калийное Производственное Рудоуправление, also zu Deutsch: Betriebsverwaltung des Kalibergwerks von Berezniki
BPC	OAO BELARUSIAN POTASH COMPANY, eine weißrussische Vertriebsgesellschaft für Kalidüngemittelprodukte, die bis zum Sommer 2013 die Exportgeschäfte von URALKALI und BELARUSKALI abgewickelt hat
Br	Brom, chemisches Element
BVerfG	Bundesverfassungsgericht
BVT	Beste Verfügbare Technik
Ca	Kalzium, chemisches Element
CAD	*Canadian Dollar*; kanadischer Dollar
CANPOTEX	eine Vertriebsgesellschaft für Kalidüngemittelprodukte, die die Exportgeschäfte der in Saskatchewan produzierten Kalidüngemittel der Produzenten PCS, MOSAIC und AGRIUM abwickelt
Cd	Kadmium, chemisches Element
CEO	*Chief Executive Officer*; geschäftsführendes Vorstandsmitglied
cfr	Incoterm® *cost and freight* (deutsch: Kosten und Fracht) gibt an, dass der Versender die Transport- und Verladekosten bis zum Bestimmungshafen trägt

cif	Incoterm® *cost insurance freight* (deutsch: Kosten, Versicherung, Fracht) gibt an, dass der Versender die Transport-, Verlade- und Versicherungskosten bis zum Bestimmungshafen trägt
CIM	Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum; Kanadisches Institut für Bergbau, Metallurgie und Öl
cm^3	Kubikzentimeter, Maßeinheit für das Volumen, 10^{-6} m^3
CMEA	Council for Mutual Economic Assistance; deutsch: Rat für Gegenseitige Wirtschaftshilfe (RGW), auch unter dem Kunstwort COMECON bekannt; siehe auch СЭВ
COMPASS	COMPASS MINERALS INTERNATIONAL INC., ein US-amerikanisches Unternehmen, welches sulfatische Kalidüngemittel (SOP) auf der Grundlage der natürlichen, wertstoffarmen Lösungen des Great Salt Lake herstellt
Corp./CORP	*Corporation;* Aktiengesellschaft, eine Gesellschaftsform nach nationalem Recht verschiedener Staaten
CPL	CLEVELAND POTASH LTD., ein britischer Kaliproduzent der ICL-Gruppe, der in Großbritannien Kalidüngemittel auf der Grundlage fester Kalirohsalze herstellt
d	Tag, Maßeinheit für die Zeit, umfasst 24 Stunden
DAX	Abkürzung für Deutscher Aktienindex, der wichtigste deutsche Börsenindex. Er spiegelt die Entwicklung der 30 größten und umsatzstärksten Unternehmen wider, die in dem Teilbereich des Regulierten Marktes (sog. *Prime Standard*) mit den höchsten Transparenzstandards an der Frankfurter Wertpapierbörse gelistet sind
DSW	DEAD SEA WORKS LTD., ein israelischer Kaliproduzent der ICL-Gruppe, der auf Grundlage der natürlichen, wertstoffarmen Lösungen des Toten Meeres Kalidüngemittelprodukte herstellt
EG	Europäische Gemeinschaft
ESTA	allgemeine Abkürzung für die elektrostatischen Aufbereitungsverfahren
ESTA®	Patentiertes Verfahren zur Aufbereitung polymineralischer Kalisalze mittels elektrostatischer Separation
EU	Europäische Union
EUR	Euro, Währungseinheit
EUROCHEM	OJSC MINERAL AND CHEMICAL COMPANY EUROCHEM, ein russischer Düngemittelkonzern, der in der Region Volgograd, Russland, die Lagerstättenkonzession Gremyachinsk, und in der Region Perm, ebenfalls in Russland, die Lagerstättenkonzession Kovdorskij-Usolskij besitzt dort mit dem sogenannten *Gremyachinskij-Project* bzw. dem *Kovdorskij-Usolskij-Project* zwei neue Standorte zur Kalidüngemittelproduktion auf Grundlage der bergmännischen Gewinnung fester Sylvinitrohsalze errichtet
FAO	*United Nation Food and Agriculture Organisation*; Organisation für Lebensmittel und Landwirtschaft bei den Vereinten Nationen
fob	Incoterm® *free on board* (deutsch: frei an Bord), gibt an, dass der Versender die Transport- und Verladekosten bis auf das Schiff im vereinbarten Verladehafen trägt
g	Gramm, Maßeinheit für die Masse

g/cm^3	Gramm pro Kubikzentimeter, Maßeinheit für die Dichte
g/l	Gramm pro Liter, Maßeinheit für die Konzentration
GesBergV	Gesundheitsschutz-Bergverordnung, in der Bundesrepublik Deutschland geltende Bergverordnung zum Gesundheitsschutz der Beschäftigten im Bergbau
GI UrO RAN	deutsche Transliteration der russischen Abkürzung ГИУрОРАН für Горный Институт Уральского Отделения Российской Академии Наук, also zu Deutsch: Bergbauinstitut der Uraler Abteilung der Akademie der Wissenschaften Russlands
GmbH/GMBH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung; eine Gesellschaftsform nach deutschem Recht
GUS	Gemeinschaft Unabhängiger Staaten mit den Mitgliedsländern Armenien, Aserbaidschan, Kasachstan, Kirgistan, Moldawien, Russland, Tadschikistan, Turkmenistan, Ukraine, Usbekistan
h	Stunde, Maßeinheit für die Zeit, umfasst 60 Minuten
H_2O	Wasser
ha	Hektar, Maßeinheit für die Fläche; entspricht 10.000 Quadratmeter
HDPE	*High Density Polyethylen*; deutsch: Polyethylen hoher Dichte
Hg	Quecksilber, chemisches Element
ICL IBERIA S & S	ICL IBERIA S & S, ein spanischer Kaliproduzent der ICL-Gruppe, der in Katalonien Kalidüngemittelprodukte aus festen Sylvinitrohsalzen herstellt
ICL	ISRAEL CHEMICALS LTD., der israelische Mutterkonzern der drei Kaliproduzenten DSW, ICL IBERIA und CPL
IFA	*International Fertilizer Industry Association;* Internationale Vereinigung der Düngemittelanwender und -produzenten
Inc./INC.	*Incorporated Company*; Aktiengesellschaft, eine Gesellschaftsform nach nationalem Recht verschiedener Staaten
Incoterm®	*Incoterms*, englisch für International Commercial Terms; zu deutsch "Internationale Handelsklauseln", beschreiben eine Reihe freiwilliger Regeln zur Auslegung handelsüblicher Vertragsformeln im internationalen Warenhandel.
INTREPID	INTREPID POTASH INC., ein US-amerikanischer Kaliproduzent, der bei Moab, Utah, auf Grundlage der Soltechnischen Gewinnung von festen Sylvinitrohsalzen, bei Carlsbad, New Mexico, auf der Grundlage der Bergmännischen Gewinnung von festen Kalirohsalzen und bei Wendover, Utah, auf Grundlage der Gewinnung natürlicher, wertstoffarmer Lösungen Kalidüngemittel herstellt
IVU	Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung; eine Umweltschutzinitiative der EU
J	Jod, chemisches Element
K	Kalium, chemisches Element
°K	Kelvin, Maßeinheit für die thermodynamische Temperatur und für die Temperaturdifferenz

K+S	K+S KALI GMBH, ein deutscher Kaliproduzent, Tochterunternehmen der im DAX notierten K+S-Gruppe, an insgesamt 6 Standorten in Deutschland auf der Grundlage der Bergmännischen Gewinnung von festen Kalirohsalzen Kalidüngemittel herstellt
K_2O	Kaliumoxid
K_2SO_4	Kaliumsulfat, das Kaliumsalz der Schwefelsäure
K60	Standard-Kalidüngemittel mit einem garantierten Kalium-Nährstoffgehalt von 60 Prozent K_2O, auch als KCl95 oder MOP bezeichnet
KCl	Kaliumchlorid, das Kaliumsalz der Salzsäure
KCl95	Standard-Kalidüngemittel mit einem garantierten Kalium-Nährstoffgehalt von 60 Prozent K_2O, auch als K60 oder MOP bezeichnet
KCl98	KCl-Produkt für die industrielle Verwendung mit einem garantierten KCl-Gehalt von 98 Prozent
KCl99	KCl-Produkt für die industrielle Verwendung mit einem garantierten KCl-Gehalt von 99 Prozent
KCl_{equ}	KCl-Äquivalent, relative Maßeinheit für den Kaliumnährstoffgehalt in einem Kalidüngemittel, unabhängig von der chemischen Bindung des Kaliumträgers
kg	Kilogramm, Maßeinheit für die Masse, 1.000 g
km	Kilometer, Maßeinheit für die Länge, 1.000 m
km^2	Quadratkilometer, Maßeinheit für die Fläche, 1.000.000 m^2
KNO_3	Kaliumnitrat, das Kaliumsalz der Salpetersäure
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
kWh	Kilowattstunde, Maßeinheit für die physikalische Arbeit beziehungsweise die Energie
$kWh/t_{Produkt}$	Kilowattstunde pro metrische Tonne Fertigprodukt
Li	Lithium, chemisches Element
Ltd./LTD	*Limited Company*; Kapitalgesellschaft; eine Gesellschaftsform nach nationalem Recht verschiedener Staaten
m	Meter, Maßeinheit für die Länge
m%	Masseprozent, Maßeinheit für eine Konzentration
m^2	Quadratmeter, Maßeinheit für die Fläche
m^3	Kubikmeter, Maßeinheit für das Volumen
m^3/a	Kubikmeter pro Jahr, Maßeinheit für einen Volumenstrom
m^3/d	Kubikmeter pro Tag, Maßeinheit für einen Volumenstrom
m^3/h	Kubikmeter pro Stunde, Maßeinheit für einen Volumenstrom

Mg	Magnesium, chemisches Element
$MgCl_2$	Magnesiumchlorid, das Magnesiumsalz der Salzsäure
$MgSO_4$	Magnesiumsulfat, das Magnesiumsalz der Schwefelsäure
min	Minute, Maßeinheit für die Zeit, umfasst 60 Sekunden
mm	Millimeter, Maßeinheit für die Länge, 0,001 m
MOP	Handelsbezeichnung für chloridische Kalidüngemittel
MOSAIC	THE MOSAIC COMANY, ein US-amerikanischer Düngemittelkonzern, der in New Mexico und Michigan, USA, sowie in Saskatchewan, Kanada, an mehreren Standorten Kalidüngemittel aus festen Sylvinitrohsalzen mit Hilfe bergmännischer und soltechnischer Gewinnungsverfahren herstellt
Na	Natrium, chemisches Element
Na_2CO_3	Natriumkarbonat, das Natriumsalz der Kohlensäure
Na_2SO_4	Natriumsulfat, das Natriumsalz der Schwefelsäure
NaCl	Natriumchlorid, das Natriumsalz der Salzsäure
OAO	Открытое Акционерное Общество, deutsch: Offene Aktiengesellschaft, eine Gesellschaftsform nach dem Recht der Russischen Föderation, der Republik Belarus, der Republik Usbekistan und anderer Staaten
OEEC	*Organisation for European Economic Cooperation*; deutsch: Organisation für europäische wirtschaftliche Zusammenarbeit
OOO	Общества с Ограниченной Ответственностью, deutsch: Gesellschaft mit beschränkter Haftung, eine Gesellschaftsform nach dem Recht der Russischen Föderation, der Republik Belarus, der Republik Usbekistan und anderer Staaten
PAO	Публичное Акционерное Общество, deutsch: Öffentliche Aktiengesellschaft, eine Gesellschaftsform nach dem Recht der Russischen Föderation, die ab dem 01.09.2014 in Kraft getreten ist und die Offene Aktiengesellschaft (OAO) abgelöst hat
PCS	POTASH CORPORATION OF SASKATCHEWAN INC. ein kanadischer Düngemittelproduzent, der in Saskatchewan und New Brunswick, Kanada, Kalidüngemittel aus festen Sylvinitrohsalzen mit Hilfe bergmännischer und soltechnischer Gewinnungsverfahren herstellt
pm	Picometer, Maßeinheit für die Länge, $\frac{1}{1.000.000.000.000}$
RGW	Rat für Gegenseitige Wirtschaftshilfe, siehe auch СЭВ
S	Schwefel, chemisches Element
S.A.	*Sociedad Anónima* oder auch *Société Anonyme*; Aktiengesellschaft mit beschränkter Haftung eine Gesellschaftsform nach nationalem Recht verschiedener Staaten
СЭВ	Совет Экономической Взаимопомощи; russisch für: Rat für Gegenseitige Wirtschaftshilfe (RGW), siehe auch CMEA und RGW

s	Sekunde, Maßeinheit für die Zeit
SILVINIT	OAO SILVINIT, ein früherer russischer Kaliproduzent, der seit Februar 2011 durch eine Fusion Teil des weltweit größten Kalidüngemittelproduzenten URALKALI geworden ist
SINOAGRI	SINOAGRI MINING LTD., ein chinesisches Unternehmen, das in Laos eine Lagerstättenkonzession besitzt und dort mit dem *Dong-Tai-Project* einen neuen Standort zur Kalidüngemittelproduktion auf Grundlage der soltechnischen Gewinnung fester Sylvinitrohsalze errichtet
SINOHYDRO	SINOHYDRO CORP., ein chinesisches Unternehmen, das in Laos eine Lagerstättenkonzession besitzt und dort mit dem *Thangone-Project* einen neuen Standort zur Kalidüngemittelproduktion auf Grundlage der soltechnischen Gewinnung fester Carnallititrohsalze errichtet
SKRU	Deutsche Transliteration der russischen Abkürzung СКРУ für Соликамское Калийное Рудоуправление, also zu Deutsch: Betriebsverwaltung des Kalibergwerks von Solikamsk.
SOP	Handelsbezeichnung für sulfatische Kalidüngemittel
SOPM	Handelsbezeichnung für Düngemittel mit den Nährstoffen Kalium und Magnesium
SQM	SOCIEDAD QUÍMICA Y MINERA DE CHILE S.A., ein chilenischer Kaliproduzent, der an zwei Standorten in der Atacama-Wüste, Chile, Kalidüngemittel aus natürlichen, wertstoffarmen Lösungen herstellt
SRU	Sachverständigenrat der Bundesregierung für Umweltfragen
st	*short ton*, oder auch *American Ton*; US-amerikanische Maßeinheit für die Masse; 1st entspricht 0,9072 t
t	metrische Tonne, Maßeinheit für die Masse, 1.000.000 g
t/a	metrische Tonnen pro Jahr, Maßeinheit für einen Massestrom, berechnet auf ein durchschnittliches Jahr
t/d	metrische Tonnen pro Tag, Maßeinheit für einen Massestrom
t/h	metrische Tonnen pro Stunde, Maßeinheit für einen Massestrom
t/m^3	metrische Tonnen pro Kubikmeter, Maßeinheit für die Dichte
$t/t_{Produkt}$	metrische Tonnen pro metrische Tonne Fertigprodukt, Maßeinheit für eine spezifische Masse
TACIS	*Technical Assistance to the Commonwealth of Independent States*; ein Gemeinschaftsprogramm der Europäischen Union
UNEP	*United Nations Environment Programme*, Programm zum Schutz der Umwelt bei den Vereinten Nationen
UNIDO	*United Nations Industrial Development Organization*; Organisation für Industrielle Entwicklung bei den Vereinten Nationen
URALKALI	PAO URALKALI, der weltweit größte Kalidüngemittelproduzent, der an sechs Standorten in der Region Perm, Russland, auf der Grundlage der Bergmännischen Gewinnung von festen Sylvinitrohsalzen Kalidüngemittel herstellt
USD	*United States Dollar*; US-amerikanischer Dollar, Währungseinheit

UTV	Untertageverwertung
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
VALE	VALE S.A., die frühere Companhia Vale do Rio Doce, ein brasilianisches Bergbauunternehmen, das weltweit tätig ist und im Staat Sergipe am Standort Taquari-Vassouras eine Kalidüngemittelproduktion auf Grundlage der bergmännischen Gewinnung fester Sylvinitrohsalze betreibt
VEB	Volkseigener Betrieb, eine Rechtsform von Industrie- und Dienstleistungsbetrieben in der ehemaligen DDR
VILACHEMSALT	VIETLAO CHEMICAL AND ROCK SALT CO., LTD., ein vietnamesisch-laotisches Gemeinschaftsunternehmen, das in Laos eine Lagerstättenkonzession besitzt und dort mit dem sogenannten *Nonglom-Project* einen neuen Standort zur Kalidüngemittelproduktion auf Grundlage der soltechnischen Gewinnung fester Carnallititrohsalze errichtet
VNIIG	VNIIG deutsche Transliteration der russischen Abkürzung ВНИИГ für Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Галургии, also zu Deutsch: Wissenschaftliches Institut für angewandte Salzforschung in Russland
Vol%	Volumenprozent, Maßeinheit für eine Konzentration
VVB	Vereinigung Volkseigener Betriebe, ein wirtschaftlicher und sozialer Zusammenschluss volkseigener Betriebe mit ähnlichen Produktions- und Erzeugnisstrukturen in der ehemaligen DDR
WDDB	Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages
WHG	Wasserhaushaltsgesetz: in der Bundesrepublik Deutschland geltendes Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts
WPC	WESTERN POTASH CORP., ein Unternehmen, das eine Lagerstättenkonzession in Saskatchewan, Kanada, besitzt und dort mit dem sogenannten *Milestone-Project* einen neuen Standort zur Kalidüngemittelproduktion auf Grundlage der soltechnischen Gewinnung fester Sylvinitrohsalze errichtet
WTO	*World Trade Organization*; Welthandelsorganisation
YUNTIANHU	YUNTIANHU GROUP CORP., ein chinesisches Unternehmen, das in Laos eine Lagerstättenkonzession besitzt und dort einen neuen Standort zur Kalidüngemittelproduktion auf Grundlage der soltechnischen Gewinnung fester Carnallititrohsalze errichtet

GLOSSAR

Abbau	Unter *Abbau* wird zum einen die Tätigkeit der Rohstoffgewinnung und zum anderen der dabei planmäßig mit bergmännischen Verfahren hergestellte Hohlraum verstanden. Überall dort, wo eine Unterscheidung beider Begriffsinhalte angezeigt ist, wird für letzteren der Terminus Abbauhohlraum verwendet.
Abbauverfahren	Der Begriff *Abbauverfahren* steht für die Art und Weise des planmäßigen Abbaus von Lagerstätten, die durch die Abbauform und die Behandlung des *Hangenden* oder aber durch die dabei eingesetzte Maschinentechnik gekennzeichnet ist.
Abbauverluste	Unter dem Begriff *Abbauverluste* werden die Lagerstättenanteile verstanden, die zur Gewährleistung der Standfestigkeit der mit der bergmännischen oder soltechnischen Gewinnung einer Lagerstätte geschaffenen Hohlräume nicht gewonnen werden können, also im Untergrund verbleiben.
Abklappen der Stöße	Unter *Abklappen der Stöße* wird eine auf die primäre Hohlraumschaffung (Primärphase) folgende, nachträgliche Reduzierung der Pfeilerbreite durch den planmäßigen Abbau der Pfeilerstöße (Sekundärphase) mit dem Ziel der Verminderung der *Abbauverluste* verstanden.
Abwetter	Unter *Abwetter* werden die verbrauchten Wetter, also die nach dem Durchgang durch aktive *Panels*/Abteilungen des Bergwerkes hinsichtlich ihrer Gaszusammensetzung und dem Staubgehalt und/oder der Temperatur veränderten Luft, verstanden.
Alter Mann	Als *Alter Mann* werden solche *Grubenbaue* bezeichnet, in denen die Rohstoffgewinnung bereits abgeschlossen ist oder deren ursprüngliche Funktion nicht länger aufrecht erhalten wird, und in denen daher keine kontinuierlichen Sicherungsarbeiten durchgeführt werden, weshalb deren Betreten aus arbeitssicherheitlichen Gründen untersagt ist.
Anhydrit	*Anhydrit* ist ein Salzmineral mit der chemischen Formel $CaSO_4$.

Arbeitssicherheit	Der Begriff *Arbeitssicherheit* bezeichnet den anzustrebenden Zustand der Sicherheit der Beschäftigten bei der Arbeit, also die Beherrschung und Minimierung von Gefahren für ihre Sicherheit und Gesundheit.
Astrakanit	*Astrakanit* ist ein Salzmineral mit der chemischen Formel Na_2SO_4 x $MgSO_4$ x $4H_2O$. Das Tetrahydrat des Natrium-Magnesiumsulfates ist auch unter dem Name Blödit bekannt.
Aufbaugranulierung	Der verfahrenstechnische Begriff *Aufbaugranulierung* steht für Verfahren zur Partikelvergröberung, bei denen vor allem Kapillarkräfte, daneben aber auch Scher- und Druckkräfte eine Vergröberung der Feinkornmasse zu mehr oder weniger dichten kugelförmigen Granalien bewirken. Diese Agglomerationsverfahren werden in einer Rolltrommel, deren Drehachse nur wenig gegen die Horizontale geneigt ist oder auf einem schräg gestellten Granulierteller durchgeführt. In der Kaliindustrie kommt die *Aufbaugranulierung* vorwiegend bei der Produktion von *SOP*, seltener bei *MOP* zum Einsatz. Die *Aufbaugranulierung* wird im deutschen Sprachgebrauch auch als Rollgranulierung bezeichnet.
Aufbereitungsrückstände	Der Begriff *Aufbereitungsrückstände* steht *sensu stricto* für die bei der Aufbereitung der natürlichen Rohstoffe neben den Haupt- und Nebenprodukten unvermeidlich anfallenden Stoffströme, für welche eine *Verwertung* technisch nicht möglich, ökologisch nicht nachhaltig oder wirtschaftlich nicht machbar ist und die folglich als bergbauliche Abfälle gemäß der Bergbauabfallrichtlinie (AbfRiLi 2006, /8/) einer *Beseitigung* zugeführt werden müssen. Die Aufbereitungsrückstände *sensu stricto* sind im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland (KrWG 2012, /568/) den bergbaueigenen Abfällen gleichzusetzen. Der Begriff *Aufbereitungsrückstände* steht *sensu lato* aber – insbesondere in der öffentlichen Diskussion zum Abfallmanagement bei der Kalidüngemittelproduktion – vielfach auch für die Gesamtheit der bei der Aufbereitung der natürlichen Rohstoffe neben den Haupt- und Nebenprodukten unvermeidlich anfallenden Stoffströme, für welche entweder eine *Verwertung* möglich oder aber die *Beseitigung* als bergbauliche Abfälle notwendig ist. In der Kaliindustrie wird zwischen *festen* und *flüssigen Aufbereitungsrückständen* unterschieden.
Aus- und Vorrichtung	Unter *Aus- und Vorrichtung* werden die bergmännischen Tätigkeiten verstanden, die der Erschließung einer Lagerstätte im Nebengestein des Gewinnungshorizontes sowie dem Anschluss von Abbaufeldern im Gewinnungshorizont selbst dienen. Zumindest bei der Erschließung werden in der Regel langlebige, also über einen großen Teil der gesamten Lebensdauer des Bergwerkes nutzbare *Grubenbaue* angelegt.
Ausbau	Unter dem Begriff *Ausbau* werden zum einen die Tätigkeiten zur Sicherung der *Firsten und Stöße* beziehungsweise zum Offenhalten der *Grubenbaue* und zum anderen alle dabei eingesetzten Stützelemente, Hinterfüllelemente und -stoffe sowie Gebirgsanker verstanden.
Ausbringen	Der Begriff *Ausbringen* steht für die Wertstoffausbeute eines Aufbereitungsprozesses. Das *Ausbringen* bezeichnet in der Kaliindustrie den prozentualen Anteil des im geförderten *Rohsalz* enthaltenen KCl und anderer Wertstoffe, welcher sich letztendlich im verkaufsfähigen Produkt wiederfindet.
Ausfrieren	Der verfahrenstechnische Begriff *Ausfrieren* steht für die natürliche Kristallisation des KCl einer technischen Lösung infolge Abkühlung.
Ausgehendes	Der Begriff *Ausgehendes*, auch als *Ausbiss* oder *Ausstrich* bekannt, steht für den Bereich, in dem die im Bergwerk aufgeschlossene Schichtenfolge die Erdoberfläche erreicht.

Außerbilanzvorräte	Der Begriff *Außerbilanzvorräte* steht in einem in den Staaten des ehemaligen CMEA gültigen beziehungsweise heute nur noch in einzelnen Ländern, darunter in der Russischen Förderation, der Republik Belarus und China, üblichen Klassifikationsprinzip für die nachgewiesenen Rohstoffressourcen, deren Nutzung nach den zum Zeitpunkt der Erkundung bestehenden technisch-ökonomischen Konditionen nicht möglich, zukünftig aber denkbar ist. Innerhalb dieser Vorratsgruppe wurde nach steigendem Untersuchungsgrad in die Klassen c2, c1 unterschieden.
Berauben	Unter *Berauben* wird das Bereinigen und Sichern der *Firsten und Stöße* von abgelösten und/oder aufgelockerten Gesteinsfragmenten verstanden. Im Kalibergbau erfolgt dies in der Regel mit der sogenannten Beraubemaschine, einem speziellen Bergbaugroßgerät.
Berechtsame	Unter dem Begriff *Berechtsame*, oder auch *Abbaugerechtigkeit*, wird das Recht zur Gewinnung und Nutzung von Rohstoffen in einem bestimmten Bergwerksfeld verstanden. Der Begriff stammt aus dem preußischen Allgemeinen Berggesetz von 1865 und stellt den Rechtsanspruch auf die Verleihung von Gewinnungs- und Nutzungsrechten bergfreier Bodenschätze dar. Im Rahmen dieses Buches wird der Begriff *Berechtsame* allgemein zur Beschreibung der einem Bergbautreibenden für ein Bergwerksfeld erteilten Rechte zur Gewinnung und Nutzung von Rohstoffen genutzt, unabhängig davon, ob diese nach nationalem Recht bergfreie oder grundeigene Bodenschätze darstellen.
Bergbausicherheit	Der Begriff *Bergbausicherheit* bezeichnet den anzustrebenden Zustand der Sicherheit eines Bergwerkes und der darin befindlichen Personen und Anlagen sowie der oberirdischen Bevölkerung in den vom Bergbau betroffenen Gebieten, den dort vorhandenen baulichen und Infrastruktureinrichtungen, Naturressourcen sowie des Landschaftsbildes. Er beinhaltet explizit ebenfalls die mit den langfristigen Folgen eines aktivem oder inaktivem Bergbaus möglicherweise ausgehenden Gefahren und Schäden an baulichen und Infrastruktureinrichtungen, Naturressourcen sowie des Landschaftsbildes und den zu einer gegebenenfalls notwendigen Schadensregulierung erforderlichen Ewigkeitslasten. Mit seinen Geltungsbereichen in den vom Bergbau betroffenen Gebieten und auf die bergbaueigene Nachbetriebsphase besitzt dieser Begriff eine große Schnittmenge zum stärker abstrakten Begriff der *Öffentlichen Sicherheit*.
Bergemühle	Der bergmännische Begriff *Bergemühle* bezeichnet einen speziell zum Zwecke der Gewinnung von Bergen, das heisst wertstofffreien/-armen Materials, für Versatzzwecke angelegten Grubenhohlraum. Der bergmännischer Begriff Berge bezeichnet das in der Regel bei der Gewinnung anfallende, unter bestimmten Umständen auch gezielt abgebaute wertstofffreie oder -arme Gestein, das für die Erzeugung von verkaufsfähigen Produkten nicht nutzbar ist.
Bergmännische Gewinnung	Der Begriff *Bergmännische Gewinnung* steht für das Herauslösen anstehender Gesteine aus dem Gebirgsverband mittels bergmännischer *Gewinnungsmethoden*. Die *bergmännische Gewinnung* von Kalisalzen im untertägigen Bergwerksbetrieb geschieht durch die Methoden des *Bohrens und Sprengens* oder die der *Schneidenden Gewinnung*.
Bergtechnik	Unter *Bergtechnik* werden in diesem Buch alle stationären technischen Anlagen und alle mobilen technischen Ausrüstungen zusammengefasst, die zur Gewinnung fester Mineralsalze mittels bergmännischer *Gewinnungsmethoden* unter Tage als Ausgangsstoffe für die Herstellung von Kalidüngemitteln erforderlich sind und eingesetzt werden.
Beseitigung	Im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland (KrWG 2012, /568/) bezeichnet *Beseitigung* eine Art der *Entsorgung* von bergbaulichen Abfällen, die für den Teil dieser Stoffströme zur Anwendung kommt, der keiner *Verwertung* zugeführt werden kann. Die Anwendung dieser Begriffsbestimmung erfolgte sinngemäß auch für Standorte der Kalidüngemittelproduktion außerhalb des Geltungsbereiches des Kreislaufwirtschaftsgesetzes.

Bewetterung	Unter *Bewetterung* wird die planmäßige Versorgung des *Grubengebäudes* mit *Frischwettern*, das heißt mit frischer atmosphärischer Luft, verstanden.
Bilanzvorräte	Der Begriff *Bilanzvorräte* steht in einem in den Staaten des ehemaligen CMEA gültigen beziehungsweise heute nur noch in einzelnen Ländern, darunter in der Russischen Föderation, der Republik Belarus und China, üblichen Klassifikationsprinzip für die nachgewiesenen Rohstoffressourcen, deren Nutzung nach den zum Zeitpunkt der Erkundung bestehenden technisch-ökonomischen Konditionen möglich ist. Innerhalb dieser Vorratsgruppe wurde nach steigendem Untersuchungsgrad in die Klassen C2, C1, B, A unterschieden.
Bischofit	*Bischofit* ist ein Salzmineral mit der chemischen Formel $MgCl_2 \times 6H_2O$.
blanket	Der soltechnische Begriff *blanket* steht für ein Sperrmittel, also ein nicht-salzlösendes Medium, zum Beispiel Rohöl, Propan, Butan, Stickstoff oder auch Pressluft, das leichter als die das Kavernenvolumen ausfüllenden technischen Lösungen ist und daher über diesen, am hangenden Kontakt zum Wirtsgestein lagert und einen vertikal nach oben gerichteten Lösungsfortschritt verhindert.
Blockschüttverfahren	Der Begriff *Blockschüttverfahren* steht für ein am Boden beginnendes Aufschüttverfahren von *kompakten Schüttguthalden*. Hierbei werden lagenweise Blöcke in definierten Abmessungen aufgeschüttet. Es resultiert ein Wachstum der Halde sowohl in Länge und Breite als auch in die Höhe.
Bodenkörper	Unter *Bodenkörper* wird der beim Kristallisationsprozess aus wässrigen Lösungen absinkende Feststoff bezeichnet.
Bohren und Sprengen	Der Begriff *Bohren und Sprengen* steht für eine diskontinuierlich arbeitende, bergmännische *Gewinnungsmethode*, bei der Teile des Rohstoffkörpers mit Hilfe von Sprengungen gezielt aus dem Gebirge herausgelöst werden. Der dafür genutzte Sprengstoff wird in Sprengbohrlöcher eingebracht, welche zuvor nach einem speziellen Bohrschemata in den zu lösenden Gebirgskörper gebohrt und in spezieller Zündfolge gesprengt wurden.
Bromcarnallit	*Bromcarnallit* ist ein Salzmineral mit der chemischen Formel $KCl\text{-}MgBr_2 \times 6H_2O$.
Brüden	Der verfahrenstechnische Begriff *Brüden* steht für den bei technischen Eindampfprozessen entstehenden Wasserdampf, der auch Anteile von Mineralsalzen enthalten kann.
Carnallit	*Carnallit* ist ein Kalisalzmineral mit der chemischen Formel $KCl \times MgCl_2 \times 6H_2O$. Der K_2O-Gehalt von *Carnallit* beträgt 16,9 Masse Prozent. Seine $MgCl_2$- und Kristallwasseranteile sind die maßgebliche Ursache für den Anfall größerer Mengen flüssiger Rückstände beim Aufbereitungsprozess.
Carnallitit	*Carnallitit* ist ein Kalisalzgestein, dessen Hauptkaliumträger das Mineral Carnallit ist.
CMEA	Die Abkürzung CMEA steht für die englische Bezeichnung *Council for Mutual Economic Assistance* (auch COMECON; russisch: Совет Экономической Взаимопомощи: СЭВ), zu deutsch: Rat für Gegenseitige Wirtschaftshilfe (RGW). CMEA war eine internationale Organisation der sozialistischen Staaten unter Führung der Sowjetunion, die im Jahre 1949 als sozialistisches Pendant zum Marshallplan und zur Organisation für europäische wirtschaftliche Zusammenarbeit (OEEC) gegründet und im Zuge der in den Mitgliedsstaaten in den späten 1980er Jahren erfolgten politischen Umwälzungen im Jahr 1991 aufgelöst wurde.

continuous miner	Der Begriff *continuous miner* steht für elektrisch betriebene, auf Selbstfahrwerken installierte Gewinnungsmaschinen, die sich – Bohrwerkzeugen gleich – schneidend oder schrämend kontinuierlich durch das Gebirge bewegen und auf diese Weise Teile des Rohstoffkörpers herauslösen. Sie können dabei den aufzufahrenden *Grubenbau* durch Bearbeiten des vollen Querschnittes in Einem (*Vollschnittmaschinen*) oder aber durch abschnittsweises Bearbeiten des Querschnittes (*Teilschnittmaschinen*) herstellen.
Decken	Der verfahrenstechnische Begriff *Decken* steht für einen Reinigungsschritt in der Aufbereitung von Kalirohsalzen. Dabei wird das flotierte oder kristallisierte KCl mit frischem, kaltem Wasser versetzt, wobei vorzugsweise NaCl gelöst wird. Es schließt sich ein Filtrationsschritt an, wobei das Filtrat in der Regel erneut einer Kristallisation zurückgeführt wird, um die mitgelöste Menge an KCl wiederzugewinnen.
Dickstoffversatz	Unter *Dickstoffversatz* (auch als Pumpversatz bezeichnet) wird ein Versatzmaterial verstanden, welches aus festen bergbaufremden Abfällen oder unlöslichen *Aufbereitungsrückständen* der Kalidüngemittelproduktion und einem Bindemittel sowie einer Anmischlösung besteht. Das Versatzmaterial wird in pumpfähiger Form angemischt, über Rohrleitungen in die Versatzhohlräume eingebracht und härtet dort aus.
Doppelsalze	Der Begriff *Doppelsalze* steht für anorganische Salze mit mehreren verschiedenen Kationen (im hier zur Rede stehenden Fall: Na^+, Mg^{2+}, K^+, Ca^{2+}) und/oder verschiedenen Anionen (Cl^-, SO_4^{2-}).
Eindampfung	Unter *Eindampfung* wird die Aufkonzentration von natürlichen oder technischen Lösungen durch Wärmeeinwirkung und damit verbundenen Entzug des Lösungsmittels Wasser verstanden, die zur Wertstoffanreicherung genutzt wird.
Elektrostatische Sortierung	Der Begriff *elektrostatische Sortierung* steht für ein trockenes Trennverfahren für körnige Materialien, bei dem die verschiedenartigen Eigenschaften der Minerale bei der Aufladung der Teilchen im elektrischen Feld als Wirkprinzip ausgenutzt werden.
Entfestigung der Tragelemente	Bei Abbau von Kalirohsalzen unterliegen Salzgesteine in den *Tragelementen*, den sogenannten *Pfeilern*, einem Verformungsprozess, der zu ihrer zeitabhängigen Entfestigung, das heißt also zu einem Verlust an mechanischer Festigkeit führt.
Entsorgung	Entsorgung wird im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland (KrWG 2012, /568/) als der Oberbegriff für alle Verfahren und Tätigkeiten genutzt, die der Beseitigung oder *Verwertung* von bergbaulichen Abfällen, hier speziell der bei der Kalidüngemittelproduktion unvermeidbar anfallenden festen und flüssigen Gewinnungs- und *Aufbereitungsrückstände* dienen. Die Anwendung dieser Begriffsbestimmung erfolgte sinngemäß auch für Standorte der Kalidüngemittelproduktion außerhalb des Geltungsbereiches des Kreislaufwirtschaftsgesetzes.
Entwässerter Spülversatz	*Entwässerter Spülversatz* ist ein alternativer Begriff für *Feuchtversatz* (siehe dort).
Epsomit	*Epsomit* ist ein Salzmineral mit der chemischen Formel $MgSO_4 \times 7H_2O$. In der Chemie und Pharmazie ist das Heptahydrat des Magnesiumsulfates auch unter dem Trivialnamen Bittersalz bekannt.
Evaporationsbecken	Ein *Evaporationsbecken* ist eine Fläche die durch Dämme von der Umgebung abgegrenzt ist, so dass kein Austausch von Lösung oder Wasser zwischen dem Becken und der Umgebung erfolgen kann. Über die Lösungsoberfläche findet eine Verdunstung von Wasser statt, die von Faktoren wie Luftfeuchte, Niederschlag, Temperatur, Sonneneinstrahlung und Wind beeinflusst wird. Ziel dabei ist die Gewinnung einer aufkonzentrierten Lösung oder eines kristallisierten Feststoffes für eine weitere Aufbereitung.

F/E-Arbeiten

F/E-Arbeiten sind planmäßige Programme zur angewandten Forschung und Entwicklung von industrietauglichen Methoden, Verfahren und Anlagen, vielfach in Kooperation zwischen universitären/akademischen und/oder industrienahen Forschungseinrichtungen und Industriebetrieben.

Feuchtversatz

Unter *Feuchtversatz* oder auch *entwässertem Spülversatz* wird ein dem *Spülversatz* ähnliches, jedoch durch Zentrifugieren in seinem Feuchtegehalt reduziertes Versatzmaterial verstanden. Der *Feuchtversatz* enthält beim Einbringen in die Abbauhohlräume weniger als 5 Prozent Restfeuchte. Die technischen Verfahren und Methoden zum Einbringen dieses Versatzmaterials in die Abbauhohlräume werden als *Feuchtversatzverfahren* zusammengefasst.

Firste

Unter *Firste* wird die obere Begrenzung eines söhligen oder geneigten Grubenbaus (z.B. Strecken- bzw. Abbaufirste) verstanden.

Firstfall

Unter *Firstfall* wird das ungewollte Herabfallen von Gesteinsfragmenten aus der *Firste* verstanden.

Firstedrücken

Der Begriff *Firstedrücken* steht für eine auf die primäre Hohlraumschaffung am *Liegenden* des Gewinnungshorizontes (Primärphase) folgende, nachträgliche Erweiterung der Abbauhöhe indem weitere, über dem ursprünglichen Firstniveau lagernde Lagerstättenanteile abgebaut werden (Sekundärphase).

Firstenstoßbau mit Versatz

Der Begriff *Firstenstoßbau mit Versatz* steht für ein *Abbauverfahren* in der *Steilen Lagerung*, bei welchem die Lagerstätte von unten nach oben in mehreren Abbauscheiben hereingewonnen wird. Nach der Gewinnung der jeweiligen Scheibe wird Versatz in den Abbau transportiert, wo der untere Hohlraumbereich versetzt und der Versatz gegebenenfalls anschließend mit entsprechender Technik verdichtet wird. Danach erfolgt auf dem Versatz die Gewinnung der darüber liegenden Abbauscheibe. Die Abbauhohlräume werden bei diesem Verfahren nahezu komplett mit dem Versatzmaterial versetzt.

Flache Lagerung

Der Begriff *Flache Lagerung* steht bei der Einteilung von Lagerstätten nach dem Einfallen für solche Lagerstätten, deren durchschnittlicher Neigungswinkel gegenüber der Horizontalen, das sogenannte Generaleinfallen, zwischen 0 gon (0°) und 20 gon (18°) beträgt. Während diese exakte Definition über den Einfallswinkel insbesondere für den Kohlebergbau zielführend anzuwenden ist, kann diese Terminologie nur sinngemäß auf Kali- und Steinsalzlagerstätten angewendet werden. Hier bezeichnet die *Flache Lagerung* insbesondere eine annähernd horizontale oder auch mit einigen Neigungsgraden einfallende Evaporitfolge, die keine oder nur geringe Störungen der primären Sedimentationsabfolge durch halokinetische Prozesse erfahren hat. Innerhalb einer solchen kann es dennoch lokal zu Neigungen der individuellen Rohstoffkörper kommen, die über die eingangs genannten Neigungswinkel des Generaleinfallens hinausgehen.

Flankenschüttverfahren

Der Begriff *Flankenschüttverfahren* steht für ein vom Haldenplateau beginnendes Aufschüttverfahren von *kompakten Schüttguthalden*. Hierbei werden lagenweise Segmente die Flanke herab aufgeschüttet. Es resultiert ein Wachstum der Halde in Länge und Breite, nicht oder nur weniger in der Höhe.

Flotation

Der Begriff *Flotation* steht für ein mechanisches Trennverfahren, welches die unterschiedliche Bindungsfähigkeit der Rohstoffbestandteile an Konditionierungsmittel (Sammler) und die daraus resultierende unterschiedliche Oberflächenbenetzbarkeit der Rohstoffbestandteile nutzt. In einer Suspension lagern sich Gasblasen an die Rohstoffbestandteile mit schlechter Oberflächenbenetzbarkeit an und transportieren diese an die Oberfläche, wo sie, von den übrigen Rohstoffbestandteilen getrennt, abgezogen werden können.

Frischwetter	Unter dem Begriff *Frischwetter* wird die atmosphärische Luft verstanden, die einem Bergwerk über die Tagesöffnungen zugeführt wird.
Fugat	Der verfahrenstechnische Begriff *Fugat* steht für die in einer Zentrifuge vom Feststoff abgetrennte Flüssigkeit. Das *Fugat* enthält dennoch einen gewissen Feststoffanteil von etwa 60–100 Gramm pro Liter.
Geologische Vorräte	Der Begriff *Geologische Vorräte* umfasst natürliche mineralische Rohstoffe von ökonomischem Wert, welche durch Erkundungsmaßnahmen sowie entsprechende Probenahmen identifiziert und bewertet wurden und welche durch weiteren Erkenntniszuwachs und unter Berücksichtigung und Anwendung von technischen, wirtschaftlichen, rechtlichen, ökologischen, sozioökonomischen und behördlichen Faktoren zu gewinnbaren Vorräten klassifiziert werden können. *Geologische Vorräte* oder engl. *Mineral Resources* werden mit zunehmendem geologischem Kenntnisstand in die Kategorien *Inferred, Indicated* und *Measured* unterteilt. *Geologische Vorräte* der Kategorie *Inferred* können im Vergleich zu geologischen Vorräten der Kategorie *Indicated* anhand weniger vorhandener geologischer Daten identifiziert werden. Geologische Vorräte der Kategorie *Indicated* wiederum basieren auf weniger geologischen Daten als *geologische Vorräte* der Kategorie *Measured*.
Gewinnbare Vorräte	Den *Geologischen Vorräten* werden die *Gewinnbaren Vorräte*, oder englisch *Mineral Reserves* als eine Teilmenge der ersteren gegenübergestellt. *Gewinnbare Vorräte* werden je nach dem der Bewertung zugrunde liegenden Kenntnisstand in die Kategorien *Probable* und *Proven* unterteilt. *Gewinnbare Vorräte* der Kategorie *Probable* basieren auf einem niedrigeren Kenntnisstand der geologischen Rahmenbedingungen als *gewinnbare Vorräte* der Kategorie *Proven*. Nach der international gebräuchlichen Klassifikation des *Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum* (CIM), repräsentieren die *Gewinnbaren Vorräte* den wirtschaftlich abbaubaren Teil der Geologischen Vorräte der Kategorien *Measured* oder *Indicated*, welche mindestens durch eine vorläufige Machbarkeitsstudie nachgewiesen werden müssen. Diese Studie muss angemessene Informationen zu Abbau-, Aufbereitungs-, metallurgischen, wirtschaftlichen und anderen relevanten Faktoren beinhalten, die demonstrieren, dass eine wirtschaftliche Gewinnung der Vorräte zum Zeitpunkt der Berichtserstattung gerechtfertigt werden kann. *Gewinnbare Vorräte* berücksichtigen Vertaubungszonen sowie *Abbauverluste*.
Gewinnungsmethode	Der Begriff *Gewinnungsmethode* steht für Verfahren zum Herauslösen eines zu gewinnenden Gesteins aus dem festen Gebirgsverband zum Zwecke der weiteren Nutzung.
Gewinnungsrückstände	Der Begriff *Gewinnungsrückstände* steht für die beim Prozess der Rohstoffgewinnung unter Tage aus berg- oder maschinentechnischen und/oder bergbausicherheitlichen Gründen unvermeidbar mit abgebauten wertstofffreien beziehungsweise -armen Gesteinsvolumina.
Gips	*Gips* ist ein Salzmineral mit der chemischen Formel $CaSO_4 \times 2H_2O$.
Glaserit	*Glaserit* ist ein Kalisalzmineral mit der chemischen Formel $3K_2SO_4 \times Na_2SO_4$. Der K_2O-Gehalt von *Glaserit* beträgt 42,5 Masseprozent.
Glauberit	*Glauberit* ist ein Salzmineral mit der chemischen Formel $Na_2SO_4 \times CaSO_4$.
Grenzwinkel	Der bergschadenkundliche Begriff des *Grenzwinkels* bezeichnet den auf die Horizontale bezogenen Neigungswinkel der Verbindungslinie vom *Liegenden* der Abbaukante unter Tage bis zum Senkungsrand über Tage und dient der Abgrenzung des durch Abbau beeinflussten Bereiches der Tagesoberfläche von dem durch die Absenkungen unbeeinflussten Bereich (Niemczyk 1949, /708/).

Großgerätetechnik	Der Begriff *Großgerätetechnik* steht für die im untertägigen Bergbau eingesetzte gleislose Gewinnungs- und Fördertechnik.
Grubenbaue	Der Begriff *Grubenbaue* steht für planmäßig bergmännisch hergestellte Hohlräume unter Tage, wie zum Beispiel Strecken, Schächte und Abbaue und wird im Singular für einen einzelnen, an einer spezifischen Lokation befindlichen und in definierten Abmessungen dimensionierten Hohlraum verwendet. Abstrakter werden die in Gestalt der Grubenbaue im Wirtsgestein angelegten und aufgrund der gebirgsmechanischen Verformungsprozesse in ihrer Gestalt und Größe über die Zeit veränderlichen Volumina als Grubenhohlraum oder auch im Plural als Grubenhohlräume bezeichnet.
Grubengebäude	Das *Grubengebäude* ist die Gesamtheit aller bergmännisch hergestellten *Grubenbaue* eines Bergwerks.
Halit	*Halit* ist ein Salzmineral mit der chemischen Formel NaCl, auch als Steinsalz oder Kochsalz bekannt
Hangendes	Der Begriff *Hangendes* steht für die Schichtenfolge, die über dem Gewinnungshorizont lagert
Hartsalz	*Hartsalz* ist eine in Deutschland übliche bergmännische Bezeichnung für Kalisalzgesteine, die aufgrund ihrer sulfatischen Beimengungen, vor allem *Anhydrit* ($CaSO_4$) und *Kieserit* ($MgSO_4 \times H_2O$), beim Bohren besondere Härte aufweisen. Der Hauptkaliumträger im *Hartsalz* ist der *Sylvin* (KCl), weshalb das *Hartsalz* also auch ein *Sylvinit* ist. *Hartsalze* enthalten außerdem *Halit* (NaCl) und wechselnde Anteile sulfatischer und/oder polysulfatischer Salzminerale sowie Tonminerale.
Haufwerk	Im bergmännischen Sprachgebrauch wird unter *Haufwerk* das aus dem Gebirgsverband herausgelöstes Gestein verstanden.
Hauptgrubenlüfter	Unter dem *Hauptgrubenlüfter* wird der für die *Bewetterung* benötigte Lüfter, der den Gesamtwetterstrom aufrecht erhält, verstanden.
HDR-Verfahren	Das *Hot-Dry-Rock-Verfahren* (*kurz: HDR*) ist ein Verfahren zur Nutzung der in der Erdkruste enthaltenen Erdwärme, das gewöhnlich in Tiefen zwischen 3.000 und 6.000 Metern Anwendung findet. Das Verfahren beruht darauf, dass im Gesteinsverband zwischen den Fördersonden durch die Schaffung großer Kontaktflächen zwischen dem heißen Gestein und dem Trägermedium ein effektiver Wärmeaustausch geschaffen wird, was in der Regel durch hydraulisch induzierte Rissbildung erreicht wird.
Heißverlösung	Der Begriff *Heißverlösung* steht für ein thermisches Trennverfahren, welches die unterschiedliche Löslichkeit der einzelnen Rohsalzkomponenten ausnutzt. Dieses Verfahren ist die älteste Aufbereitungsmethode für feste Kalirohsalze überhaupt.
Hydraulischer Versatz	Unter *hydraulischem Versatz* (Spül- bzw. Dickstoffversatz) wird ein Versatzverfahren verstanden, bei dem der Transport des Versatzmaterials in Form einer Suspension oder eines Dickstoffes durch ein geschlossenes Rohrleitungssystem bis zu den einzelnen Einleitpunkten (Spülpunkten) in die Grubenhohlräume unter Tage erfolgt. Umgangssprachlich wird dieser Begriff auch für das mit diesem Verfahren eingebrachte Versatzmaterial selbst genutzt.
Hydrometamorphose	Der Begriff *Hydrometamorphose*, auch *Lösungsmetamorphose* genannt, steht für solche stofflichen und strukturellen Umwandlungsprozesse in salinaren Gesteinen, die auf eine Einwirkung von wäßrigen Lösungen zurückgehen und Mineralreaktionen, Stofftransporte, einschließlich der Änderungen in der Elementverteilung, und/oder Gefügeveränderungen versursachen.

Hydrozyklon

Hydrozyklone sind Fliehkraftabscheider für Flüssiggemische beziehungsweise Suspensionen. Mit *Hydrozyklonen* können Gemische unterschiedlicher Flüssigkeiten (z.B. Öl-Wasser-Gemisch) voneinander getrennt werden, oder Feststoffe aus einer Suspension separiert beziehungsweise klassiert werden. In der Kaliindustrie wird mittels *Hydrozyklon* meist die eingebrachte Suspension in einen feststoffreichen Unterlauf und einen feststoffarmen Oberlauf getrennt. Hierbei erfolgt auch eine Klassierung. Die feinen Feststoffbestandteile gehen in den feststoffarmen Oberlauf und die groben Feststoffbestandteile in den feststoffreichen Unterlauf.

Industriekali

Als *Industriekali* werden solche verkaufsfähigen Kalifertigprodukte bezeichnet, die keine Anwendung als Düngemittel in der Landwirtschaft finden, sondern Ausgangsstoffe für die industrielle Herstellung chemischer, pharmazeutischer oder Nahrungsgüterprodukte sind.

K-Mg-Düngemittel

Die Bezeichnung *K-Mg-Düngemittel* steht für solche Kalidüngemittelprodukte, die neben einer Kaliumnährstoffkomponente auch Magnesiumsulfat ($MgSO_4$) enthalten und besonders wirtschaftlich nur auf Grundlage sulfatischer Kalilagerstätten hergestellt werden können (siehe auch *SOPM*).

K_2O

Die Bezeichnung *K_2O* oder *Kaliumoxid* wird traditionell genutzt, um den Kaliumwertstoffgehalt von Rohsalzen oder Kalifertigprodukten unabhängig von der anionischen Komponente Chlorid oder Sulfat zu beschreiben.

Kainit

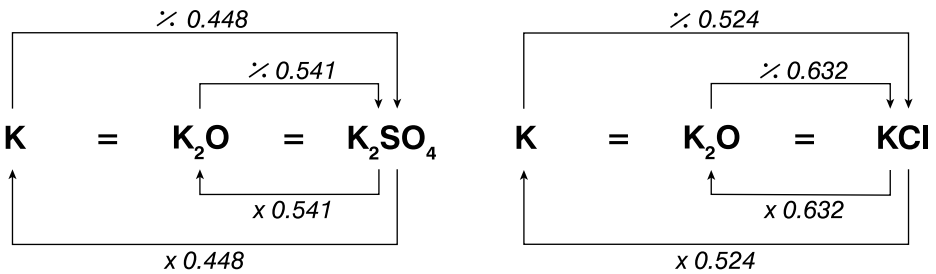
Kainit ist ein Kalisalzmineral mit der chemischen Formel $4KCl \times 4MgSO_4 \times 11H_2O$. Der K_2O-Gehalt von *Kainit* beträgt 19,3 Masseprozent.
Kainit steht auch als Handelsname für ein Kalidüngemittelprodukt. Hier steht der Handelsname *Kainit* für solche Düngemittelprodukte, die neben der Kalium-Nährstoffkomponente auch Magnesiumsulfat ($MgSO_4$) und Natrium (Na) enthalten und als Nebenprodukt der Kalidüngemittelproduktion auf Grundlage sulfatischer Kalilagerstätten hergestellt werden können.

Kainitit

Kainitit ist ein Kalisalzgestein, dessen Hauptkaliumträger das Mineral *Kainit* ist.

Kaliumwertstoffgehalt

Traditionell wird der *Kaliumwertstoffgehalt* für Rohsalze und/oder Kali-Fertigprodukte in K_2O angegeben, unabhängig von seiner anionischen Bindung. Das nachfolgende Bild zeigt die Konversion zwischen den tatsächlich im Rohstoff oder Produkt enthaltenen Kaliumträger, der traditionellen Wertstoffangabe K_2O und dem Kaliumgehalt:



Kammerpfeilerbau mit langen Pfeilern

Der Begriff *Kammerpfeilerbau mit langen Pfeilern* steht für ein *Abbauverfahren*, welches durch das Auffahren von nebeneinander angeordneten langgestreckten Kammern gekennzeichnet ist, die durch regelmäßige langgestreckte *Pfeiler* begrenzt werden. Das Verfahren wird auch kurz als Langkammerabbau bezeichnet.

Kammerpfeilerbau mit quadratischen/rechteckigen Pfeilern

Der Begriff *Kammerpfeilerbau mit quadratischen/rechteckigen Pfeilern* steht für ein *Abbauverfahren*, welches durch das Auffahren von rechtwinklig zueinander angeordneten Kammern gekennzeichnet ist, zwischen denen quadratische oder rechteckige *Pfeiler* stehenbleiben.

KCl_{equ}	*KCl_{equ}* steht als Kurzbezeichnung für KCl-Äquivalent, ein Maß für den Kaliumnährstoffgehalt in einem Kaliprodukt, das der Vergleichbarkeit von Produktionsmengen unabhängig von der Art des Kalidüngemittels dient.
Kieserit	*Kieserit* ist ein Salzmineral mit der chemischen Formel $MgSO_4$ x H_2O. *Kieserit* wird hauptsächlich zur Herstellung sulfatischer Düngemittel und/oder K-Mg-Düngemittel verwendet. Der Handelsname *Kieserit* steht für solche Düngemittelprodukte, die als Nährstoffkomponenten Magnesium und Schwefel enthalten und als Nebenprodukt der Kalidüngemittelproduktion auf Grundlage sulfatischer Kalilagerstätten hergestellt werden können.
Kombinat	Der Begriff *Kombinat* ist ein juristischer, wirtschaftlicher und sozialer Zusammenschluss von Industriebetrieben, die hinsichtlich ihrer Produktionabläufe eng verknüpft sind, zu einem Großbetrieb in der ehemaligen DDR.
Kompakte Schüttguthalde	Der Begriff *kompakte Schüttguthalde* bezeichnet einen Typ von Rückstandshalden der Kaliindustrie, der durch Ablagerung teilweise entwässerter fester Rückstände als rieselfähiges Schüttgut entsteht.
Kühlkristallisation	Der Begriff *Kühlkristallisation* steht für ein Aufbereitungsverfahren, bei dem die unterschiedliche Temperaturabhängigkeit der Löslichkeit von KCl und NaCl ausgenutzt wird (vergleiche auch *Ausfrieren*).
Kuppenabbau	Der Begriff *Kuppenabbau* steht für ein *Abbauverfahren*, welches durch das Auffahren von langgestreckten Kammern mit großer Kammerhöhe gekennzeichnet ist, denen jeweils ein großer massiver *Pfeiler* als Stützelement für das *Hangende* zugeordnet wird. Dieses *Abbauverfahren* wurde speziell für den versatzlosen Abbau von carnallitischen Anstauungen mit großen Lagermächtigkeiten zwischen 25 Meter und 80 Meter im Werra-Kalirevier entwickelt.
Kuppenstrossbau	Der Begriff *Kuppenstrossbau* steht für ein *Abbauverfahren*, welches durch das Auffahren von langgestreckten Kammern am *Hangenden* des Gewinnungshorizontes und dem anschließenden Strossen bis zum Liegenden des Gewinnungshorizontes gekennzeichnet ist. Den Kammern wird jeweils ein großer massiver Pfeiler als Stützelement für das *Hangende* zugeordnet. Dieses *Abbauverfahren* wurde speziell für den versatzlosen Abbau mittlerer carnallitischer Lagermächtigkeiten zwischen 12 Meter und 25 Meter im Werra-Kalirevier entwickelt.
Langbeinit	*Langbeinit* ist ein Kalisalzmineral mit der chemischen Formel $2MgSO_4$ x K_2SO_4. Der K_2O-Gehalt von *Langbeinit* beträgt 22,7 Masseprozent.
Langbeinitisch-polyhalitische Rohsalze	Der Begriff *langbeinitisch-polyhalitische Rohsalze* steht für Kalisalzgesteine, die neben dem Kaliumträger *Sylvin* auch höhere Anteile der *Doppelsalze Langbeinit* und *Polyhalit* enthalten.
Leonit	*Leonit* ist ein Kalisalzmineral mit der chemischen Formel K_2SO_4 x $MgSO_4$. Der K_2O-Gehalt von *Leonit* beträgt 25,7 Masseprozent.
Liegendes	Der Begriff *Liegendes* steht für die Schichtenfolge, die unter dem Gewinnungshorizont lagert.
Loeweit	*Loeweit* ist ein Salzmineral mit der chemischen Formel $6Na_2SO_4$ x $7MgSO_4$ x $15H_2O$.
Löser	Als *Löser* werden Gesteinsfragmente bezeichnet, die als Folge der bergmännischen Vortriebsarbeiten ihre Kohäsion zum Gesteinsverband partiell verloren haben. Da sie von Firsten und/oder Stößen der *Grubenbaue* herabfallen können, stellen sie Gefahren für die Arbeitssicherheit dar und müssen daher durch Einsatz spezieller Maschinen beseitigt werden. Dieser Vorgang wird als *Berauben* bezeichnet.

Lösungsmetamorphose	Der Begriff *Lösungsmetamorphose*, auch *Hydrometamorphose* genannt, steht für solche stofflichen und strukturellen Umwandlungsprozesse in salinaren Gesteinen, die auf eine Einwirkung von wäßrigen Lösungen zurückgehen und Mineralreaktionen, Stofftransporte, einschließlich der Änderungen in der Elementverteilung, und/oder Gefügeveränderungen versursachen.
LTF-Technik	Der Begriff *LTF-Technik* steht für Ladetransportfahrzeugtechnik, oder englisch LHD für *Load-Haul-Dump*, und bezeichnet Bergbaugroßgeräte zum selbstständigen Laden und Transportieren und Abkippen des Haufwerkes beziehungsweise der zu versetzenden Rückstände. Die *LTF-Technik* ist seit Mitte der 1960er Jahre im Einsatz.
Mächtigkeit	Der Begriff *Mächtigkeit* steht für die wahre Dicke einer Gesteinsschicht, bestimmt durch den kleinsten Abstand zwischen ihren Begrenzungsflächen und wird hier im Sinne des geologischen Terminus der *wahren Mächtigkeit* genutzt.
Mirabilit	*Mirabilit* ist ein Salzmineral mit der chemischen Formel Na_2SO_4 x $10H_2O$. In der Chemie und Pharmazie ist das Dekahydrat des Natriumsulfates auch unter dem Trivialnamen Glaubersalz bekannt.
Mischsalz	Der Begriff *Mischsalz* steht für ein *Rohsalz*, dessen Kaliumwertstoffträger einmal der *Sylvin* aus dem *Hartsalz* und/oder dem Sylvinit und zum anderen der Carnallit aus dem Carnallitit ist. Daneben enthalten diese *Rohsalze* in der Regel auch sulfatische Wertstoffkomponenten, wie zum Beispiel *Kieserit*.
MOP	Der international übliche Handelsname *MOP* steht als Abkürzung für *Muriate of Potash*, das heißt für solche Kalidüngemittelprodukte, die Kaliumchlorid (KCl) als Träger der Kalium-Nährstoffkomponente enthalten und auf Grundlage sowohl chloridischer als auch sulfatischer Kalilagerstätten hergestellt werden können. Im deutschen Sprachgebrauch wird *MOP* traditionell aufgrund seines K_2O-Gehaltes von 60 Prozent auch als K60 bezeichnet. Seltener wird auch aufgrund seines KCl-Gehaltes von 95 Prozent die Bezeichnung KCl95 genutzt.
Nachhaltigkeit	Der Begriff *Nachhaltigkeit* wird im Rahmen des vorliegenden Buches im Sinne des sogenannten *Brundland-Reports* an die 42. Generalversammlung der Vereinten Nationen verwendet, wonach dauerhaft stabile Gesellschaften nur zu erreichen sind, indem ökologische, ökonomische und soziale Ziele nicht konkurrieren, sondern gleichrangig angestrebt werden. Eben dieser, alle drei Ebenen des gesellschaftlichen Lebens gleichrangig behandelnde Ansatz wurde von der Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages zum sogenannten *Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit* weiter ausgestaltet, was auch dem Leitmotiv einer ökologischen Modernisierung der Industriegesellschaft nicht widerspricht.
Nachhaltigkeitsgebot	Im allgemeinen Sprachgebrauch steht das *Nachhaltigkeitsgebot* für die Forderung, jede Tat auf Generationen- und globale Chancengerechtigkeit hin auszuwerten und nach Möglichkeit in diesem Sinne zu erweitern, um somit mit geringerem Ressourceneinsatz längere Zeit bestehen zu können.
Nanofiltration	Der verfahrenstechnische Begriff *Nanofiltration* steht für ein druckgetriebenes Membranverfahren zur Trennung von Stoffgemischen, das Partikel im Nanometer-Bereich zurückhält.
Natürliche Lösungen	Unter *natürlichen Lösungen* werden gering wertstoffhaltige Lösungen verstanden, die in Oberflächengewässern, sogenannten Salzseen, oder aber als Porenwässer in oberflächennahen Grundwasserleitern gespeichert sind.

Öffentliche Sicherheit	Der hier verwendete abstrakte Rechtsbegriff *Öffentliche Sicherheit* umfasst den Schutz vor Schäden, die entweder Gemeinschafts- oder Individualgütern drohen. In dem hier zur Rede stehenden Kontext zählen die verfassungsmäßige Ordnung, besonders der Bestand des Staates und seiner Einrichtungen und dessen rechtmäßiges Funktionieren, sowie die Rechtsordnung in ihrer Gesamtheit zu den gemeinschaftlichen, insbesondere das Leben, die Gesundheit, die Freiheit und das allgemeine Persönlichkeitsrecht des Einzelnen zu den individuellen Schutzgütern. Er entspricht also weitgehend dem gleichlautenden Grundbegriff im Polizei- und Ordnungsrecht der Bundesrepublik Deutschland.
Panel	Unter *Panel* wird eine räumlich abgegrenzte Gewinnungseinheit im Bergwerk, oftmals im Sinne einer von Infrastrukturstrecken umfahrenen Abbaufläche verstanden, in der die Rohstoffgewinnung durch das Auffahren einer Vielzahl von Abbaukammern erfolgt.
Pfeiler	Unter *Pfeiler* wird der als Stütz- oder Tragelement des Hangenden zur Gewährleistung der Bergbausicherheit stehen bleibende Lagerstättenteil zwischen den einzelnen Grubenhohlräumen verstanden.
Pfeilersplitting	Der Begriff *Pfeilersplitting* steht für eine auf die primäre Hohlraumschaffung (Primärphase) folgende, nachträgliche Reduzierung der Pfeilerbreite durch *Abklappen der Stöße* (Sekundärphase).
Playa	Der Begriff *Playa* steht in den Geowissenschaften für eine flache, hauptsächlich von Tonsedimenten erfülltes Sedimentationsbecken in semiariden Klimazonen, das temporär durch Niederschlagswasser und/oder aufsteigendem Grundwasser überflutet wird. In ihrer reinen Form unterscheiden sich diese Evaporite von den vorwiegend durch Kapillarströmung gebildeten Sabkha-Evaporiten durch ihr Gefüge und auch im Stoffbestand (Purser 1985, /791/; Kendall 1992, /515/), was nach ihrer Ablagerung aber durch vielfältige Prozesse überprägt sein kann. Im Gegensatz zu Sabkhasedimenten sind die Ablagerungen in Playas von fluviatilen oder lakustrinen Einflüssen dominiert (Handford 1981, /368/).
Pneumatischer Versatz	Unter *pneumatischem Versatz* wird ein *Versatzverfahren* verstanden, bei dem das Versatzmaterial pneumatisch unter einem bestimmten Druck in einer geschlossenen Rohrleitung von über Tage nach unter Tage in die betreffenden Grubenhohlräume transportiert und diese damit versetzt werden. Umgangssprachlich wird dieser Begriff auch für das mit diesem Verfahren eingebrachte Versatzmaterial selbst genutzt.
Polyhalit	Mineral mit der chemischen Formel $K_2Ca_2Mg[SO_4]_4 \times 2H_2O$. Der K_2O-Gehalt von *Polyhalit* beträgt 15,6 Masseprozent.
Polyhalitit	*Polyhalitit* ist ein sulfatisches Kalisalzgestein, dessen Hauptkaliumträger das Mineral *Polyhalit* ist.
Presskompaktierung	Der Begriff *Presskompaktierung* steht für ein mechanisches Kompaktierungsverfahren feinkörniger Zwischenprodukte zu Vielkornagglomeraten.
Prognostische Vorräte	Der Begriff *Prognostische Vorräte* steht in einem früher in den Staaten des COMECON gültigen beziehungsweise heute nur noch in einzelnen Ländern, darunter in der Russischen Föderation, der Republik Belarus und China, üblichen Klassifikationsprinzip für die Rohstoffressourcen, die mit wissenschaftlichen Methoden begründet voraussagbar sind, jedoch im Vorratsfeld gar nicht (Vorratsklasse δ2) oder nur unzureichend (Vorratsklasse δ1) aufgeschlossen sind.
RGW	Die Abkürzung *RGW* steht für Rat für Gegenseitige Wirtschaftshilfe (*RGW*). Heute ist diese Organisation im deutschen Sprachraum vor allem unter der englischsprachigen Abkürzung *COMECON* bekannt, weshalb dieser Begriff im Rahmen dieses Buches Verwendung findet.

Rinneit	*Rinneit* ist ein Kalisalzmineral mit der chemischen Formel $FeCl_2$ x 3KCl x NaCl. *Rinneit* reduziert den pH-Wert der Prozesslösungen erheblich, so dass es bei der Aufbereitung *Rinneit*-führender Rohsalze zu verstärkter Korrosion an Behältern und Rohrleitungen der Fabrik kommt.
Rohsalz	Unter *Rohsalz* wird das bergmännisch gewonnene, unverarbeitete, feste Kalisalz verstanden, das durch eventuell bei der Gewinnung beibrechende nicht-kaliführenden Mineralsalze in seinem Wertstoffgehalt verdünnt, nach über Tage gefördert und der Aufbereitungsanlage zugeführt wird.
Sabkha	Der Begriff *Sabkha*, deutsch eigentlich Sabcha, ist ein phonetisch vom arabischen Wort سبخة, das eine küstennahen Salzmarsch bezeichnet, abgeleitet und in den Geowissenschaften für ein sehr flaches, nur temporär mit Meer- oder Niederschlagswasser oder aufsteigendem Grundwasser gefülltes Sedimentationsbecken in semiariden Klimazonen reserviert. Die in Sabkhas auftretenden Evaporite entstehen vor allem durch die Kapillarströmung, die von der Verdunstung an der Oberfläche angetrieben wird. In ihrer reinen Form unterscheiden sich diese Evaporite von den im stehenden Wasser sedimentierten durch ihr Gefüge und auch im Stoffbestand (Purser 1985, /791/; Kendall 1992, /515/), was nach ihrer Ablagerung aber durch vielfältige Prozesse überprägt sein kann. Im Gegensatz zu Playasedimenten sind die Ablagerungen in Sabkhas von marinen Einflüssen dominiert (Handford 1981, /368/). Synonym gebräuchlich sind auch die Begriffe Sebkha, Sebkhat, Sebkhet.
Schachtförderung	Unter *Schachtförderung* wird der vertikale Transport des Rohstoffes über Blindschächte zwischen zwei Sohlen oder über Tagesschächte von unter Tage nach über Tage verstanden.
Schlagwetter	Unter dem Begriff *Schlagwetter* wird ein explosionsfähiges Gasgemisch von Luft und 5 bis 14 Volumenprozent Methan verstanden.
Schleuderversatz	Unter *Schleuderversatz* wird ein *Versatzverfahren* verstanden, bei dem das Versatzmaterial per Förderband zum Versatzort gefördert und dort mit einem schnell laufenden Schleuderband in den zu füllenden Grubenhohlraum geschleudert wird. Der Begriff wird teilweise auch für das mit diesem Verfahren eingebrachte Versatzmaterial genutzt.
Schneidende Gewinnung	Der Begriff *Schneidende Gewinnung* steht für eine kontinuierlich arbeitende, bergmännische *Gewinnungsmethode*, bei der die anstehenden Rohstoffe mittels Gewinnungsmaschinen schneidend oder schrämend aus dem Gebirgsverband herausgelöst werden.
Schönit	*Schönit* ist ein Salzmineral mit der chemischen Formel K_2SO_4 x $MgSO_4$ x $6H_2O$. Der K_2O-Gehalt von *Schönit* beträgt 23,4 Masseprozent. Das Hexahydrat des Kalium-Magnesiumsulfates ist auch unter dem Name Pikromerit bekannt.
Schülpe	Bei der Presskompaktion wird das Korngut in den Walzenpressen einer Kraft ausgesetzt, wodurch die Partikel ähnlich wie bei der Briquettierung zu einer kohäsiven Masse verdichtet werden. Diese Masse wird als *Schülpe* bezeichnet.
secondary mining	Als *secondary mining* wird der zweite Zyklus einer Kavernensolung auf sylvinitischen Lagerstätten bezeichnet, wobei mit Hilfe eines NaCl-vorkonzentrierten Lösungsmittels die selektive Auflösung der Wertstoffkomponente KCl angestrebt wird.
seiger	Der Begriff *seiger*, auch *saiger,* ist ein im Bergbau und in der Geologie genutztes Synonym für senkrecht, lotrecht oder vertikal.
Soda	Natriumkarbonat mit der chemischen Formel Na_2CO_3. Die chemische Synthese von Soda erfordert unter anderem NaCl.

Sofortversatz	Der Begriff *Sofortversatz* steht für das bei der *bergmännischen Gewinnung* vor allem bei der Aus- und Vorrichtung in Lagerstätten anfallende Steinsalzhaufwerk (vgl. *Gewinnungsrückstände*), welches beim Prozess der Rohstoffgewinnung direkt unter Tage verbleibt und in zu versetzende Grubenhohlräume eingebracht wird.
Sohle	Unter *Sohle* wird die untere Begrenzung eines söhligen oder geneigten *Grubenbaus* (z.B. Strecken- bzw. Abbausohle) verstanden. Weiterhin steht der Begriff *Sohle* für die Gesamtheit der annähernd in einem Niveau aufgefahrenen Grubenbaue.
söhlig	Der Begriff *söhlig* ist ein im Bergbau oder in der Geologie genutztes Synonym für waagerecht oder horizontal
Solare Evaporation	Der Begriff *Solare Evaporation* steht für ein *Aufbereitungsverfahren*, bei dem die Sonneneinstrahlung zur Verdunstung der Wasseranteile einer technischen oder natürlichen Lösung genutzt wird, wobei entweder die Lösung für folgende Aufbereitungsschritte vorkonzentriert wird oder direkt die Kalisalzminerale kristallisieren und somit von der Lösung abgetrennt werden.
Soltechnische Gewinnung	Der Begriff *Soltechnische Gewinnung* steht für alle technischen Prozesse, die zur Herauslösung von Wertstoffen aus festen Mineralsalzen im geologischen Untergrund mit Hilfe von Lösungsmitteln zur Erzeugung von technischen Lösungen, als Ausgangsstoffe für die Herstellung von Kalidüngemitteln, erforderlich sind.
Solvent	Der aus dem Lateinischen entlehnte Begriff *solvent* entstammt im hier verwendeten Zusammenhang der angelsächsischen, insbesondere der US-amerikanischen Fachliteratur und bezeichnet das für die soltechnische Gewinnung von Mineralsalzen eingesetzte Lösungsmittel. Das *Solvent* kann sowohl aus reinem Wasser (nicht-selektive Solverfahren) oder auch aus vorkonzentrierten Salzlösungen (selektive Solverfahren) bestehen.
SOP	Der international übliche Handelsname *SOP* steht als Abkürzung für *Sulphate of Potash*, das heißt für solche hochwertigen Kalidüngemittelprodukte, die Kaliumsulfat (K_2SO_4) als Träger der Kaliumnährstoffkomponente enthalten und wirtschaftlich sowie ökologisch besonders effizient nur auf Grundlage sulfatischer Kalilagerstätten hergestellt werden können.
SOPM	Der international übliche Handelsname *SOPM* steht als Abkürzung für *Potassium Magnesium Sulphate*, das heißt für solche Kalidüngemittelprodukte, die neben Kaliumsulfat (K_2SO_4) als Träger der Kaliumnährstoffkomponente auch Magnesiumsulfat ($MgSO_4$) enthalten und besonders wirtschaftlich nur auf Grundlage sulfatischer Kalilagerstätten hergestellt werden können.
Spülhalde	Der Begriff *Spülhalde* bezeichnet einen Typ von Rückstandshalden der Kaliindustrie, der durch die Ablagerung fester Rückstände als Suspension und deren am Ablagerungsort stattfindenden Entwässerung entsteht.
Spülversatz	Unter *Spülversatz* wird ein *Versatzverfahren* verstanden, bei dem das Versatzmaterial aus festen Rückständen der Aufbereitung und anhaftender Transportlösung besteht und hydraulisch über Rohrleitungen von über Tage zu den Grubenhohlräumen transportiert wird. Die zum größten Teil wieder aus dem Versatzmassiv drainierende Transportlösung wird in speziellen Sammelbecken gesammelt und wiederverwertet. Umgangssprachlich wird dieser Begriff auch für das mit diesem Verfahren eingebrachte Versatzmaterial selbst genutzt.
Stapelräume	Der Begriff *Stapelräume* steht für untertägige Hohlräume, in denen flüssige Rückstände aus der Rohstoffaufbereitung oder dem Bergwerk zutretende Lösungen deponiert werden. Man spricht in diesem Zusammenhang auch vom Einstapeln der Lösungen.

Stapelversatz	Unter *Stapelversatz* wird ein *Versatzverfahren* verstanden, bei dem der Transport, Umschlag und Einbau des Versatzmaterials in Gebinden (z.B. in *Big-Bags*) erfolgt und die Grubenhohlräume damit verfüllt werden. Umgangssprachlich wird dieser Begriff auch für das mit diesem Verfahren eingebrachte Versatzmaterial selbst genutzt..
Steile Lagerung	Der Begriff *Steile Lagerung* steht bei der Einteilung von Lagerstätten nach dem Einfallen für solche Lagerstätten, deren durchschnittliche Neigungswinkel gegenüber der Horizontalen, das sogenannte Generaleinfallen, zwischen 60 gon (54°) und 100 gon (90°) beträgt. Während diese exakte Definition über den Einfallswinkel insbesondere für den Kohlebergbau zielführend anzuwenden ist, kann diese Terminologie nur sinngemäß auf Kali- und Steinsalzlagerstätten angewendet werden. Hier bezeichnet die *Steile Lagerung* insbesondere die Verhältnisse an den Flanken von Salzdiapiren und -antiklinalen.
Stoß	Unter *Stoß* wird die seitliche, mehr oder weniger vertikal verlaufende Begrenzung eines *Grubenbaus* (z.B. Strecken- bzw. Abbaustoß) verstanden
Stoßfall	Unter *Stoßfall* wird das ungewollte Herabfallen von Gesteinsfragmenten aus den *Stößen* verstanden.
Strebbau	Der Begriff *Strebbau* steht für ein *Abbauverfahren* in der *Flachen Lagerung* mit gelenktem Zubruchgehen des *Hangenden*. Im von zwei Seiten durch Kopf- und Fußstrecke aufgeschlossenen Abbau wird in einer Strebgasse auf langer Front die gesamte Lagermächtigkeit vollflächig maschinell (z.B. mittels *Walzenschrämlader*) hereingewonnen. Die Strebgasse wird durch einen hydraulischen vollmechanisierten Ausbau gegen das Hereinbrechen des *Hangenden* in den Arbeitsraum geschützt. Hinter dem Ausbau gehen die Hangendschichten mit dem Fortschreiten des Abbaus planmäßig zu Bruch.
stress relief mining	Unter *stress relief mining* wird ein bergmännisches Verfahren zur Auffahrung von dauerstandsicheren Infrastrukturstrecken unter gebirgsmechanisch anspruchsvollen Bedingungen verstanden. Dabei werden vor Auffahrung der Infrastrukturstrecke zu beiden Seiten vorab Begleitstrecken aufgefahren. Zwischen den Strecken bleiben nachgiebige Pfeiler stehen, so dass die Auflast des Deckgebirges nur auf die Begleitstrecken und -pfeiler übertragen wird.
Strossen	Der Begriff *Strossen* steht für eine nachträgliche Erweiterung der Abbauhöhe, indem nach der primären Hohlraumschaffung am Hangenden des Gewinnungshorizontes (Primärphase) weitere, unter dem ursprünglichen Sohlenniveau lagernde Lagerstättenanteile abgebaut werden (Sekundärphase).
Sturzversatz	Unter *Sturzversatz* wird ein *Versatzverfahren* für den Einsatz in steilstehenden oder geneigten Abbauen verstanden, bei dem Versatzmaterial von Strecken am *Hangenden* unter Nutzung der Schwerkraft in den Grubenhohlraum eingebracht wird. .
Subrosionssenke	Der Begriff *Subrosionssenke* bezeichnet eine Geländeform, welche durch unterirdische Auflösung und Verfrachtung leichtlöslicher Gesteine und Nachbrechen beziehungsweise Absenken der überlagernden Gesteine entstanden ist. Als Folge irregulärer Subrosion, die abseits des Ausgehenden lösefähiger Gesteinsverbände an Bruchstörungen und/oder vulkanischen Durchschlagsröhren auftritt, haben sich räumlich begrenzte *Subrosionssenken* gebildet, die zum Beispiel für die hydrogeologische Situation im Werra-Kalirevier oder in ähnlicher Weise auch an der Oberen Kama bedeutsam sind.
Sylvin	*Sylvin* ist ein Kalisalzmineral mit der chemischen Formel KCl. Der K_2O-Gehalt von *Sylvin* beträgt 63,2 Masseprozent. *Sylvin* ist wesentlicher Wertstoffträger der Hartsalze und Sylvinite.

Sylvinit	*Sylvinit* ist ein Kalisalzgestein, dessen Hauptkaliumträger das Mineral Sylvin ist.
Syngenit	*Syngenit* ist ein Kalisalzmineral mit der chemischen Formel K_2SO_4 x $CaSO_4$ x H_2O. Der K_2O-Gehalt von *Syngenit* beträgt 28,7 Masseprozent.
Tachyhydrit	*Tachyhydrit* ist ein Salzmineral mit der chemischen Formel $2MgCl_2$ x $CaCl_2$ x $12H_2O$.
TACIS	Die Abkürzung *TACIS* steht für "*Technical Assistance to the Commonwealth of Independent States*", einem Gemeinschaftsprogramm der Mitgliedsstaaten der EU zur Förderung der Demokratisierung, zur Stärkung der Rechtsstaatlichkeit und zum Übergang zur Marktwirtschaft in den aus dem Zusammenbruch der Sowjetunion hervorgegangenen Neuen Unabhängigen Staaten (NUS). Zielländer für dieses Finanzierungsinstrumentarium waren Armenien, Aserbaidschan, Belarus, Georgien, Kasachstan, Kirgisistan, Moldau, Mongolei, Usbekistan, Russland, Tadschikistan, Turkmenistan und die Ukraine. Ein Schwerpunkt war dabei die Stärkung des Umweltschutzes und Bewirtschaftung der natürlichen Ressourcen durch Rechtsangleichung an die Gemeinschaftsordnung sowie Entwicklung von Regularien zur nachhaltigen Bewirtschaftung der natürlichen Ressourcen.
Technische Lösung	Der Begriff *technische Lösung* steht für die durch Soltechnische Gewinnung erzeugten wertstoffreichen Salzlösungen, die, auch als Produktionslösungen bezeichnet, für die Kalidüngemittelproduktion genutzt werden.
Teilflächenabbau	Der bergschadenkundliche Begriff *Teilflächenabbau* steht für den Abbau von Rohstoffen innerhalb einer Fläche, bei der sich die geneigten Schenkel des von allen Abbaukanten nach innen abgetragenen *Grenzwinkels* in einem Punkt unterhalb der Tagesoberfläche schneiden (Niemczyk 1949, /708/).
Teilschnittmaschine	Der Begriff *Teilschnittmaschine* steht für eine elektrisch betriebene, auf Selbstfahrwerken beziehungsweise auf einem Trogkettenförderer fahrbar installierte Gewinnungsmaschine, die in mehreren Arbeitsgängen (Teilschnitten) den Grubenhohlraum (Strecke bzw. Abbau) herstellt.
Teufe	Der Begriff *Teufe* steht für die Tiefenlage einer Lagerstätte, eines Rohstoffkörpers, einer geologischen Formation oder aber eines Grubenhohlraumes unter der Tagesoberfläche.
Thenardit	*Thenardit* ist ein Salzmineral mit der chemischen Formel Na_2SO_4.
Thermometamorphose	Der Begriff *Thermometamorphose* steht für solche stofflichen und strukturellen Umwandlungsprozesse in salinaren Gesteinen, die auf eine Temperatureinwirkung zurückgehen und Mineralreaktionen, Stofftransporte, einschließlich der Änderungen in der Elementverteilung, und/oder Gefügeveränderungen versursachen.
Tonlöser	Als *Tonlöser* werden einige Millimeter bis wenige Zentimeter mächtige Tonlagen im Salzgestein bezeichnet, entlang derer der Gesteinsverband im Zuge der bergmännisch induzierten Verformungsprozesse seine Kohäsion verliert und eine Zerteilung oder mindestens die Ablösung einzelner Fragmente erfährt.
Totalabbau	Unter *Totalabbau* wird der flächig vollständige Abbau von Rohstoffen innerhalb eines *Panels*/einer Abteilung, jedenfalls eines in seiner Fläche begrenzten Abschnittes des Gewinnungsbergwerkes verstanden. Aufgrund der in diesem Abschnitt dann fehlenden Stützelemente geht beim *Totalabbau* das hangende Gebirge hinter der Abbaufront planmäßig zu Bruch, soweit die Hangendschichten nicht durch das Einbringen *Versatz* unmittelbar hinter der fortschreitenden Abbaufront und in unmittelbarer zeitlicher Folge auf den Abbauvorgang gestützt werden.

Trockenversatz	Unter *Trockenversatz* wird das Einbringen trockener Rückstände mittels verschiedener maschineller Verfahren in die vorhandenen Grubenhohlräume verstanden. Umgangssprachlich wird dieser Begriff auch für das mit diesem Verfahren eingebrachte Versatzmaterial selbst genutzt.
Überkorn	Unter *Überkorn* wird der Anteil der Feststoffe eines Stoffstroms verstanden, der bei einer Siebung nicht durch das Sieb hindurchgeht.
Umkehr-Osmose	Der Begriff *Umkehr-Osmose* steht für ein Verfahren zur Aufkonzentrierung von Lösungen, bei dem mit Druck die natürliche Osmose, das heißt der natürliche gerichtete Fluss molekularer Teilchen durch eine selektivpermeable Trennschicht, umgekehrt wird.
Unterkorn	Unter *Unterkorn* wird der Anteil der Feststoffe eines Stoffstroms verstanden, der bei einer Siebung durch das Sieb hindurchgeht.
Untertageverwertung	Der Begriff *Untertageverwertung (UTV)* steht für die Verwertung von Abfällen unter Nutzung ihrer bauphysikalischen Eigenschaften zu bergtechnischen oder bergsicherheitlichen Zwecken unter Tage. Dabei wird das zu verwertende Material als *Versatz* in zu stabilisierende Grubenhohlräume eingebracht.
Vanthoffit	*Vanthoffit* ist ein Salzmineral mit der chemischen Formel $3Na_2SO_4$ x $MgSO_4$.
Verdünnung	Unter *Verdünnung* wird die Verringerung des *Wertstoffgehaltes* im geförderten Massenstrom verstanden, die aus der Beimengung von wertstofffreien oder -verarmten Gesteinsvolumina im Fördergut resultiert, welche aus verfahrenstechnischen Gründen beibrechen oder gewonnen werden müssen.
Verfahrenstechnik	Unter *Verfahrenstechnik* werden in diesem Buch alle technischen Prozesse zusammengefasst, die für die Aufbereitung fester Mineralsalze und natürlicher oder technischer Lösungen zur Herstellung von Kalidüngemitteln und ihrer Nebenprodukte erforderlich sind.
Versatz	Unter Versatz wird – zunächst ganz unabhängig von seiner Herkunft – ein Abfall- oder Baustoffmaterial verstanden, mit dem die Abbauhohlräume eines Bergwerks verfüllt werden. In der Regel kommen Abfallmaterialien, auch Rückstände genannt, als Versatz zum Einsatz. Der Herkunft nach kann zwischen Versatz *bergbaueigener* und *bergbaufremder* Abfälle unterschieden werden. *Bergbaueigene* Abfälle entstammen den Gewinnungs- und Aufbereitungsprozessen der Rohstoffe. Der Versatz *bergbaufremder* Abfälle nutzt dagegen solche Stoffe, die anderen Wertschöpfungskreisläufen entstammen und aufgrund ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften als Versatzmaterial geeignet sind.
Versatzverfahren	Der Begriff *Versatzverfahren* steht für die Art und Weise des Transportes und Einbringens des *Versatzes* in die untertägigen Grubenhohlräume.
Verschnitt/Verschneiden	Die Begriffe *Verschnitt* beziehungsweise *Verschneidung* stehen für das Mischen verschieden wertstoffhaltiger Rohstoffströme mit dem Ziel, eine optimale Zusammensetzung für den nur in engen Bandbreiten ökonomisch wie ökologisch effizienten Aufbereitungsprozess zu erreichen.
Verwertung	Im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland (KrWG 2012, /568/) bezeichnet *Verwertung* eine Art der *Entsorgung* von bergbaulichen Abfällen, die für den Teil dieser Stoffströme zur Anwendung kommt, dessen chemische und/oder physikalische Eigenschaften ausgenutzt werden können und daher die Möglichkeit einer Verwendung dieser besteht. Die Anwendung dieser Begriffsbestimmung erfolgte sinngemäß auch für Standorte der Kalidüngemittelproduktion außerhalb des Geltungsbereiches des Kreislaufwirtschaftsgesetzes.

Vollflächenabbau	Der bergschadenkundliche Begriff *Vollflächenabbau* steht für den Abbau von Rohstoffen innerhalb einer Fläche, bei der sich die geneigten Schenkel des von allen Abbaukanten nach innen abgetragenen *Grenzwinkels* in einem Punkt an der Tagesoberfläche schneiden (Niemczyk 1949, /708/).
Vollschnittmaschine	Der Begriff *Vollschnittmaschine* steht für eine elektrisch betriebene, auf Selbstfahrwerken installierte Gewinnungsmaschine, die in einem Arbeitsgang (Vollschnitt) den aufzufahrenden *Grubenbau* herstellt.
Walzenschrämlader	Der Begriff *Walzenschrämlader* steht für eine *Teilschnittmaschine*, die auf einem Trogkettenförderer verfahrbar installiert ist und ausschließlich im Strebbau in *Schneidender Gewinnung* kontinuierlich den Abbauhohlraum herstellt.
Weitungsbau mit Versatz	Der Begriff *Weitungsbau mit Versatz* steht für ein *Abbauverfahren* in der *Steilen Lagerung*, bei dem zunächst ausgehend von den Hauptsohlen im *Hangenden* und *Liegenden* des Abbaus mehrere Teilsohlen aufgefahren werden. Anschließend wird von der unteren Teilsohle beginnend das Lager im strossenartigen Verhieb durch *Bohren und Sprengen* bis zur oberen Hauptsohle gewonnen. Nach dem Auffahren des Abbauhohlraumes wird dieser komplett mit *Trockenversatz* verfüllt.
Wertstoffgehalt	Der Begriff *Wertstoffgehalt* steht in der Kaliindustrie für den Anteil an K_2O für die Kaliumkomponente und/oder $MgSO_4$ (Kieserit) für die Magnesiumkomponente im *Rohsalz*.
Wetter	Unter *Wetter* wird die Gesamtheit der im Bergwerk befindlichen Gase, einschließlich der durch die Tagesöffnungen zutretenden Luft verstanden.
Yield Mining	Der Begriff *yield mining* steht für ein bergmännisches *Abbauverfahren* mit nicht dauerstandsicher dimensionierten Zwischenpfeilern innerhalb eines *Panels* mit dem Ziel der Verringerung der Abbauverluste im *Panel*. Die Auflast des Deckgebirges wird von dauerstandsicher dimensionierten *Pfeilern* am Rand des *Panels* aufgenommen.
Zwischenförderung	Unter *Zwischenförderung* wird der Transport des Wertstoffes im Bergwerk verstanden, der zwischen die Abbauförderung und die Hauptstreckenförderung geschaltet ist.

REFERENZEN

/1/ AACE (2005): AACE International Recommended Practice No. 18R-97. Cost Estimate Classification System –As Applied In Engineering, Procurement, And Construction For The Process Industries.- TCM Framework: 7.3 –Cost Estimating and Budgeting. AACE International - The Authority for Total Cost Management, 2 February 2005.

/2/ AACE (2012): AACE International Recommended Practice No. 47R-11. Cost Estimate Classification System –As Applied In The Mining And Mineral Processing Industries.- TCM Framework: 7.3 –Cost Estimating and Budgeting. AACE International - The Authority for Total Cost Management, Revised 6 July 2012.

/3/ ABAO (1967): Gesetzblatt der Deutschen Demokratischen Republik - Arbeitsschutz- und Brandschutzanordnung 120/1 - Technische Sicherheit im Bergbau (TSB).- vom 25. Januar 1963, in der Fassung der Anordnung Nr. 1 zur Änderung der Arbeitschutz- und Brandschutzordnung 120 - Technische Sicherheit im Bergbau (TSB) vom 14. Juli 1967. Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik. November 1967, Berlin.

/4/ Abasov, F. (2012): Allana Potash: Developing Africa's First Potash Mine.- In: Abstracts & Lectures, Anniversary Symposium Potash Fertilizer Production in the 21st Century - 60 Years of Potash Engineering Made in Erfurt - 20 Years of ERCOSPLAN Group of Companies; Erfurt, 09. November 2012, 66 - 67.

/5/ ABBergV (1995): Allgemeine Bundesbergverordnung vom 23. Oktober 1995 (BGBl. I S. 1466), zuletzt durch Artikel 5, Absatz 5 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert.

/6/ Abel, J. F. (1969): Rock Mechanics - Can It Pay Its Way?.- In: Proceedings Third Symposium on Salt, Cleveland, Ohio, 21. - 24. Mai 1969, 197 - 207.

/7/ AbfDep (1999): Richtlinie 1999/31/EG des Rates vom 26. April 1999 über Abfalldeponien.

/8/ AbfRiLi (2006): Richtlinie 2006/21/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. März 2006 über die Bewirtschaftung von Abfällen aus der mineralgewinnenden Industrie und zur Änderung der Richtlinie 2004/35/EG (Bergbauabfallrichtlinie).

/9/ AbfRRL (2008): Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19.11.2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien (Abfallrahmenrichtlinie) (ABl. L 312, S. 3).

/10/ Achorn, F. P. & Balay, H. L. (1985): Developments in Potassium Fertilizer Technology.- In: Mundson, R. D. (Hrsg.): Potassium in Agriculture, Proceedings of an International Symposium, Atlanta, Georgia, 07. - 10. Juli 1985, 29 - 48.

/11/ ACIPL (2009): Marine Chemicals Project at Hajipir, Rann of Kutch, Gujarat, India.- Archean Chemical Industries Private Limited. Gujarat, Indien, 2009, 3 Seiten, 6 Exponate.

/12/ Adamo, S. (1992): The Sicilian rock salt and potash mines.- In: Mining Magazine 166 (1992), 5 (May), 277 - 283.

/13/ Adams, S. (1969): Ore Controls, Carlsbad Potash District, Southeast New Mexico.- In: Salt Symposia Collection of SMRI Solution Mining Research Institute, Spring Symposium, Cleveland, Ohio, 01. April 1969, 246 - 257.

/14/ Ahorner, L. (1989): Seismologische Untersuchung des Gebirgsschlages am 13. März 1989 bei Völkershausen (DDR) im Kalibergbaugebiet an der Werra.- Kali und Steinsalz, 1989, 110 - 116.

/15/ Ahorner, L. (1991): Entstehung und Ablauf des Gebirgsschlages bei Völkershausen am 13. März 1989 aus seismologischer Sicht.- Kali '91 - Second International Potash Technology Conference. Hamburg, 26 - 29 May 1991.

/16/ AktG (1965): Einführungsgesetz zum Aktiengesetz vom 6. September 1965 (BGBl. I S. 1185), zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 20. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2751) geändert.

/17/ AKV (1998): Untersuchung von Techniken zum Einbringen von Versatz in der flachen Lagerung.- Arbeitskreis Versatz im Kaliverein e.V., Kassel, 1998.

/18/ Alexandrovich, H. M. (1973): Александрович, Х. М. (1973): Основы применения реагентов при флотации калийных руд.- Наука и техника, Минск, 1973, 146 - 152 [Fundamentals of Using Reagents for Flotation of Potash Ores.- Science and Technica, Minsk, 1973, 146 - 152.].

/19/ Alkan, H. (2009): Percolation Model for Dilatancy-Induced Permeability of the Excavation Damaged Zone in Rock Salt.- Int. Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 46, 2009, 716 - 724.

/20/ Amira, J., Stanley, W., Armstrong, H. & Frimodig, M. (1992): From Hot to Cold Crystallisation.- Phosphorus and Potassium, 1992, 28 - 32.

/21/ Anders, E. (1988): Analyse von Pfeilerbruchprozessen zur Entwicklung neuer Abbauverfahren mit nachgiebigen Carnallititpfeilern.- Dissertation Bergakademie Freiberg, 1988, o. S.

/22/ Andrejchuk, V. (2002): Collapse above the world's largest potash mine (Ural, Russia).- In: Int. J. Speleol. 31 (2002), 1, 137 - 158.

/23/ ANFFE (2011): Nota de prensa - Iberpotash invertirá 160 millones de € en los próximos tres años.- Asociación Nacional de Fabricantes de Fertilizantes, 14.04.2011 (Online: http://www.anffe.com/noticias/2011/2011-04-14%20Nota%20de%20prensa%20de%20Iberpotash.-%20Iberpotash%20invertir%E1%20160%20millones%20de%20euros%20en%20los%20pr%F3ximos%20tres%20a%F1os/index.html.).- Abrufdatum: 12. Dezember 2012.

/24/ Ankes, A. (1972): Untersuchung bodenphysikalischer Eigenschaften von Rückstand.- Dissertation an der Fakultät für Technische Wissenschaften der Bergakademie Freiberg, 1972, o. S.

/25/ APC (2012): Annual Report 2011.- Arab Potash Company, Amman, Jordanien, 12. April 2012, 80p.

/26/ Arkin, Y. & Gilat, A. (2000): Dead Sea sinkholes - an ever-developing hazard.- In: Environ. Geol. 39 (2000), 711 - 722.

/27/ Arnold, W. (1975): Eroberung der Tiefe.- Deutscher Verlag Grundstoffindustrie, Leipzig, 224 Seiten.

/28/ Arsentiev, V. A. & Leja, J. (1977): Problems in Potash Flotation Common to Ores in Canada and the Soviet Union.- In: CIM Bulletin 70 (1977), 779, 154 - 158.

/29/ Attendorn, T. (2008) Die Entstehung eines Bergbauabfallrechts – Rechtsfragen der Umsetzung der Bergbauabfallrichtlinie 2006/21/EG; NuR 2008, 153 - 163.

/30/ Aurada, K. D. (1992): Auswirkungen der Salzwässereinleitungen und -deponien im Südharz- und Werra-Kalirevier auf die hydrochemischen Verhältnisse der Oberflächengewässer.- Neue Bergbautechnik 22 (1992), 6, 203 - 212.

/31/ Aurada, K. D. (1997): Logistik der Salzwasserbeseitigung im Saale- und Werragebiet.- Wasser und Boden 49 (1997), 5, 33 - 45.

/32/ Aurada, K. D. & Rödel, R. (2005): Widerspiegelung von Natur-, Technik- und Kulturgeschichte im Landschaftsbild des mitteldeutschen Raumes - Wissenschaftliche Grundlagen einer Exkursion.- Greifswalder Geographische Arbeiten 37, Greifswald, 2005, 140 Seiten.

/33/ Autenrieth, H. (1957): Patentschrift DE Pat. 1 056 551.- Kali-Forschungsanstalt, 1957.

/34/ Autenrieth, H. (1958): Die Kali-Industrie.- In: Winnacker, K. & Küchler, L. (Hrsg.): Chemische Technologie, Sammelwerk in fünf Bänden. Band 1: Anorganische Technologie I, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 436 - 519.

/35/ Autenrieth, H. (1969a): Über das Zustandekommen und die Bedeutung metastabiler Lösungsgleichgewichte bei der Verarbeitung von Kalirohsalzen.- Kali und Steinsalz, 1969, 158 - 165.

/36/ Autenrieth, H. (1969b): Über die elektrostatische Aufbereitung von Kalirohsalzen.- Kali und Steinsalz, 1969, 171 - 177.

/37/ Autenrieth, H. (1970): 50 Jahre deutsche Gemeinschaftsforschung auf dem Gebiet der Kalirohsalzverarbeitung.- Kali und Steinsalz, 1970, 289 - 306.

/38/ Autenrieth, H. & Wirries, H. (1967): Patentschrift DE Pat. 1 283 772.- Kali-Forschungsanstalt, 1967.

/39/ Autorenkollektiv (1978): Festigkeits- und Verformungsverhalten von Steinsalz und Grundlagen der Berechnung des Spannungs- und Verformungszustandes des Salzgebirges um untertägige Hohlräume. FFH Freiberger Forschungshefte, A 598 (1978), Leipzig.

/40/ Averschin, S. G. (1947): Авершин, С. Г. (1947): Сдвижение горных пород при подземных разработках.- Углетехиздат, Москва, 1947, 245 стр. [Gesteinsverschiebung bei der untertägigen Gewinnung.- Verlag Ugletechizdat, Moskau, 1947, 245 S.].

/41/ Averschin, S. G. (1955): Авершин, С.Г. (1955): Горные удары.- Углетехиздат, Москва, 1955, 236 стр. [Gebirgsschläge.- Verlag Ugletechizdat, Moskau, 1955, 236 S.].

/42/ Averschin, S. G. (1961): Die Möglichkeiten der Modellierung gebirgsmechanischer Prozesse in der Umgebung bergmännischer Hohlräume.- 3. Ländertreffen des Internationalen Büros für Gebirgsmechanik, Leipzig, Oktober/November 1961, 113 - 117.

/43/ Averschin, S. G. (1976): Авершин, С. Г. (1976): Горное давление в одиночных подземных выработках.- Издательство Академии наук Киргизской ССР, Фрунзе, 1976, 120 стр. [Gebirgsdruck in einzelnen untertägigen Abbauen.- Verlag der Akademie der Wissenschaften der Kirgisischen SSR, Frunse, 1976, 120 S.].

/44/ Ayora, C., Garcia-Veigas, J. & Pueyo, J. J. (1994): The chemical and hydrological evolution of an ancient potash-forming evaporite basin in Spain as constrained by mineral sequence, fluid inclusion composition, and numerical simulation.- Geochimica et Cosmochimica Acta 1994, 58, 3379 - 3394.

/45/ Baar, C. A. (1944): Entstehung und Gesetzmäßigkeiten des Fazieswechsels im älteren Kalilager am westlichen Südharz unter Berücksichtigung des Kaliwerkes Bismarckshall.- Kali 38 (1944), 175 - 182.

/46/ Baar, C. A. (1945): Entstehung und Gesetzmäßigkeiten des Fazieswechsels im älteren Kalilager am westlichen Südharz unter Berücksichtigung des Kaliwerkes Bismarckshall.- Kali 39 (1945), 3 - 19.

/47/ Baar, C. A. (1952): Entstehung und Gesetzmäßigkeiten der Fazieswechsel im älteren Kalilager am Südharz (III).- Bergakademie 4 (1952), 138 - 150.

/48/ Baar, C. A. (1965): Measurements of Rock Pressure and Pillar Loads in Deep Potash Mines.- In: Proceedings Second Symposium on Salt, Cleveland, Ohio, May 03 - 05, 1965, 18 - 33.

/49/ Baar, C. A. (1969): Correct Interpretation of Data for Better Understanding of Salt Pillar Behaviour in Mines.- In: Proceedings Third Symposium on Salt, Cleveland, Ohio, April 21 -24, 1969, 238 - 248.

/50/ Baar, C. A. (1972a): Creep Measured in Deep Potash Mines vs. Theoretical Predictions.- In: Proceedings 7th Canadian Rock Mechanics Symposium, March 1971, Edmonton, Alberta, Canada. Department of Energy, Mines & Resources, Ottawa, Ontario, 1972, Paper No. 4, 23 - 78.

/51/ Baar, C. A. (1972b): Determination of Stresses in Salt and Potash Mines for Application to Mine Design. SRC Report, E 72-8, 77p.

/52/ Baar, C. A. (1973): Geological Problems in Saskatchewan Potash Mining Due to Peculiar Conditions During Deposition of Potash Beds.- In: Proceedings Fourth Symposium on Salt, Houston, Texas, April 08 - 12, 1973, The Northern Ohio Geological Society, 101 - 118.

/53/ Baar, C. A. (1977): Applied Salt Mechanics 1.- Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, Niederlande, 1977.

/54/ Bachmann, R. (1955): Aufbereitungsprobleme der deutschen Kaliindustrie.- Erzmetall, 8, Suppl. B 109-B 116.

/55/ Badia, E. (2009): Iberpotash anuncia 159 despidos en las minas de Súria y Sallent, El Pais, 04. April 2009 (Online: http://elpais.com/diario/2009/04/04/catalunya/1238807249_850215.html).- Abrufdatum: 15. Januar 2015.

/56/ Baer, G., Schattner, U., Wachs, D., Sandwell, D., Wdowinski, S. & Frydman, S. (2002): The lowest place on Earth is subsiding - an InSAR (interferometric synthetic aperture radar) perspective.- Geol Soc Am Bull 114 (2002), 12 - 23.

/57/ Balduf, I. & Handke, U. (2014a): Maßnahmenpaket zum Gewässerschutz: K+S zieht positive Bilanz.- Kali und Steinsalz, 2014, 38 - 45.

/58/ Balduf, I. & Handke, U. (2014b): Im Land der weißen Berge.- Gezähekiste 2/2014, 14, 11 - 18.

/59/ Banks, A. F. (1976): Potash Processing, an Overview with Particular Reference to the Cominco Plant.- Presented to the VIIIth CMP Meeting, Ottawa, 111 - 140.

/60/ Banks, A. F. (1979): Selective Flocculation-Flotation of Slimes from Sylvinite Ores.- In: Somasundaran, A. & Arbiter, L. N. (Hrsg.): Beneficiation of Mineral Fines, Problems and Research Needs. SME, New York, 1104 - 1111.

/61/ Bankwitz, P., Bankwitz, E., Franzke, H. J. & Rauche, H. (1995): In-situ-Spannungsmessungen in Thüringen und Sachsen - Geologische Bewertung der Meßpunkte und Ergebnisse.- Scientific Technical Report STR 95/04, 31 Seiten, Potsdam, 1995.

/62/ Bartke, K. (2008): Versatzmaßnahmen im Bergbau untertage.- Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz, Wiesbaden, 23. Oktober 2008, 7 Seiten.

/63/ Bartl, H. (2003a): Die für das Südharz-Unstrut-Revier wirkenden Ingenieurunternehmen.- In: Bartl, H.; Döring, G., Hartung, K., Schilder, C. & Slotta, R. (Hrsg.): Kali im Südharz-Unstrut-Revier.- Band 1, Selbstverlag des Deutschen Bergbau-Museums Bochum, Sondershausen, 2003, 293 - 316.

/64/ Bartl, H. (2003b): Chronik der letzten sechs Kaliwerke.- In: Bartl, H.; Döring, G., Hartung, K., Schilder, C. & Slotta, R. (Hrsg.): Kali im Südharz-Unstrut-Revier.- Band 2, Selbstverlag des Deutschen Bergbau-Museums Bochum, Sondershausen, 2003, 459 - 767.

/65/ Bartl, H. (2003c): Die Sanierung der Bergbaustandorte und die Entwicklung im Revier nach der Stilllegung.- In: Bartl, H.; Döring, G., Hartung, K., Schilder, C. & Slotta, R. (Hrsg.): Kali im Südharz-Unstrut-Revier.- Band 2, Selbstverlag des Deutschen Bergbau-Museums Bochum, Sondershausen, 2003, 847 - 883.

/66/ Bartl, H. (2010): Die VVB Kali in Erfurt - 1958 - 1970: Eine Erfolgreiche und effektive Industriezweigleitung der Kaliindustrie der DDR.- Bergmannsverein „Otto Ludwig Krug von Nidda“ Erfurt e.V. (Hrsg.), Erfurt 2010, 166 Seiten.

/67/ Bartl, H., Döring, G., Hartung, K., Schilder, C. & Slotta, R. (2003): Kali im Südharz-Unstrut-Revier. 3 Bände, Selbstverlag des Deutschen Bergbau-Museums Bochum, Sondershausen/Bochum, 2003 (Bände 1 und 2) und 2005 (Band 3).

/68/ Baryakh, A. A. (2001a): Барях, А. А. (2001): Геомеханическая оценка условий трещинообразования в процессе формирования осадочного чехла.- В: Барях, А. А., Федосеев, А. К.: Моделирование стратегии и процессов освоения георесурсов.- Тез. докл. Междунар. конф., ГИ УрО РАН [и др.], Пермь, 2001, стр. 9. [Geomechanische Bewertung der Bedingungen der Rissbildung im Prozess der Entstehung des Sedimentmantels.- In: Baryakh, A. A., Fedoseev, A. K.: Modellierung von Strategie und Prozessen der Erforschung von Georessourcen: Thesen zu den Vorträgen der Internationalen Konferenz, Bergbauinstitut der Uraler Abteilung der Russischen Akademie der Wissenschaften [u.a.] (russ), Perm, 2001, S. 9].

/69/ Baryakh, A. A. (2001b): Барях, А. А. (2001): Геомеханический анализ возможных причин массового обрушения пород в калийном руднике.- В: Барях, А. А.: Вестник ПГТУ: Динамика и прочность машин, №2, 2001, стр. 20 - 27. [Geomechanische Analyse möglicher Ursachen für einen Massengesteinsbruch im Kalibergwerk.- In: Baryakh, A. A.: Vestnik PGTU (Infoblatt der Permer Staatlichen Technischen Universität): Dynamik und Stabilität der Maschinen, Nr. 2 (russ), 2001, S. 20 - 17].

/70/ Baryakh, A. A. (2001c): Барях, А. А. (2001): Горнотехнические аварии: опыт геомеханического расследования.- В: Барях, А. А.: Моделирование стратегии и процессов освоения георесурсов.- Тез. докл. Междунар. конф. ГИ УрО РАН [и др.], Пермь, 2001, стр. 8 - 9. [Gebirgstechnische Havarien: Erfahrung geomechanischer Untersuchung.- In: Baryakh, A. A.: Modellierung von Strategie und Prozessen der Erforschung von Georessourcen.- Thesen zu den Vorträgen der Internationalen Konferenz, Bergbauinstitut der Uraler Abteilung der Russischen Akademie der Wissenschaften [u.a.] (russ), Perm, 2001, S. 8 - 9].

/71/ Baryakh, A. A. (2001d): Барях, А. А. (2001): Запредельное деформирование пространственной системы междукамерных целиков во времени.- В: Барях, А. А., Гегин, А. С.: Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках.- Материалы XI-й Междунар. науч. шк. им. акад. С. А. Христиановича, Таврич. нац. ун-т, Симферополь, 2001, стр. 15 - 16. [Überzugsdeformation des Raumsystems der Zwischenkammerpfeiler in der Zeit.- In: Baryakh, A. A., Gegin, A. S.: Deformation und Brüche der defekten Stoffe und dynamische Erscheinungen in dem Gebirge und den Abbauen.- Materialen der XI. Internationalen wissenschaftlichen Akademiker - Christianovich-Schule, Taurida-Nationaluniversität (russ), Simferopol, 2001, S. 15 - 16].

/72/ Baryakh, A. A. (2001e): Барях, А. А. (2001): Разрушение соляных междукамерных целиков.- В: Барях, А. А.: Материалы научной сессии ГИ УрО РАН по результатам НИР в 2000 г., Пермь, 2001, стр. 2 - 5. [Brüche der Salzzwischenpfeiler.- In: Baryakh, A. A.: Materialen der wissenschaftliche Session des Bergbauinstituts der Uraler Abteilung der Russischen Akademie der Wissenschaften zu den Ergebnissen der wissenschaftlichen Forschungsarbeit 2000 (russ), Perm, 2001, S. 2 - 5].

/73/ Baryakh, A. A. (2001f): Барях, А. А. (2001): Сейсмогеомеханический контроль состояния ответственных подземных объектов.- В: Барях, А.А., Санфиров, И.А.: Научно-технический потенциал Западного Урала в области конверсии военно-промышленного комплекса.- Докл. междунар. семинара, Междунар. НТЦ [и др.], Пермь, 2001, стр. 41 -45. [Seismsiche geomechanische Kontrolle des Zustandes der funktionswichtigen unter-Tage-Objekte.- In: Baryakh, A. A., Sanfirov, I. A.: Wissenschaftlich-technisches Potenzial des Westurals im Bereich der Konversion vom Militär-Industrie-Komplex.- Vorträge des internationalen Seminars, Internationalen Wissenschaftlich-Technisches Zentrum [u.a.] (russ), Perm, 2001, S. 41 - 45].

/74/ Baryakh, A. A. (2001g): Барях, А. А. (2001): Сейсмогеомеханический контроль состояния ответственных подземных объектов.- В: Барях, А. А., Санфиров, И. А.: Научно-технический потенциал Западного Урала в области конверсии военно-промышленного комплекса.- Докл. междунар. семинара, Междунар. НТЦ [и др.], Пермь, 2001, стр. 17. [Seismsiche geomechanische Kontrolle des Zustandes der funktionswichtigen unter-Tage-Objekte.- In: Baryakh, A. A., Sanfirov, I. A.: Wissenschaftlich-technisches Potenzial des Westurals im Bereich der Konversion vom Militär-Industrie-Komplex.- Vorträge des internationalen Seminars, Internationales Wissenschaftlich-Technisches Zentrum [u.a.] (russ), Perm, 2001, S. 17].

/75/ Baturin, E. N., Menshikova, E. A., Blinov, S. M., Naumov, D. Y. & Belkin, P. A. (2012): Problems of the Development of the World Largest Potash Deposits, Perm State University, Erscheinungsdatum: 26.11.2012, http://www.science-education.ru/106-7513.- Abrufdatum: 19.02.2015. [Батурин, Е. Н., Меньшикова, Е. А., Блинов, С. М., Наумов, Д. Ю. & Белкин, П. А. (2012):Современные проблемы науки и образования. Проблемы освоения крупнейших калийных месторождений мира.- Пермский государственный национальный исследовательский университет, дата публикации: 26.11.2012, электронный ресурс http://www.science-education.ru/106-7513, дата доступа 19.02.2015].

/76/ Bauer, C. O. (1999): Notwendiges Wissen vom Recht für Prüfingenieure.- ZfP-Zeitung 66 (1999), 59 - 62.

/77/ Bauer, S. J., Ehgartner, B. L. & Neal, J. T. (2000): Geotechnical Studies Associated with decommissioning the strategic petroleum reserve facility at Weeks Island, Louisiana: A case History.- In: Proceedings Fall 2010 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, San Antonio, Texas USA, 15 - 18 October 2000, 145 - 156.

/78/ Baumgertner, V. A. & Belyakov, V. (2012): Doubling Production Capacity in Ten Years Only - URALKALI 's Contribution to Feeding the World's Growing Population.- In: Abstracts & Lectures, Anniversary Symposium Potash Fertilizer Production in the 21st Century - 60 Years of Potash Engineering Made in Erfurt - 20 Years of ERCOSPLAN Group of Companies; Erfurt, 09. November 2012, 32 - 33.

/79/ BBergG (1980): Bundesberggesetz vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), zuletzt geändert durch Artikel 15a des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585).

/80/ BD (2013): Belarus is Losing the Potash War, Belarus Digest, 09 October 2013 (Online: http://belarusdigest.com/story/belarus-losing-potash-war-15763).- Abrufdatum: 17. Mai 2015.

/81/ Becker, D., Gottschalck, U., Lösekrug-Möller, G., Miersch, M., Post, A. & Schwartze, S. (2014): Stellungnahme zum UBA Gutachten „Versalzung von Werra und Weser" vom 16.10.2014. Stellungnahme der MdBs vom 24.10.2014, 2 Seiten.

/82/ Beddoes, R. J., Roulston, B. V. & Streisel, J. (1989): Field monitoring of salt tailings used as backfill in cut-and-fill mining.- In: Hassani, F. P., Scoble, M. J. & Yu, T. R. (Hrsg..): Innovations in Mining Backfill Technology; Proceedings 4th International Symposium on Mining with Backfill. Montreal, Cananda, 02. - 05. Oktober 1989, Balkema, Rotterdam, 1989, 343 - 348.

/83/ Beer, W. W. (1996): Kalilagerstätten in Deutschland.- Kali und Steinsalz, 1996, 18 - 30.

/84/ Behrens, P. (1980): Industrial Processing of Great Salt Lake Brines.- Utah Geological and Mineral Survey Bulletin 116 (1980), 223 - 228.

/85/ Beier, P.-M. (1996): Fortschritte bei ESTA und Flotation.- Kali und Steinsalz, 1996, 57 - 63.

/86/ Beinhorn, A. (2003): Absatz, Marktarbeit, Logistik und Materialwirtschaft in der ostdeutschen kaliindustrie.- In: Bartl, H.; Döring, G., Hartung, K., Schilder, C. & Slotta, R. (Hrsg.): Kali im Südharz-Unstrut-Revier.- Band 1, Selbstverlag des Deutschen Bergbau-Museums Bochum, Sondershausen, 2003, 351 - 375.

/87/ BELARUSKALI (2013): Заявление ОАО „Беларуськалий“ и ЗАО „БКК“ (Online: http://kali.by/news/133/).- Abrufdatum: 19. August 2013.

/88/ Belkin, V. V. (2010): Technogene Transformation der geologischen Umgebung des Salzbeckens Verkhnekamski.- Doktordissertation, Yekaterinburg, 2010, 280 S. [Белкин, В. В. (2010): Техногенная трансформация геологической среды Верхнекамского соленосного бассейна: дис. д-ра геол.-мин. наук. – Екатеринбург, 2010, 280 с.].

/89/ BELTA (2013a): Experte: Strafverfahren gegen Kerimow ist ein logischer Schritt.- Belta, 02. September 2013 (Online: http://deu.belta.by/all_news/society/i_49692.html).- Abrufdatum: 02. September 2013.

/90/ BELTA (2013b): Interpol setzt Sulejman Kerimow auf Fahndungsliste.- Belta, 03. September 2013 (Online: http://deu.belta.by/all_news/society/i_49694.html).- Abrufdatum: 03. September 2013.

/91/ Benison, K. C. & Goldstein, R. H. (1999): Permian paleoclimate data from fluid inclusions in halite.- Chemical Geology 154 (1999), 113 - 132.

/92/ Berest, P., Brouard, B., Feuga, B. & Karimi-Jafari, M. (2008): The 1873 collapse of the Saint- Maximilien panel at the Varangéville salt mine.- Int. Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 45 (2008), 1025 - 1043.

/93/ Bergier, J.-F. (1989): Die Geschichte vom Salz. Campus Verlag, Frankfurt; New York, 1989.

/94/ BergRVÄndV (2008): Dritten Verordnung zur Änderung bergrechtlicher Verordnungen v. 24.1.2008 (BGBl. I S. 85).

/95/ Bey, M. M., Marakov, V. E. & Salnikov, A. A. (2014): Бей, М.М., Мараков, В.Е., Сальников, А.А. (2014): Предварительные рекомендации по параметрам системы и технологии разработки Жилянского месторождения калийных солей. В: Группа предприятий ЗУМК(изд.): Рудник будущего. Научно-техническийжурнал, Пермь, специальный выпуск №4, 2014, стр. 12 - 20. [Bey, M. M., Marakov, V. E. & Salnikov, A. A. (2014): Vorläufige Empfehlung zu den Abbauparametern der Kalilagerstätte Zhilyanskoe.- In: Unternehmensgruppe ZUMK (Hrsg.): Bergwerk der Zukunft, Perm, Spezialausgabe Nr. 3 - 4 (19 - 20), 2014, S. 50 - 62.].

/96/ Beyschlag, F. & Fulda, E. (1921): Zur Frage einer Versenkung von Endlaugen der Kalifabrikation in tiefliegende durchlässige Gebirgsschichten.- Kali. Zeitschrift für Gewinnung, Verarbeitung und Verwertung der Kalisalze 15 (1921), 363 - 367.

/97/ BGS (2006): Mineral Planning Factsheet Potash. British Geological Survey. Natural Environment Research Council: Nottingham, 2006.

/98/ BGS (2011): Mineral Planning Factsheet Potash.- British Geological Survey. Natural Environment Research Council, Nottingham, 2011.

/99/ BHPB (2010): Jansen Project Environmental Impact Statement. Executive Summary.- BHP BILLITON LIMITED, Veröffentlichung, Melbourne, Victoria, Dezember 2010.

/100/ BHPB (2013): US$2.6 Billion Investment in Jansen Potash Project.- BHP BILLITON LIMITED, Pressemitteilung, Melbourne, Victoria, 20. August 2013.

/101/ BHPB (2015): BHP Billiton Operational Review for the half year ended 31 December 2014.- BHP BILLITON LIMITED, Pressemitteilung, Melbourne, Victoria, January 21, 2015.

/102/ Bieniawski, Z. T. & Bieniawski, P. W. (1994): Design principles and methodology applied to solution mined caverns.- In: Proceedings Spring 1994 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, Houston, Texas, 1994.

/103/ BImSchG (2013): Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 20. November 2014 (BGBl. I S. 1740) geändert worden ist.

/104/ Bischofberger, C. (1986): Beitrag zum Einfluß der Hydrodynamik beim Flotationsprozeß.- FFH Freiberger Forschungshefte, A 719, Leipzig, 1986, 6 - 87.

/105/ Bischofberger, C. & Schubert, H. (1978): Zum Einfluß der Hydrodynamik auf die Flotierbarkeit unterschiedlicher Korngrößen.- FFH Freiberger Forschungshefte, A 594, Leipzig, 1986, 77 - 92.

/106/ BLOOMBERG (2013): Uralkali Breaks Potash Accord to Grab Market Share.- Bloomberg, July 30, 2013 (Online: http://www.bloomberg.com/news/2013-07-30/uralkali-sees-potash-price-slump-after-exiting-bpc-trade-venture.html).- Abrufdatum: 30. Juli 2013.

/107/ BMBF (2013): UN-Dekade „Bildung für nachhaltige Entwicklung".- (Online: http://www.bmbf.de/de/3840.php).- Abrufdatum: 16. Februar 2013.

/108/ Bock, R. (1981): Elektrostatische Trennung der Komponenten von Kali-Rohsalzen.- Chemie Ingenieur Technik 53 (1981), 12, 916 - 924.

/109/ Bodenstein, J. & Rauche, H. (2001): Reduction of surface subsidence and brine inflow prevention in potash mines by subsequent backfilling.- In: Proceedings Eighth International Conference on Tailings and Mine Waste `01, Fort Collins, Colorado, January 16 - 19, 2001, A.A.Balkema, Rotterdam, 2001, 171 - 176.

/110/ Bodenstein, J. & Schreiner, W. (1999): Reduzierung der Bergsenkungen durch Einbringen von Spülversatz - Gebirgsmechanisch-bergschadenkundliche Aspekte der Anwendung des Spülversatzverfahrens im Kalibergbau.- In: Rauche, H. & Sitz, P. (Hrsg.): Spülversatz im Salzbergbau.- FFH Freiberger Forschungshefte, A 855, Freiberg, 2001, 113 - 124.

/111/ Bodenstein, J., Hartwig, H.-J., Springer, H. & Pfeifer, P. (2005): Verwahrungsmaßnahmen im Ergebnis gebirgsmechanischer Gefährdungsanalysen in den stillegelegten Kalibergwerken des Südharz-Reviers.- Vortrag anlässlich des 34. Geomechanischen Kolloquiums in Leipzig, 11. November 2005, 14 Seiten.

/112/ Boehner, R. C. (1983): Windsor Group Salt and Potash in Nova Scotia, Canada.- In: Salt Symposia Collection of SMRI Solution Mining Research Institute, Spring Symposium, Toronto, May 1983, 99 - 113.

/113/ Böhnel, H., Menzel, W. & Schreiner, W. (1981): Gesteinsmechanische Untersuchungen an Hartsalz zur Dimensionierung von Pfeilern.- Neue Bergbautechnik 11 (1981), 7, 374 - 378.

/114/ Bohnenberger, G. (2001): Stand der Bergtechnik im Steinsalzbergwerk Heilbronn.- Kali und Steinsalz, 2001, 100 - 105.

/115/ Bohnenberger, G. (2007): Die schneidende Gewinnung bei der Südwestdeutschen Salzwerke AG.- Kali und Steinsalz, 2007, 30 - 37.

/116/ Borchardt, D. & Richter, S. (2013): Expertengespräch über „Technische Potenziale der Vermeidung und Verwertung von Salzabwasser bei der Kaliproduktion".- Arbeitsgruppensitzung Runder Tisch „Gewässerschutz Werra/Weser und Kaliproduktion". Prof. Dr. Dietrich Borchardt, Dr.-Ing. Sandra Richter, Kassel, 06. Juni 2013, 17 Seiten.

/117/ Borisihina, I. (2015): Environmental Issues Of The Salt Production And Processing.- Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, UrFU, Russia, Yekaterinburg (Online: http://www.rae.ru/forum2012/205/2784.- Abrufdatum: 19.02.2015. [Борисихина, И. (2015): ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ДОБЫЧЕ И ПЕРЕРАБОТКЕ СОЛЕЙ.- УрФУ, электронныйресурсhttp://www.rae.ru/forum2012/205/2784, датадоступа19.02.2015].

/118/ Borsakovskij, B. A. (1980): Борзаковский, Б. А. (1980): Исследование технологических процессов механической закладки камер на рудниках Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей.- Дис. канд. тех. наук, ЛГИ, Ленинград, 1980, 423 стр. [Erkundung technologischer Prozesse des mechanischen Versatzes der Kammer in den Bergwerken der Verchnekamskoe-Lagerstätte der Kali- und Magnesiumsalze.- Kandidatur-Dissertation, Leningrader Bergbauinstitut, Leningrad, 1980, 432 S.].

/119/ Borsakovskij, B. A. (2001): Filling Operations in the Upper Kama Basin Potash and Magnesium Mine Field - A Case Study and the Prospects.- In: Thoma, H., Hartmann, O. & Rauche, H. (Hrsg.): Vortrags- und Exkursionsveranstaltung Kali-, Steinsalz und Kupferschiefer in Mitteldeutschland III, Thema „Aspekte der Langzeitsicherheit bei der Nachnutzung und Stilllegung von Kali- und Steinsalzbergwerken", Sondershausen, 30. und 31. März 2001, Exkursionsführer und Veröffentlichungen der GGW, 211 (2001), Berlin, 5 - 13.

/120/ Borsakovskij, B. A. & Papulov, L. M. (1994): Борзаковский, Б. А. & Папулов, Л. М. (1994): Закладочные работы на верхнекамских калийных рудниках.- Справочник, Недра, Москва, 1994, 234 стр. [Versatzarbeiten in den Verchnekamskoe-Bergwerken.- Handbuch, Verlag Nedra, Moskau, 1994, 234 S.].

/121/ Borstel, L. E. v. & Knipping, B. (1990): Tertiary basaltic rocks with their volatile phases in the Werra Fulda potash region (WFPR).- International Volcanological Congress. IAVCEI, Mainz, 03. - 08. September 1990. Poster.

/122/ Borstel, L. E. v. & Knipping, B. (1991): Der Stoffbestand von Lösungseinschlüssen als Kriterium für die Entstehung mariner Salzgesteine. Neue Perspektiven in der Evaporitforschung.- Proceedings Kali' 91, Second International Potash Technology Conference, Hamburg, 26 - 29 May 1991.

/123/ Braitsch, O. (1962): Entstehung und Stoffbestand der Salzlagerstätten.- Springer, Berlin, 1962.

/124/ Brands, L., Beier, P.-M. & Stahl, I. (2003): Electrostatic Separation.- Ullmanns Encyclopedia of Industrial Chemistry, Sixth Edition, Electronic Release, Wiley-VCH, Weinheim, 2003.

/125/ Braunisch, F. (2008): Untersuchungen zum Aufbau einer funktional optimierten Rekultivierungsschicht auf einer hochbasischen Aschendeponie (Dissertation).- In: UNIVERSITÄT KASSEL (Hrsg.): Ökologie und Umweltsicherung 30/2008, Universität – Gesamthochschule Kassel; Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften, Fachgebiet Landschaftsökologie und Naturschutz. Kassel, 2008, 215 Seiten.

/126/ Breniaux, J. & Marx, J. P. (1991): Equipment of long-life panel at M.D.P.A.- In: Proceedings Kali '91 - Second International Potash Technology Conference. Hamburg, 26 - 29 May 1991.

/127/ Brinckmann, H. (2010): Runder Tisch „Gewässerschutz Werra / Weser und Kaliproduktion", Arbeitsauftrag - Ergebnisse - Erfahrungen.- ZUR 10 (2010), 21, 467 - 473.

/128/ Brinckmann, H. (2013): Salzabwasserleitung an die Nordsee als Infrastrukturprojekt. Ein Vorschlag des Leiters des Runden Tischs „Gewässerschutz Werra/Weser und Kaliproduktion" für einen gemeinsamen neuen Aufbruch.- Vortrag Prof. Dr. Hans Brinckmann, 24. Sitzung des Runden Tisches, Stadtpalais Kassel, 15. September 2014. Kassel, 12. September 2013, 2 Seiten.

/129/ Brown, A. K., Heebner, L. B. & Howe, J. J. (2009): Lifespan Optimization of Tailings Management Area at Mosaic Potash Belle Plaine.- Project report, University of Regina. Faculty of Engineering, Regina, Saskatchewan, 2009, 126p.

/130/ Brückner, D., Popp, T. & Schreiner, W. (2005): Geotechnical Experiences in Flooding Underground Openings in Salt Formations.- In: Proceedings Fall 2005 Conference SMRI Solution Mining Research Institute, Nancy, France, October 02- 05, 2005, 21p.

/131/ Budryk, W. (1929): Die Bewegung des Versatzes in Spülrohren.- Dissertation an der Berg- und Hüttenakademie AGH Krakau, 1929, o. S.

/132/ Bukowski, K. & Czapowski, G. (2009): Salt geology and mining traditions: Kalush and Stebnyk mines (Fore-Carpathian region, Ukraine).- Geoturystyka 3 (2009), 27 - 34.

/133/ Bukowski, K. & Jackiewicz, A. (1926): Sol i saliny polskie. Dyrekcja Salin Panstowowych. Ministerstwo Przemyslu i Handlu, Warszawa, 107p. [Salz und Salinen in Polen.- polnisch]

/134/ BUND (2010): Runder Tisch „Gewässerschutz Werra/Weser und Kaliproduktion“: Ökologische Schäden viel schlimmer als früher bekannt! – Für zukunftsfähige Lösungen bleibt nur ein kleines Zeitfenster.- Pressemitteilung BUND, Bundesgeschäftsstelle, Berlin, 09. Februar 2010.

/135/ BUND (2011): Runder Tisch Werra-Kaliproduktion: „ Wir erwarten einen verbindlichen Entlastungs-Fahrplan“: Neubeginn des Runden Tisches „Werra/Weser und Kaliproduktion“.- Pressemitteilung BUND, Bundesgeschäftsstelle, Berlin, 16. Mai 2011.

/136/ BUND (2015): Werra-Weser-Versalzung durch K+S: Bund und Ländern droht eine Klage der EU-Kommission.- Pressemitteilung BUND, Bundesgeschäftsstelle, Berlin, 24. Februar 2015.

/137/ Burak, Z. & Pozniak, V. (2007): Бурак, З. & Позняко, В. (2007): Охране окружающей среды на производственном объединении «Бепаруськалий» придается серьезное внимание.- в Экология - прежде всегогазета.- http://www.bel-jurist.com/page/ecology-belaruskalij.- Доступ на 15 октября 2014. [Burak, Zahar & Pozniak, Victor: Environmental Protection on production association „Belaruskaly“ given serious attention (Online: http://www.bel-jurist.com/page/ecology-belaruskalij).- Abrufdatum: 15. Oktober 2014.].

/138/ Burrhee, H. & Rauche, H. (1999): Geologische Aspekte der lufterfüllten Verwahrung des Kalisalzbergwerkes Roßleben.- In: Hartmann, O. (Hrsg.): Kali-Steinsalz und Kupferschiefer in Mitteldeutschland - Exkurs. f. u. Veröffentl. GGW, Vorträge zum 7. Treffen des Arbeitskreises Bergbaufolgelandschaften, Magdeburg, 19. - 20. Februar 1999, 205; Berlin, 1999, 105 - 113.

/139/ Buschmann, J. O. Freiherr von (1909): Das Salz. Band 1. Leipzig, 1909, 31 - 32.

/140/ Butler, G. P. (1969): Modern evaporite deposition and geochemistry of co-existing brines, the sabkha, Trucial Coast, Arabian Gulf.- Journal of Sedimentary Research 39 (1969), 70 - 89.

/141/ Butts, D. S. (1985): Solar Ponding as a Mineral Recovery Step in Solution Mining.- In: Schlitt, W. J. (ed.): Proceedings Symposium Solution Mining of Salts and Brines, New York, February 25 - 26, 1985, Society of Mining Engineers, New York, 1985, 143 - 147.

/142/ BV STASSFURT (2002): 1952 - 2002. Geschichte des Staßfurter Salzbergbaus und der Staßfurter Kaliindustrie in der Zeit von 1952 - 2002.- Bergmannsverein „Staßfurt, Wiege des Kalibergbaus“ e. V. (Hrsg.), Staßfurt, 2002, 206 Seiten.

/143/ BVerfGE (1978): BVerfGE 49, 89 (143), Beschluss vom 8. 8. 1978 - 2 BvL 8/77.

/144/ Carlé, W. (1963): Die Saline im Brettachtal bei Gerabronn.- Württembergisch Franken 47 (1963), 149 - 190.

/145/ Carlowitz, H. C. von (1713): Sylvicultura oeconomica oder Haußwirthliche Nachricht und Naturmäßige Anweisung zur Wilden Baum-Zucht.- Hamberger, J. (Hrsg.), 09. März 2013.

/146/ CEAA (2012): Canadian Environmental Assessment Act, enacted by section 52 of chapter 19 of the Statutes of Canada, 2012, in force July 6, 2012, see SI/2012-56. Last amended on December 31, 2014, Current to April 22, 2015.

/147/ CEAA (2015): Guide to Preparing a Description of a Designated Project under the Canadian Environmental Assessment Act, 2012. Canadian Environmental Assessment Agency, March 2015, 16p.

/148/ CEPA (1999): Canadian Environmental Protection Act, last amended on October 25, 2013, Current to February 6, 2014.

/149/ Chanchitpricha, C., Bond, A. J. & Cashmore, M. (2011): Effectiveness criteria for measuring Impact Assessment tools. In SEA Implementation and Practice: Making an Impact? Prague, Czech Republic: International Association for Impact Assessment, 1 - 13.

/150/ Chang, C. Y. & Nair, K. (1973): Analytical Methods for Predicting Subsidence Above Solution-Mined Cavities.- In: Proceedings Fourth Symposium on Salt, Houston, Texas, April 08 - 12, 1973, The Northern Ohio Geological Society, 101 - 117.

/151/ Chelpanova, E. V. (2004): Челпанова, Е. В. (2004): Конспект лекций по дисциплине «Разработка калийных месторождений» (расчет параметров системы разработки пологих калийных пластов).- Пермский государственный технический университет, Пермь, 2004, 16 стр. [Vorlesungenskript „Abbau der Kalilagerstätten" (Parameterberechnung für das Abbausystem der flachen Kaliflöze).- Permer Staatliche Technische Universität, Perm, 2004, 16 S.].

/152/ Chervinskaya, A.V. (2003): Halotherapy of respiratory diseases.- Physiotherapy, Balneology and Rehabilitation 6 (2003), 8 -15.

/153/ Chervinskaya, A.V. & Ziber, N. A. (1995): Halotherapy for treatment of respiratory diseases.- J Aerosol Med. 8 (1995), 221 - 232.

/154/ Chervinskaya, A.V. et al. (1995): Червинская, А.В. (1995): Применение медтехнологии галотерапии в комплексном лечении и реабилитации заболеваний органов дыхания.- Червинская, А.В.и др., Методические рекомендации, Москва, 1995, 18 стр. [Anwendung der medizinischen Technologie der Halotherapie bei den komplexen Therapie und Rehabilitation von Erkrankungen der Amtungsorgane.- Chervinskaya, A.V. u.a., Methodische Empfehlungen, 1995, 18 S.].

/155/ Childers, C. (1990): Potash in a global economy.- Phosphorus and Potassium, 1990, 16 - 20.

/156/ Ciernioch, G. (1997): Neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der Flotation.- Kali und Steinsalz, 1997, 208 - 213.

/157/ Ciglia, J. (2000) Versuchsanlage zur Chloridentfernung aus Trinkwasser in Colmar.- Jahresbericht 2000, AWBR Arbeitsgemeinschaft Wasserwerke Bodensee-Rhein, Freiburg i. Br. 2000, 97 - 112.

/158/ CIM (2010): CIM Standards on Mineral Resources and Reserves. Definitions and Guidelines. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 27. Dezember 2010.

/159/ Clark, A. R. & Schwerdtner, W. M. (1965): Petrofabric Analysis of Potash Rocks, Esterhazy, Saskatchewan.- In: Proceedings Second Symposium on Salt, Cleveland, Ohio, May 03 - 05, 1965.

/160/ Cleasby, J. V., Pearse, G. E., Grieves, M. & Thorburn, G. (1975): Shaft Sinking at Boulby Mine, Cleveland Potash Ltd.- IMM BULL. TRANS. 84 (1975), 818, 7 - 128.

/161/ CLI (1999): Companies Law of Israel, enacted by the Knesset on 3 Iyyar 5759 (19 April 1999); The Bill and Explanatory Memorandum were published in Hatsaot Chok 2432, on 29 Tishri 5756 (23 October 1995) (Online: www.jewishvirtuallibrary.org/jsource/Politics/CompaniesLaw57591999.pdf).- Abrufdatum: 16. Januar 2013.

/162/ Closson, D. (2005): Structural control of sinkholes and subsidence hazards along the Jordanian, Dead Sea coast.- Environ Geol 47 (2005), 290 - 301.

/163/ Closson, D., Abou Karaki, N., Hansen, H., Derauw, D., Barbier, C. & Ozer, A. (2003): Space-borne radar interferometric mapping of precursory deformations of a dyke collapse.- Dead Sea area, Jordan.- Int J Remote Sens 24 (2003), 843 - 849.

/164/ CMAI (2011): Global Soda Ash Service - Summary (Online: http://www.cmaiglobal.com/marketing).- Abrufdatum: 11. August 2012.

/165/ CMII (2011): COMPASS MINERALS INTERNATIONAL INC., Annual Report Fiscal Year 2011.- Overland Park, Kansas, 2011.

/166/ Coates, D. F. & Muir, W. G. (1969): Einige untertägige Deformationsbeobachtungen in verschiedenen kanadischen Gruben.- 11. Ländertreffen des Internationalen Büros für Gebirgsmechanik, Leipzig, November 1969, 135 - 148.

/167/ Coode, A. M. (1998): Backfill Waste Alternatives in Saskatchewan Potash Mines.- CIM Proceedings 100th Annual Meeting - A Vision for the Future, CIM Montreal 1998.

/168/ Cook, J. C. (1973): How to Locate Water Hazards in Salt Mines.- In: Proceedings Fourth Symposium on Salt, Houston, Texas, April 08 - 12, 1973, The Northern Ohio Geological Society, 27 - 31.

/169/ Coolbaugh, M. J. (1968): Special Problems of Mining in Deep Potash.- In: Society of Mining Engineers, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers 241 (1968), 3, 323 - 329.

/170/ Cordero, D. (2013): El Ayuntamiento de Sallent también pone obstáculos a los planes de Iberpotash, February 07, 2013, Barcelona, Spain, El Pais (Online: http://ccaa.elpais.com/ccaa/2013/02/06/catalunya/1360182342_138037.html).- Abrufdatum: 15. Januar 2015.

/171/ Cormode, D. A. (1985): Insoluble Slimes Removal From Sylvinite Ore by Selective Flocculation and Flotation.- In: Proceedings 87th Annual Meeting of the CIMM, Vancouver, 1985, 21 - 25.

/172/ CPL (2004): Reduction of Waste Discharge by Underground Disposal of Process Residue LIFE ENV/UK/000603. Cleveland Potash Inc., Cleveland, United Kingdom, 4p.

/173/ CRI (2012): CORRIDOR RESOURCES INC., Annual Information Form for the year ended 31 December 2012, Halifax, Nova Scotia, March 27, 2013, 67p, 3 Anhänge.

/174/ CRI (2013): CORRIDOR RESOURCES INC., Second Quarter 2013 Management's Discussion and Analysis As of 12. August 2013.- Halifax, Nova Scotia, August 12, 2013.

/175/ Cundall, P. & Board, M. (1988): A Microcomputer Program for Modeling Large-Strain Plasticity Problems in Numerical Methods in Geomechanics.- In: Proceedings 6th Int. Conference, Innsbruck, A.A. Balkema, Rotterdam, 1988, 2101 - 2108.

/176/ CWA (1985): Canada Water Act, R.S.C., 1985, c. C-11. Last amended on April 1, 2014, Current to April 22, 2015.

/177/ Czapowski, G., Bukowski, K. & Poborska-Mlynarska, K. (2009): Miocene rock and potash salts of West Ukraine. Field geological-mining seminar of the Polish Salt Mining Society.- Geologia (Preglad Solny 2009), Wyd. AGH, Kraków 35 (2009), 3, 479 - 490.

/178/ D'Ans, J. (1933): Die Lösungsgleichgewichte der Systeme der Salze ozeanischer Salzablagerungen.- Kali-Forschungsanstalt, Verlagsgesellschaft für Ackerbau, Berlin, 1933.

/179/ D'Ans, J. (1952): Die Bedeutung van't Hoffs Arbeiten über Lösungsgleichgewichte und der Methoden ihrer Untersuchunge und graphischen Darstellung.- Z. Elekrochem. 56 (1952), 497 - 505.

/180/ Dancy, W. B. (1982): Potassium Compounds.- In: Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 3rd ed., Wiley-Interscience, New York, 1982, 920 - 950.

/181/ Danyluk, T., Phillips, G., Prugger, A. & Pesowski, M. (1999): Geophysical Analysis of an Unusual Collapse Structure at PCS Potash, Lanigan Division.- In: Proceedings Annual General Meeting of the CIM, Calgary, 1999, 4p.

/182/ Dapeng, S. & Bingxiao, L. (1992): Origins of Borates in the Saline Lakes of China.- Seventh Symposium on Salt, Kyoto, 06. - 09. April 1993, 177 - 194.

/183/ Davies, P. B. (1983): Structural Characteristics of a Deep-Seated Dissolution-Subsidence Chimney in Bedded Salt.- In: Proceedings Sixth Symposium on Salt, Toronto, 24. - 28. Mai 1983, 331 - 350.

/184/ DBT (1998): Abschlußbericht der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt -- Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung". DEUTSCHER BUNDESTAG, Drucksache 13/11200, Bonn, 26. Juni 1998, 252 Seiten.

/185/ DBT (2000): Gesetzentwurf der Fraktionen der SPD und BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN: Entwurf eines Gesetzes zur Umsetzung der UVP-Änderungsrichtlinie, der IVU-Richtlinie und weiterer EG-Richtlinien zum Umweltschutz. DEUTSCHER BUNDESTAG, Drucksache 14/4599, Berlin, 14. November 2000, 168 Seiten.

/186/ DBU (1993): Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt. Az 02430, Referat 32, Antragstitel: Entwicklung eines Verfahrens zur Rekultivierung von Kali-Althalden (Pilotprojekt Bleicherode), Osnabrück, 1993.

/187/ DCGK (2012): Deutscher Corporate Governance - Kodex. Regierungskommission Deutscher Corporate Governance - Kodex in der Fassung vom 15. Mai 2012.

/188/ De Souza, E. (1993): Modelling High Extraction Mining of Deep Potash Deposits.- In: Proceedings 1st Canadian Symposium on Numerical Modelling Applications in Mining and Geomechanics, Montréal, Québec, March 1993, 88 - 99.

/189/ Decima, A. & Wezel, F. C. (1971): Osservazioni sulle evaporiti messiniane della Sicilia centromeridionale.- Rivista Mineraria Siciliana 130/132 (1971), 172 - 187.

/190/ DEM (1983): Devonian Potash Deposits in Manitoba. Mineral Resources Division. Open File Report OF83-3 by B. B. Bannatyne, Winnipeg, 1983, 32p.

/191/ Deppe, S. & Pippig, M. (2002): Erkundung und Maßnahmen zur Beherrschung der Salzlösungszuflüsse im Grubenfeld Merkers.- Kali und Steinsalz, 2002, 40 - 49.

/192/ DepV (2009): Deponieverordnung vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), die zuletzt durch Artikel 7 der Verordnung vom 2. Mai 2013 (BGBl. I S. 973) geändert worden ist.

/193/ DESTATIS (2012): Publikationen im Bereich Daten zur Energiepreisentwicklung.- Statistisches Bundesamt (Online: https://www.destatis.de/, Dezember 2012, 53).- Abrufdatum: 16. Februar 2013.

/194/ Deubel, F. (1942): Gutachten des Reichsamtes für Bodenforschung über die bisherige und zukünftige Versenkung von Kaliabwässern im Werra-Kaligebiet.- Berlin, Az: III 11867/42.

/195/ Deubel, F. (1948): Gutachten der Deutschen Geologischen Landesanstalt in der sowjetischen Besatzungszone über die bisherige und zukünftige Versenkung von Kaliabwässern im Werra-Kaligebiet.- Berlin, Jena, Az: III S637/48 H.

/196/ Deubel, F. (1954): Zur Frage der unterschiedlichen Abwasserversenkung in der Kaliindustrie.- Abh. dtsch. Akad. Wiss. Berlin, math.- nat. Kl., H3, Berlin, 23 Seiten.

/197/ DGFZ e.V. (2005): Wasserhaushalt und salinare Gewässerbelastungen im Einzugsgebiet der Unstrut - Untersuchungen und Modellierungen - Abschlussbericht zum BMBF-Projekt „Erstellung eines Management-Tools zur Wasserbewirtschaftung unter den Bedingungen bergbaubedingter salinarer Einträge im Einzugsgebiet der oberen und mittleren Unstrut" FKZ: 0330028. Dresdner Grundwasserforschungszentrum e.V., Dresden, 31. Oktober 2005, 207 Seiten.

/198/ Diekmann, R. (1991): Kalitrocknung: Vergangenheit, Gegenwart, Zukunft.- Proceedings Kali '91 - Second International Potash Technology Conference, Hamburg, 26 - 29 May 1991.

/199/ Dietterle, B., Fliege, H. & Marggraf, P. (1988): Vortriebsmaschineneinsatz bei der Streckenauffahrung im unmittelbaren Liegenden eines stark CO_2-imprägnierten Flözes.- Unveröff. Vortrag anläßlich der 16. Kalifachtagung der Kali-Steinsalz- und Spatindustrie des VEB Kombinat Kali, November 1988.

/200/ Dittmeyer, R., Keim, W., Kreysa, G. & Oberholz, A. (Hrsg.) (2005): Winnacker·Küchler: Chemische Technik- Prozesse und Produkte.- 5. erweiterte und aktualisierte Auflage, Wiley-VCH, Weinheim, 9677 Seiten, 4661 Abbildungen.

/201/ Djahanguiri, F., Gould, J. E. & Mahtab, M. A. (1983): Status of Design of a Nuclear Waste Repository in Salt in the USA.- In: Proceedings 1st International Potash Technology Conference, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, October 03 - 05, 1983, Pergamon Press, Toronto, 99 - 104.

/202/ Döhner, C. (1970): Stratigraphie des Staßfurt-Salinars und Probleme der Liegend- und Hangendabgrenzung.- Ber. deutsch. Ges. geol. Wiss., A 15 (1970), 4, 517 - 538.

/203/ Döhner, C. (2001): Regionale Aspekte der Entwicklung des Zechsteins 2 im Südharz-Kalirevier.- Beitr. Geol. Thüringen, N.F. 8 (2001), 249 - 269.

/204/ Döhner, C. & Elert, K.-H. (1975): Genetische Prozesse im Stassfurt-Salinar.- Z. Geol. Wiss., 1975, 121 - 141.

/205/ Döhner, C., Heynke, A. & Rauche, H. (2003): Die Geologie der Südharz-Unstrut-Kalilagerstätte.- In: Bartl, H.; Döring, G., Hartung, K., Schilder, C. & Slotta, R. (Hrsg.): Kali im Südharz-Unstrut-Revier.- Band 1, Selbstverlag des Deutschen Bergbau-Museums Bochum, Sondershausen, 2003, 83 - 129.

/206/ Domning, H. (1977): Die Grobkorn-Kristallisationsanlage des Werks Wintershall.- Kali und Steinsalz, 1977, 155 - 160.

/207/ Döring, G. (2005): Entwicklung der Kali-Verarbeitungstechnologie - Verfahren und Ausrüstungen.- In: Bartl, H.; Döring, G., Hartung, K., Schilder, C. & Slotta, R. (Hrsg.): Kali im Südharz-Unstrut-Revier.- Band 3, Selbstverlag des Deutschen Bergbau-Museums Bochum, Sondershausen, 2003, 272 Seiten.

/208/ Döring, T., Heinrich, F. & Pforr, H. (1965): Zur Frage des Verformungs- und Festigkeitsverhaltens statistisch isotroper und homogener Gesteine mit inelastischen Verformungseigenschaften.- Bericht über das 6. Ländertreffen des Internationalen Büros für Gebirgsmechanik, Leipzig, 03. - 07. November 1964, Akademie-Verlag Berlin, 1965, 68 - 80.

/209/ Dreyer, W. (1963): Die Bedeutung der Festigkeit des Gebirges im Kali- und Steinsalzbergbau.- 5. Ländertreffen des Internationalen Büros für Gebirgsmechanik, Leipzig, November 1963, 68 - 88.

/210/ Drüppel, E. (2010): Entwicklung eines Konzeptes für die schneidende Gewinnung im Steinsalz.- Dissertation an der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik der Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 10. Februar 2010, 194 Seiten.

/211/ Duchrow, G. (1978): Die wissenschaftlich-technische Entwicklung der Kaliindustrie der DDR.- Vortrag anlässlich der 5. Fachtagung des Ministeriums für Erzbergbau, Metallurgie und Kali mit Studenten und Aspiranten an Hochschulen der UdSSR in Bleicherode, 1978.

/212/ Duchrow, G. (1990): Die bergtechnische Entwicklung des Kalisalzbergbaus der DDR.- Glückauf 126 (1990), 1016 - 1033.

/213/ Duchrow, G. & Schilder, C. (1985): Lagerstätten-Verlustsenkung bei der Anwendung von Kammer-Pfeiler-Abbauverfahren. Neue Bergbautechnik 15 (1985), 12, 441 - 446.

/214/ Duchrow, G., Fitz, I., Grüschow, N. & Fulda, D. (1990): Possibilities for profitable carnallitite extraction in East Germany.- Phosphorus and Potassium, 1990, 26 - 32.

/215/ Duchrow, G., Fitz, I., Grüschow, N. & Fulda, D. (1991): Chancen für einen rentablen Carnallititbergbau.- Neue Bergbautechnik 20 (1991), 1, 22 - 27.

/216/ Duchrow, G., Fulda, D. & Schwandt, A. (1980): Zur Klassifikation spezieller Abbaubedingungen und Abbaulösungen im Kalibergbau der DDR.- Neue Bergbautechnik 10 (1980), 2, 85 - 92.

/217/ Dunger, V. (2006): Entwicklung und Anwendung des Modells BOWAHALD zur Quantifizierung des Wasserhaushaltes oberflächengesicherter Deponien und Halden.- Habilitationsschrift an der Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau der TU Bergakademie Freiberg, 06. Oktober 2006, 475 Seiten.

/218/ Dutta, R. (1983): Separation of Potassium Magnesium Salts from Crude Mineral Salts by Electrostatic Methods - A New Concept.- Proceedings Sixth Symposium on Salt, Toronto, 24. - 28. Mai 1983, 575 - 576.

/219/ Eatock, W. H. (1982): Potash Refining in Saskatchewan.- Mining Engineering 42 (1982), 1350 - 1353.

/220/ Eatock, W. H. (1985): Advances in Potassium Mining and Refining.- In: Mundson, R. D. (ed.) Potassium in Agriculture, Proceedings of an international symposium, Atlanta, Georgia, 07. -10. Juli 1985, 29 - 48.

/221/ EC (2001): EUROPÄISCHE KOMMISSION, Mitteilung der Kommission Nachhaltige Entwicklung in Europa für eine bessere Welt: Strategie der Europäischen Union für die nachhaltige Entwicklung (Vorschlag der Kommission für den Europäischen Rat in Göteborg), KOM/2001/0264 (endgültige Fassung) 2001 (Online: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:52001DC0264).- Abrufdatum: 12. September 2013.

/222/ EC (2002a): EUROPEAN COMMISSION, Project Finance Data Sheet: Cleveland Potash - Reduction of Waste Discharge by Underground Disposal of Process Residue.- Project reference LIFE98 ENV/UK/000603; European Commission, Environment LIFE Programme, 2002, 4p.

/223/ EC (2002b): EUROPEAN COMMISSION, (EC)1606/2002, EU Accounts Modernisation Directive effective for financial years on or after April 01, 2005, 4p.

/224/ EC (2003): EUROPÄISCHE KOMMISSION, Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über die Bewirtschaftung von Abfällen aus der mineralgewinnenden Industrie.- auch KOM (2003) 319, endgültig 2003/0107 (COD), Brüssel, 02. Juni 2003.

/225/ EC (2004): EUROPEAN COMMISSION, EU Joint Research Centre - Institute for Prospective Technological Studies: Reference Document on Best Available Techniques for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities, July 2004, 24p.

/226/ EC (2009): EUROPEAN COMMISSION, Reference Document on Best Available Techniques for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities, January 2009, 557p

/227/ EC (2012a): EUROPEAN COMMISSION, Proposal for a decision of the European Parliament and of the council on a General Union Environment Action Programme to 2020 „Living well, within the limits of our planet", COM/2012/0710 final - 2012/0337 (COD), July 10, 2012, 37p.

/228/ EC (2012b): EUROPEAN COMMISSION, Opinion of the European Economic and Social Committee on the 'Proposal for a Decision of the European Parliament and of the Council on accounting rules and action plans on greenhouse gas emissions and removals resulting from activities re-lated to land use, land use change and forestry' COM (2012) 93 final - 2012/0042 (COD) and on the 'Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Accounting for land use, land use change and forestry (LULUCF) in the Union's climate change commitments' COM (2012) 94 final, Official Journal C 351, 85, November 15, 2012, 4p.

/229/ ECORING (2008): Biologisch-ökologische Untersuchungen zur Abschätzung von Auswirkungen veränderter Salzeinleitungen auf die aquatische Flora und Fauna der Werra Ergebnisse der Untersuchungen 2004-2007.- Gutachten im Auftrag der K+S KALI GmbH, Hardegsen, Uslar, September 2008, 208 Seiten.

/230/ ECORING (2010): Biologisch-ökologische Untersuchungen zur Abschätzung von Auswirkungen veränderter Salzeinleitungen auf die aquatische Flora und Fauna der Werra Ergebnisse der Untersuchungen 2008-2009.- Gutachten im Auftrag der K+S KALI GmbH, Hardegsen, Uslar, Mai 2010, 118 Seiten.

/231/ EFE (2014): Generalitat fija 2017 como fecha límite para dejar de verter sal en Cogulló, Noticias 02. Oktober 2014, Finanzas (Online: http://www.finanzas.com/noticias/empresas/20141002/generalitat-fija-2017-como-2770378.html).- Abrufdatum: 15. Januar 2015.

/232/ EG (2000): EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT, Verordnung (EG, Euratom) Nr. 99/2000 des Rates vom 29. Dezember 1999 (TACIS) über die Unterstützung der Partnerstaaten in Osteuropa und Mittelasien, geändert durch die Verordnung des Rates über den Zugang zur Außenhilfe der Gemeinschaft.

/233/ Eisenburger, D. & Gundelach, V. (2000): GPR Measurements for Determining 3-dimensional Structures within Salt Deposits.- In: Proceedings Eight Symposium on Salt, The Hague, The Netherlands, May 07 - 11, 2000, 113 - 118.

/234/ EKVvSG (2008): Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006.

/235/ Elsass, P. (2000): Die Versalzung des Grundwassers im südlichen Elsaß.- Jahresbericht 2000, AWBR Arbeitsgemeinschaft Wasserwerke Bodensee-Rhein. Freiburg i. Br. 2000, 123 - 132.

/236/ Elston, D. P. & Shoemaker, E. M. (1962): Salt Anticlines of the Paradox Basin, Colorado and Utah.- In: Proceedings First Symposium on Salt, Cleveland, Ohio, Mai 1962, 131 - 146.

/237/ Emons, H. H. (2001): Die Kaliindustrie - Geschichte eines deutschen Industriezweiges?- Vortrag im Plenum der Leibnitz-Sozietät zu Berlin am 19. April 2001.

/238/ Emons, H. H. & Walter, H-H. (1984): Mit dem Salz durch die Jahrtausende - Geschichte des weißen Goldes von der Urzeit bis zur Gegenwart. VEB Deutscher Verlag der Grundstoffindustrie, Leipzig, 1984, 226 Seiten.

/239/ ERCOSPLAN (1997): Aufbau und Betrieb eines wasserwirtschaftlichen Haldenmonitorings für das Südharz-Kalirevier.- Abschlußbericht, ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH, Erfurt, 16. Februar 1997, 261 Seiten.

/240/ ERCOSPLAN (2002): KCl Production Plant Playa of Khor, Basic Engineering, Final Report.- ERCOSPLAN Ingenieurbüro Anlagentechnik GmbH, Erfurt, 30. Juli 2002, 105 Seiten.

/241/ ERCOSPLAN (2005): 50 Jahre KALI-INGENIEURBÜRO Erfurt: Ein halbes Jahrhundert innovatives Engineering für die Mineralsalzindustrie: 1955 - 2005.- ERCOSPLAN, Erfurt, 2005, 191 Seiten.

/242/ ERCOSPLAN (2007a): Studie zur Bewertung der Alternative: Reduzierung der im Werk Neuhof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer durch Einführung von Trocken- und/oder Spülversatz.- ERCOSPLAN, Erfurt, 01. Juni 2007, 55 Seiten, 8 Abbildungen, 7 Anlagen, 1 Anhang.

/243/ ERCOSPLAN (2007b): Studie zur Bewertung der Alternative: Verdunstung der im Werk Neuhof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer durch Berieselung der Haldenoberfläche.- ERCOSPLAN, Erfurt, 01. Juni 2007, 44 Seiten, 15 Abbildungen, 1 Anlage, 1 Anhang.

/244/ ERCOSPLAN (2007c): Studie zur Bewertung der Alternative: Reduzierung der im Werk Neuhof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer durch Eindampfen oder Tiefkühlen.- ERCOSPLAN, Erfurt, 01. Juni 2007, 44 Seiten, 11 Abbildungen, 1 Anlage, 2 Anhänge.

/245/ ERCOSPLAN (2007d): Studie zur Bewertung der Alternative: Reduzierung und/oder Entsorgung der im Werk Neuhof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer durch Einspülen in Grubenhohlräume.- ERCOSPLAN, Erfurt, 01. Juni 2007, 35 Seiten, 8 Abbildungen, 5 Anlagen, 1 Anhang.

/246/ ERCOSPLAN (2007e): Studie zur Bewertung der Alternative: Verwertung der im Werk Neuhof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer im Verarbeitungsprozess der Fabrik Hattorf des Werkes Werra.- ERCOSPLAN, Erfurt, 01. Juni 2007. 35 Seiten, 10 Abbildungen, 1 Anlage.

/247/ ERCOSPLAN (2007f): Studie zur Bewertung der Alternative: Entsalzung der im Werk Neuhof-Ellers der K+S KALI GmbH zur Entsorgung anfallenden Salzwässer durch Nanofiltration.- ERCOSPLAN, Erfurt, 01. Juni 2007, 37 Seiten, 10 Abbildungen, 1 Anlage.

/248/ ERCOSPLAN (2007g): Studie zur Bewertung der Alternative: Entsalzung der im Werk Neuhof-Ellers der K+S KALI GmbH anfallenden Salzwässer durch Umkehrosmose.- ERCOSPLAN, Erfurt, 01. Juni 2007, 30 Seiten, 7 Abbildungen, 1 Anlage, 1 Anhang.

/249/ ERCOSPLAN (2007h): Studie zur Bewertung der Alternative: Reduzierung und/oder Entsorgung der im Werk Neuhof-Ellers der K+S KALI GmbH durch die Aufhaldung der Verarbeitungsrückstände anfallenden Salzwässer durch Abdeckung der Haldenoberfläche.- ERCOSPLAN, Erfurt, 01. Juni 2007, 38 Seiten, 7 Abbildungen, 1 Anlage, 1 Anhang.

/250/ ERCOSPLAN (2007i): Expert statement on mining safety of Mine BKPRU-2 and Mine BKPRU-4 (referred to elsewhere in this document as Mine 2 and Mine 4) in comparison to the flooded Mine BKPRU-1.- In: LSE (ed.): Prospectus Initial Public Offering (IPO) JSC URALKALI.- London Stock Exchange Group, Alternative Investment Market, Exhibit B, Executive Summary, English Version 1 -11, London, 12. Oktober 2007.

/251/ ERCOSPLAN (2007j): Expert statement on the environmental impact of flooding Mine BKPRU-1.- In: LSE (ed.): Prospectus Initial Public Offering (IPO) JSC URALKALI.- London Stock Exchange Group, Alternative Investment Market, Exhibit B, Executive Summary, English Version 12 -18, London, 12. Oktober 2007.

/252/ ERCOSPLAN (2007k): Technical Report: "Resource Estimate For the Makola ExplorationPermit Area, Kouilou Region, Republic of Congo for MagMinerals", 02. November 2007. 130 Seiten, 19 Abbildungen, 23 Tabellen, 4 Anhänge.

/253/ ERCOSPLAN (2008): Technical Report: "Reserve Estimate for MagMinerals Makola Permit Area, Kouilou Region, Republic of Congo, February 29, 2008. 132p.

/254/ ERCOSPLAN (2012): Potash Fertilizer Production in the 21st Century. Guide Book for Technical Excursions at the Anniversary Symposium on November 08 - 12, 2012, ERCOSPLAN Erfurter Consulting und Planungsbüro GmbH, Erfurt, 34p.

/255/ ERCOSPLAN (2015): Datenbanken Kaliproduzenten - Sektion IV: Datenbestand aus öffentlich zugänglichen Quellen; und Sektion II, Kategorie II.3: Datenbestand nicht-klassifizierter Quellen, interne Arbeitsunterlage, unveröffentlicht.- ERCOSPLAN Unternehmensgruppe, Erfurt, Stand 31. Mai 2015.

/256/ Ernst, L. (1986): Zur Ursache und zum Mechanismus der Kontaktaufladung von NaCl- und KCl-Kristallen bei der elektrostatischen Rohsalztrennung.- Kali und Steinsalz, 1986, 275 - 286.

/257/ EU (2009): EUROPEAN UNION, Opinion of the European Economic and Social Committee on the „Non-energy mining industry in Europe", 2009/C 27/19.- Official Journal of the European Union, February 03, 2009, 6p.

/258/ Eulenberger, K.-H. (2001): Untersuchungsergebnisse über die Eignung von Spülversatzmaterial aus Rückständen der Kalirohsalzverarbeitung als Verfüll- und Verschlußmaterial in UTD im Salinar.- FFH Freiberger Forschungsheft A 855, Freiberg, 2001.

/259/ Eulitz, K., Müller, M. & Sommer, T. (2005): Gebietsanalyse und Modellkopplung zur Erfassung des salinaren Grundwasserzustroms im Kalirevier Nordthüringens. Fachtagung - Nachsorge betriebsbedingter Boden- und Grundwasserschäden des Bergbaus nach der endgültigen Betriebsstilllegung. Proceedings des DGFZ e.V., Heft 27, Dresden, 343 - 348.

/260/ EUNOMIA, BGS & WARDELL ARMSTRONG (2015): Study on the Competitiveness of the EU Primary and Secondary Mineral Raw Materials Sectors. Final Report for DG Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. Ref. Ares(2015)1451434 - 01/04/2015. January 30, 2015, 260p.

/261/ Evans, M. (2012): A New Landscape in Potash Markets.- In: Abstracts & Lectures, Anniversary Symposium Potash Fertilizer Production in the 21st Century - 60 Years of Potash Engineering Made in Erfurt - 20 Years of ERCOSPLAN Group of Companies; Erfurt, 09. November 2012, 118 - 119.

/262/ Evans, R. & Linn, K. O. (1970): Fold relationships within evaporites of the Cane Creek anticline, Utah, in Rau, L.L. & Dellwig, L.F. (Hrsg..): Symposium on salt, 3rd: North Ohio Geological Society, v. 1, Cleveland, Ohio, April 21 -24, 1969, 286 - 297.

/263/ EVKgS (1967): Richtlinie des Rates der Europäischen Gemeinschaft vom 27. Juni 1967 zur Angleichung der Rechts - und Verwaltungsvorschriften für die Einstufung , Verpackung und Kennzeichnung gefährlicher Stoffe (67/548/EWG).

/264/ FAA (1985): Financial Administration Act (R.S.C., 1985, c. F-11). Government of Canada (Online: http://laws-lois.justice.gc.ca/eng/acts/f-11/).- Abrufdatum: 16. Januar 2015.

/265/ Fainburg, G. Z. et al. (2002) Файнбург, Г. З (2001): Спелеотерапия: Методики и эффективность применения.- Файнбург, Г. З, Красноштейн, А. Е., Вотяков, В. М. и др., Материалы Российской научно-практической школы - семинара, посвященного 20-летию спелеоклиматотерапии и 25-летию Российской спелеотерапии, Пермь, 24 - 25 апр. 2002 г. [Speläotherapie: Methoden und Effizienz der Anwendung.- Fainburg, G. Z. u.a., Materialen des wissenschaftlich-praktischen Schulungsseminars anlässlich 20 Jahre Speläo-Klima-Therapie und 25 Jahre Speläotherapie Russlands, Perm, 24. - 25. April 2002].

/266/ FAO (2008): Current world fertilizer trends and outlook to 2011/12.- by Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2008.

/267/ FAZ (2013): Kali-Streit eskaliert in Richtung Handelskrieg (Online: www.faz.net/aktuell/wirtschaft/wirtschaftspolitik/russland-und-weissrussland-kali-streit-eskaliert-in-richtung-handelskrieg-12552872.html).- Abrufdatum: 30. August 2013.

/268/ Fernandez-Lozano, J. A. (1973): Recovery of Epsomite and Sylvite from Seawater Bittern by Crystallization.- In: Proceedings Fourth Symposium on Salt, Houston, Texas, April 08 - 12,1973, The Northern Ohio Geological Society.

/269/ Fernández, M. R. (2008): Tesi Doctoral - La Conca Salina Del Bages i La Qualitat De L'aigua Del Llobregat.- PhD Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2008, 70p.

/270/ Feuga, B. G., Schlund, J.-M. & Wasmer, B. (2005): The Flooding of the Holle Potash Mine (Republic of Congo).- In: Technical Conference Paper Fall 2005 Conference SMRI Solution Mining Research Institute, Nancy, France, October 02- 05, 2005, 20p.

/271/ FI (2015): The right solution for potash.- Fertilizer International 466, May - June 2015, 72 - 76.

/272/ FIDIC (2004): Project Sustainability Management Guidelines.- Fédération Internationale des Ingénieurs Conseils, FI-EN-T-AA-10, 2004.

/273/ Filin, S., Baruch, A., Avni, Y. & Marco, S. (2011): Sinkhole Characterisation in the Dead Sea Area Using Airborne Laser Scanning.- Nat. Hazards 58 (2011), 1135 - 1154.

/274/ Finkenwirth A. & Fritsche H. (1993): Hydrogeologische Möglichkeiten und Grenzen der Versenkung.- DVWK-Miteilungen 24 (1993), 40 - 65.

/275/ Finkenwirth, A. (1963): Gutachten des Hessischen Landesamtes für Bodenforschung zu dem Antrag der Gewerkschaft Wintershall in Heringen auf Erhöhung der täglichen Versenkmenge von 32.000 m³ auf 35.000 m³ Kaliendlauge.- Wiesbaden, Az: 344-45/63 Fkw/Schi.

/276/ Finkenwirth, A. (1964): Die Versenkung der Kaliabwässer im hessischen Teil des Werra-Kalireviers.- Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, 1964, 215 - 230.

/277/ Fleischer, T. (1986): Fortschritte in der automatischen analytischen Prozessüberwachung.- Kali und Steinsalz, 1986, 304 - 313.

/278/ Folz, H. (1491): Dises püchlein saget uns von allen paden die von natur heiß sein. Nürnberg, 1491. Neuausgabe von Rüdiger Krüger: Das Bäderbüchlein. Faksimilie - Edition - Kommentar. Stuttgart 1995.

/279/ Fordham, C. J. (1988): Behavior of Granular Halite for Use as a Backfill in Potash Mines.- Ph.D. Thesis, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, 1988.

/280/ Fortney, S. J. (2001): Advanced Mine-Wide automation in Potash.- In: Hustrulid, W. A. & Bullock, R. L. (Hrsg..): Underground Mining Methods - Engineering Fundamentals and International Case Studies; SME Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Littleton, Colorado, 2001, 143 - 148.

/281/ Fortney, S. J. & Lewis, J. L. (1991): Advanced mining machine automation in potash.- In: Proceedings Kali '91 - Second International Potash Technology Conference.- Hamburg, 26 - 29 May 1991.

/282/ FP (2013): The end of the potash world as we know it' is no exaggeration, Financial Post, 30 July 2013 (Online: http://business.financialpost.com/news/mining/potash-uralkali-prices#__federated=1).- Abrufdatum: 17. Mai 2015.

/283/ Franzke, H. J. & Rauche, H. (1988): Zur Deformation des postsalinaren Deckgebirges im Werra-Kaligebiet der DDR.- Mitt. Ges. Geol. Wiss. DDR, 16 (1988), 2/3, 57 - 58.

/284/ Franzke, H. J. & Rauche, H. (1991): Ablauf der rupturellen Deformationen an der Fränkischen Linie im Bereich des nordwestlichen Thüringer Waldes und Südthüringen.- KTB-Report 91/1, 21 - 39.

/285/ Franzke, H. J., Rauche, H., Franz, E. & Benek, R. (1991): Deformationsbilder der Finne-Störung in verschiedenen Strukturstockwerken. Ges. Geol. Wiss. DDR, Kurzfassungen „Geologisch-tektonischer Bau der Gera-Jachymov Störungszone", Berlin, 1991, 6 - 8.

/286/ Fredlund, D. G. (1991): Long term stability of potash tails piles on soft foundations.- Proceedings Kali '91 - Second lnternational Potash Technology Conference, Hamburg, 26 - 29 May 1991, 143 - 148.

/287/ Fredlund, D. G. & Mittal, H. (1989): Long term stability and deformation of tailings piles and dykes.- Workshop on potash Tailing and Site Decommissioning Options, Saskatoon, Saskatchewan, 43p.

/288/ Fredlund, D. G., Zhang, Z. M. & Macdonald, K. (1993): Analyses for the stability of potash tailings piles.- Can. Geotechn. J. 30 (1993), 491 - 505.

/289/ Freeman, M. (2007): Does the Potash Industry Need Solution Mining?, CRU Group.- In: Technical Conference Paper Spring 2007 Conference SMRI Solution Mining Research Institute, Basel, Switzerland, April 29 - May 02, 2007, 13p.

/290/ Freilich, M. B. & Petersen, R. L. (2005): Potassium Compounds.- In: Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, Electronic Release, published online: 02 December 2005, 42 pages, 10 figures, 18 tables.

/291/ Frenz, W. (2002): Der Grundsatz der nachhaltigen Entwicklung im Kalibergbau.- Kali und Steinsalz, 2002, 32 - 39.

/292/ Fricke, G. (1986): Die elektrostatische Aufbereitung von Kalium- und Magnesiumsalzen.- Kali und Steinsalz, 1986, 287 - 295.

/293/ Fritsche, J. (2000): Influences of deep well injection of waste brine on the environment in the Werra potash region, Germany.- In: Proceedings Eight Symposium on Salt, The Hague, The Netherlands, May 07 - 11, 2000, 867 - 870.

/294/ FT (2013): Russia to become a force in fertiliser, Financial Times (Online: http://www.ft.com/intl/cms/s/0/63fb0672-92c2-11e0-bd88-00144feab49a.html#axzz3Zk3ZbgFC).- Abrufdatum: 10. Mai 2015.

/295/ Fuerstenau, D. W. & Fuerstenau, M. C. (1956): Ionic size in flotation collection of alkali halides.- Mining Engineering 8 (1956), 3, 302 - 307.

/296/ Fulda, D. (1963): Auflösungserscheinungen durch Spülversatzlaugen in carnallitischen Feldesteilen des Südharz-Kalibergbaues.- Bergakademie 15 (1963), 6, 448 - 455.

/297/ Fulda, D. (1964): Die Berücksichtigung des Spülversatzes bei der Abbauplanung.- Bergakademie 16 (1964), 6, 349 - 353.

/298/ Fulda, D. (1965): Zur wirtschaftlichen Gestaltung der Abbauverfahren im Kalibergbau der DDR.- Bergakademie 17 (1965), 728 - 731.

/299/ Fulda, D. (1986): Protokoll einer Beratung am 05.03.86 in Sondershausen zur Studie "Einführung eines Abbauverfahrens mit planmäßigem Versatz und Pfeilerrückbau im Kaliwerk Thomas Müntzer".- Sondershausen, 14. März 1986, 3 Seiten.

/300/ Fulda, D. & Heinrich, F. (1986): Geomechanische Aspekte bei der solenden Gewinnung von Steinsalzlagerstätten.- Neue Bergbautechnik 18 (1986), 11, 218 - 251.

/301/ Fulda, D., Gruchot, G. & Michalzik, A. (1966): Handbuch für den Spülversatz im Kalibergbau.- VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1966, 236 Seiten.

/302/ Fulda, D., Hindemith, W., Müller, D. & Pein, W. (1977): Patentschrift 134 665, Amt für Erfindungs- und Patentwesen der Deutschen Demokratischen Republik, Berlin, 14. März 1979.

/303/ Fulda, D., Jäger, G. & Kutscha, T. (1988): Ist der eingebrachte Versatz im Kalibergbau in der Lage die geomechanische Aufgaben der Abbaupfeiler zu übernehmen?.- Neue Bergbautechnik 18 (1988), 1, 261 - 264.

/304/ Fuzesy, A. (1982): Potash in Saskatchewan.- Saskatchewan Energy And Mines Report 181, 1982, 50p.

/305/ Ganzer, C. K. (2001): Aktueller Stand der Sprengtechnik im Bergbau der Kali und Salz GmbH.- Kali und Steinsalz, 2001, 413 - 420.

/306/ Ganzer, C. K. (2002): Simulation eines Abbaubereiches in der flachen Lagerung im Kalibergbau der K+S Gruppe.- Kali und Steinsalz, 2002, 14 - 23.

/307/ Ganzer, C. K. (2005): Ergebnisse von Versuchen mit Emulsionssprengstoffen in Bergwerken der K+S Gruppe.- Kali und Steinsalz, 2005, 26 - 46.

/308/ Garkushin, P. K. (1984): Гаркушин, П. К. (1984): Разработка мощных калийных залежей без междуэтажной потолочины.- Разраб. рудных месторождений, Респ.межвед.науч.-техн. сб., вып. 38, 1984, стр.53 - 54. [Schwebenloser Abbau mächtiger Kalilager.- Gewinnung der Erzlagerstätten, Respublikanisches ressortübergreifendes wissenschaftlich-technisches Sammelband, Ausgabe 38, 1984, S. 53 - 54.].

/309/ Garkushin, P. K. (1990): Гаркушин, П. К. (1990): Экономический механизм рационального использования недр.- Комплексное использование минерального сырья, Алма-Ата, №1, 1990, стр. 88 - 91. [Ökonomisches Verfahren der rationalen Bodenschätzenutzung.- Komplexe Nutzung der Mineralrohstoffe, Alma-Ata, Nr. 1, 1990, S. 88 - 91.].

/310/ Garkushin, P. K., Sikora, I. S. & Tarasova, V. P. (1987): Гаркушин, П. К., Сикора, И. С. & Тарасова, В. П. (1987): Пути интенсификации подземной добычи калийных руд Предкарпатья.- Горный журнал, №7, 1987, стр. 34 - 35. [Wege der Intensivierung der untertägigen Kaliabbau in den Vorkarpaten.- Bergbaujournal, Nr. 7, 1987, S. 34 - 35.].

/311/ Garkushin, P.K. (1972): Гаркушин, П. К. (1972): Исследование и выбор составов твердеющей закладки для калийных рудников Прикарпатья.- Дис. канд. тех. наук, ЛГИ, Ленинград, 1972, 179 стр. [Untersuchung und Auswahl der Zusammensetzung des Versatzes für die Kalibergwerke der Vorkarpaten.- Kandidatur-Dissertation, Leningrader Bergbauinstitut, Leningrad, 1972, 179 S.].

/312/ Garrett, D. E. (1969a): Factors in the Design of Solar Salt Plants-Part IV By-Product Chemical Recovery.- In: Proceedings Third Symposium on Salt, Cleveland, Ohio, April 21 -24, 1969, 168 - 175.

/313/ Garrett, D. E. (1969b): The Chemistry and Origin of Potash Deposits.- Proceedings Third Symposium on Salt, Cleveland, Ohio, April 21 -24, 1969, 211 - 222.

/314/ Garrett, D. E. (1979): By-Products Recovery from Solar Salt Operations.- Proceedings Fifth Symposium on Salt, Hamburg, 29. Mai - 01. Juni 1979, 281 - 293.

/315/ Garrett, D. E. (1996): Potash: deposits, processing, properties and uses. Chapman & Hall, London, 1996, 374p.

/316/ GefStoffV (2010): Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen vom 26. November 2010 (BGBI. I S 1643 geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 28. Juli 2011 (BGBI. I S 1622).-Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Dortmund, 57.

/317/ Gendzwill D. J. & Prugger F. F. (1990): Seismic activity in a flooded Saskatchewan potash mine.- In: Fairhurst, C. (Hrsg.): Proceedings 2nd Int. Symp. on Rockbursts and Seismicity in Mines, Minneapolis, 8 - 10 June 1988, Balkema, Rotterdam, 115 - 120.

/318/ Gendzwill, D. J. (1984): Induced Seismicity in Saskatchewan Potash Mines. Proceedings, 1st International Congress on Rockbursts and Seismicity in Mines, South African Institute of Mining and Metallurgy, Symposium Series No. 6, Johannesburg, South Africa, 1984, 131 - 146.

/319/ Gendzwill, D. J. & Martin, N. (1996): Flooding and loss of Patience Lake potash mine.- CIM Bulletin 89 (1996), 62 - 73.

/320/ Gendzwill, D. J. & Prugger, A. (1991): Ten years of seismic monitoring in Saskatchewan potash mines.- Proceedings Kali '91 - Second International Potash Technology Conference, Hamburg, 26 - 29 May 1991.

/321/ Gendzwill, D. J. & Unrau, J. (1996): Ground control and seismicity at International Minerals and Chemical (Canada) Global Limited.- CIM Bulletin 89 (1996), 1000, 52 - 61.

/322/ Georgi, F., Menzel, W. & Schreiner, W. (1975): Zum geomechanischen Verhalten von Steinsalz verschiedener Lagerstätten der DDR Teil I: Das Festigkeitsverhalten.- Neue Bergbautechnik 5 (1975), 9, 669 - 676.

/323/ Gerling, R. (2009): Strategien zur Vermeidung und Entsorgung von festen und flüssigen Rückständen in den Kaliwerken an Fulda und Werra.- Kali und Steinsalz, 2009, 16 - 27.

/324/ Gerling, R. (2014a): Maßnahmenpaket zum Gewässerschutz im Werk Werra - Stand und Perspektiven.- Vortrag Dr. Rainer Gerling, K+S KALI GMBH, 23. Sitzung des Runden Tisches, Bürgerhalle Heringen, 21. Januar 2014, 25 Seiten.

/325/ Gerling, R. (2014b): Betriebsbesichtigung Werk Wintershall.- Vortrag Dr. Rainer Gerling, K+S KALI GMBH, 23. Sitzung des Runden Tisches, Bürgerhalle Heringen, 21. Januar 2014, 32 Seiten.

/326/ Gerling, R. (2014c): Haldenwasserminimierung durch technische Maßnahmen.- Vortrag Dr. Rainer Gerling, K+S KALI GMBH, 24. Sitzung des Runden Tisches, Stadtpalais Kassel, 15. September 2014, 14 Seiten.

/327/ GewinnungsAbfV (2009): Gewinnungsabfallverordnung vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900, 947), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 29 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist.

/328/ Ghazi, A. Mohamad (2000): Trace element determination of single fluid inclusions by laser ablation ICP-MS: Applications for halites from sedimentary basins.- The Analyst 125 (2000), 1, 205 - 210.

/329/ GHH (2013): GHH Fahrzeuge GmbH, Produktübersicht (Online: http://www.ghh-fahrzeuge.de/german/produkte/).- Abrufdatum: 21. November 2013.

/330/ Gimm, W. (1961): Gebirgsmechanische Beobachtungen beim Pfeilerrückbau in Bleicherode und Schlußfolgerungen für die Abbauverfahren im Kalibergbau.- Neue Hütte, 6 (1961), 4 - 17.

/331/ Gimm, W. (1968): Kali- und Steinsalzbergbau - Band I: Aufschluß und Abbau von Kali- und Steinsalzlagerstätten.- VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1968, 600 Seiten.

/332/ Gimm, W. & Pforr, H. (1961): Gebirgsschläge im Kalibergbau unter Berücksichtigung von Erfahrungen des Kohle- und Erzbergbaus.- FFH Freiberger Forschungshefte, A 173, Akademie Verlag Berlin, 1961.

/333/ Gimm, W. & Sigmundt, M. (1975): Internationaler Stand und Entwicklungstendenzen beim verlustarmen Abbauverfahren im Kalibergbau.- Neue Bergbautechnik 5 (1975), 828 - 855.

/334/ GLOBES (1999): Volkswagen, DSW, to Invest $18 Mln More in Magnesium Plant Rosen: Magnesium will reach break-even point next year and start profiting as of 2002. This year‘s expected sales are 24,000 tons, 31 October 1999 (Online: http://www.globes.co.il/en/article-379264).- Abrufdatum: 17. Mai 2015

/335/ GLOBES (2002): Bank Leumi will record NIS 45m loss on ICL holding: The loss is due to an expected $200 million fall in the value of Israel Chemicals‘ magnesium plant, March, 17, 2002, (Online: http://www.globes.co.il/en/article-571258).- Abrufdatum: 17. Mai 2015.

/336/ GMA & BHP-BRUGGER (2013): Studie zu den sozioökonomischen Wirkungen des Werkes Werra. Wissenschaftliche Studie um Auftrag der K+S KALI GmbH. GMA & BHP - BRUGGER UND PARTNER AG, München/Zürich, Oktober 2013, 120 Seiten.

/337/ GMA & BHP-BRUGGER (2014): Studie zu den soziökonomischen Wirkungen des Werkes Zielitz. Wissenschaftliche Studie im Auftrag von K+S KALI GmbH. GMA & BHP - BRUGGER UND PARTNER AG, München/Zürich, November 2014, 122 Seiten,.

/338/ GNKwAr (2012): Gesetz zur Neuordnung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallrechts v. 24.2.2012 (BGBl. I S. 212), mit dem die RL 2008/98/EG umgesetzt wird.

/339/ GOLDER (2006): Project Proposal proposed fien tailings management area PCS Potash, Allan Division Allan, Saskatechewan.- Report 06-1362-231 Golder Associates, April 2006, 30p.

/340/ Goldstein, R. H. (2001): Clues from fluid inclusions.- Science, 29 (2001), 2, 1009 - 1011.

/341/ Golubev, B. M. (2001): Голубев, Б. М. (2001): Комплексное освоение минеральных ресурсов - основа стабильного социально-экономического развития Березниковско-Соликамского промышленного региона Пермской области.- Геология и освоение ресурсов галогенных формаций, Пермь, 2001, стр. 64 - 70. [Komplexe Erschließung der Mineralressourcen - Grundlage für eine stabile sozial-ökonomische Entwicklung des Industriegebites Berezniki-Solikamsk, Region Perm.- Geologie und Erschließung der Ressourcen von Halogenformationen, Perm, 2001, S. 64 - 70].

/342/ Goor, A., Lin, I. J. & Metcalfe, J. (1992): Measurements of the Rates of Dissolution and the Petrography of Some Mixtures of Halite, Sylvite and Carnallite.- Proceedings Seventh Symposium on Salt, Kyoto, April 06 - 09, 1992, 369 - 376.

/343/ Görisch, F. & Yaramanci, U. (1994): Anwendung und Beurteilung von Migrationsverfahren an Radarreflexionsmessungen.- Kali und Steinsalz, 1994, 283 - 291.

/344/ GOS (2009): Reasons For Decision Ministerial Approval Pursuant To Section 15(1)(A) The Environmental Assessment Act. PotashCorp Allan Division, Allan Fine Tailings Management Area, Government of Saskatchewan, Minister of Environment, Nancy Heppner, 10 June 2009, Regina, Saskatchewan, Canada, 5p.

/345/ GOSGORTEKHNADZOR (1993): Methodische Anweisungen zur Organisation und Durchführung einer Kontrolle für die bergbau-technische Rekultivierung der durch den Bergbau beeinträchtigten Nutzflächen. RD 07-35-93.- Föderales Bergbau- und Wirtschaftsaufsichtsbehörde Russlands (GOSGORTEKHNADZOR), Inkraftsetzung am 10.09.1993. [Госгортехнадзор (1993): Методические указания по организации и осуществлению контроля за горнотехнической рекультивацией земель, нарушенных горными разработками, РД 07-35-93.- Федеральный горный и промышленный надзор России (Госгортехнадзор России) 10.09.1993].

/346/ Götte, J. (1990): Versuche zur staubarmen Aufmahlung von Kalirohsalzen auf Prallmühlen.- Kali und Steinsalz, 1990, 261 - 264.

/347/ Gourbe, M. (2007): Evaluacion de la reutilizacion de residuos salinos en la industria cloro-alcali.- Master thesis at the Universitat Politècnica de Catalunya, Departament d'Enginyeria Química, July 2007, 107p.

/348/ Gray, R. E. (1990): Mining subsidence- past, present, future.- International Journal of Mining and Geological Engineering 8 (1990), 400 - 408.

/349/ Greif, R. & Streckdenfinger, M. (1983) On the subject of cutting extraction in French potash mining.- Erzmetall 36 (1983), 3, 111 - 118.

/350/ Grimmig, G. (1996): Die Entwicklung des Bergwerkes Zielitz.- Kali und Steinsalz, 1996, 86 - 93.

/351/ Grishina, S. & Knipping, B. (1995): Fluid inclusions in evaporites - some implications on disposal of high-level radioactive wasters.- Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía 18 (1995), 1, 91 - 92.

/352/ Grüschow, N. (1994): Solution Mining of Potash Ore.- In: Proceedings Fall 1994 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, Hannover, Germany, October 1994, 13p.

/353/ Grüschow, N. (1998): Solution Mining of Thin Inclining Potash Deposits.- In: Proceedings Fall 1998 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, Rome, Italy, October 1998, 151 - 153.

/354/ Grüschow, N. & Krumbein, J. (1997): Status and Development of Carnallite Solution Mining in Bleicherode, Germany.- In: Proceedings Spring 1997 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, April 27 - 28, 2009, Cracow, Poland, 13p.

/355/ Grüschow, N. & Rembe, M. (2012): Numerical Modeling of Potash Solution Mining Caverns.- Proceedings Fall 2012 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, Bremen, Germany, October 01 - 02, 2012, 19p.

/356/ Grüschow, N. & Saalbach, B. (1990): Extraction of carnallitite by solution mining - an economic and ecological alternative to conventional potash mining.- Proceedings Fall 1990 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, Paris, France, October 14 - 19, 16p.

/357/ Günther, R.-M. & Salzer, K. (2007): A Model for Rock Salt, describing transient, stationary, and accelerated Creep and Dilatancy.- In: The Mechanical Behavior of salt; Proceedings 6th Conference, Hannover, 22. - 25. May 2007. Taylor & Francis/Balkema, Leiden, 2007, 109 - 117.

/358/ HAARETZ (2001): Mad cows and Russian magnesium cut ICL profits, 28. August 2001, (Online: http://www.haaretz.com/print-edition/business/mad-cows-and-russian-magnesium-cut-icl-profits-1.68210).- Abrufdatum: 17. Mai 2015.

/359/ Haase, G. (1963): Zum Problem der Abwässerversenkung im thüringischen Werra-Kaligebiet.- Bergakademie 15 (1963), 6, 485 - 490.

/360/ Haase, G. & Oettel, S. (1963): Beitrag zur Kenntnis der Auslaugungserscheinungen im Werra-Kaligebiet.- Bergakademie 15 (1963), 5, 370 - 375.

/361/ Hagedorn, F. (1986): Flotation des Feinkornanteils aus dem Zersetzungsprodukt eines carnallitischen Mischsalzes.- Kali und Steinsalz, 1986, 232 - 238.

/362/ Hahn, S. (2009): Salz: Erlebnis und Gesundheit im Einklang.- Kali und Steinsalz, 2009, 40 - 49.

/363/ Halabura, S. P. (2009): The Carnallitite Deposits of Saskatchewan: Resource Problem or Solution Mining Opportunity?.- Proceedings Spring 2009 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, Cracow, Poland, April 27 -28, Poland, 61 - 81.

/364/ Halabura, S. P. & Hardy, M. P. (2007): An Overview of the Geology of Solution Mining of Potash in Saskatchewan.- In: Proceedings Fall 2007 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, Halifax, Nova Scotia, October 08 - 09, 2007, 279 - 287.

/365/ Halabura, S. P., Piche, L. M., Gebhardt, E. & Soroka, T. (2010): Current status of potash mineral resource estimation, developments 2005 to present.- In: Proceedings Fall 2010 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, Leipzig, Germany, October 2010, 285 - 287.

/366/ Hambrook, B. (2012): Low-Cost Potash Production from Brine Reservoirs in the Sechura Desert, Peru.- In: Abstracts & Lectures, Anniversary Symposium Potash Fertilizer Production in the 21st Century - 60 Years of Potash Engineering Made in Erfurt - 20 Years of ERCOSPLAN Group of Companies; Erfurt, 09. November 2012, 90 - 93.

/367/ HANDELSBLATT (2013): Weißrussland erlässt Haftbefehl gegen russischen Milliardär, 02. September 2013 (Online: http://www.handelsblatt.com/politik/international/kalisalz-geschaeft-weissrussland-erlaesst-haftbefehl-gegen-russischen-milliardaer/8729140.html).- Abrufdatum: 02. September 2013.

/368/ Handford, C. R. (1981): A process-sedimentary framework for characterizing recent and ancient sabkhas.- Sedimentary Geology, Vol. 30, 255 - 265.

/369/ Hao, L., Xinbin, Y., Guangyuanm L., Hui, Y. & Changjing, T. (2014): Development and Utilization of Potash Resources in Lop Nor, Xinjiang.- Acta Geologica Sinica (English Edition) 88 (2014), 1, Seite 424.

/370/ Hardie, L. A. (1990): The roles of rifting and hydrothermal CaCl2 brines in the origin of potash evaporites: an hypothesis.- American Journal of Science 290 (1990), 1, 43 - 64.

/371/ Hardie, L. A. (1991): On the Significance of Evaporites.- Annual Review of Earth and Planetary Sciences 19 (1991), 131 - 168.

/372/ Harms, J. (1981): Das Kinderkrankenhaus „Seehospiz Kaiserin Friedrich“ in Norderney - Entstehung und Entwicklung von 1886 bis 1976. Ein Beitrag zur Geschichte der sozialen Thalassotheraphie.- Dissertation an der Universität Kiel, o. S.

/373/ Hart, R. T. (1985): A review of waste management in the potash industry and options for decommissioning and abandonment of Potash tailings.- CANMET Report 35024, Energy, Mines and Resources, Ottawa, 66p.

/374/ Hartwig, H.-J., Scholz, L. & Tschernatsch, V. (2001): Erfahrungen bei der Verwahrung von stillgelegten Kalisalzbergwerken.- In: Thoma, H., Hartmann, O. & Rauche, H. (Hrsg.): Vortrags- und Exkursionsveranstaltung Kali-, Steinsalz und Kupferschiefer in Mitteldeutschland III, Thema „Aspekte der Langzeitsicherheit bei der Nachnutzung und Stilllegung von Kali- und Steinsalzbergwerken“, Sondershausen, 30. und 31. März 2001, Exkursionsführer und Veröffentlichungen der GGW, 211 (2001),4-7 – 4-12.

/375/ Harvey, H. E., Miller, R., Grueschow, N., Neumann, T. & Hardy, M.(2006): A History of Solution Mining at the Crane Creek Mine, Moab, Utah.- In: Proceedings Fall 2006 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, Rapid City, South Dakota, October 01 - 04, 2006, 29p.

/376/ Haug, M. D. & Reid, K. W. (1991): Tailings Pile Decommissioning Options for Saskatchewan Potash Mines.- In: Proceedings Kali '91 - Second International Potash Technology Conference, Hamburg, 26 - 29 May 1991.

/377/ Haug, M. D., Wong, L. C. & Reid, K. W. (1991): Potash tails pile field test covers.- Proceedings 15th Annual British Columbia Mine Reclamation Symposium, Kamloops, British Columbia, 1991, 264 - 275.

/378/ Hauske, K.-H. (1987): In: Kali - Das bunte, bittere Salz. Fulda, D., Hauske, K.H., Heinz, A., Schwandt, A., Gerber, R. & Hindemith, W. (1990), VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.

/379/ Hebblewhite, B. K. (1977): Underground Potash Mine Design Based on Rock Mechanics Principles and Measurements.- Ph.D. Thesis, Newcastle upon Tyne, England, 494p, 3 Enclosures.

/380/ Hebblewhite, B. K., Potts, E. L. J. & Miller, H. D. S. (1979): The Design of Underground Mining Layouts for a Deep Potash Mine on the Basis of Rock Mechanics Investigations.- In: Proceedings 4th International Congress International Society on Rock Mechanics, Montreux, Switzerland, September, 02 - 08, 1979. A. A. Balkema, Rotterdam, Niederlande, 1979, Vol. 2, 219 - 226.

/381/ Heinz, A. & von der Osten, R. (Hrsg., 1982): ABC Kali und Steinsalz, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1982.

/382/ Heinze, M., Fiedler, H. J. & Liebmann, H. (1984): Freilandversuche zur Begrünung von Kalirückstandshalden im Südharzgebiet.- Hercynia N. F. 21 (1984), 2, 179 - 189.

/383/ Helms, W., Heidecke, C. & Nauke, H. (1996): Optimierung der Abbauführung beim Örterfestenbau in der Grube Zielitz.- Kali und Steinsalz, 1996, 50 - 56.

/384/ Hempel, D. (1974): Neuere Erkenntnisse über das Auftreten natürlicher brennbarer Gase in Kaligruben der DDR.- Neue Bergbautechnik 4 (1974), 8, 592 - 596.

/385/ Hempel, D. & Richter, K. (1972): Auftreten und Zündung brennbarer Gase in schlagwetter-gefährdeten Kaligruben der DDR: ein Beitrag zur Verhütung von Schlagwetterexplosionen im Kalibergbau; TextBd., Anl.-Bd.- Dissertation, Bergakademie Freiberg, 1972, 290/99 Seiten.

/386/ Herbert, H.-J. (1990): Geochemical Aspects of Water Rock Interactions in Salt.- Proceedings Fall 1990 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, Paris, France, October 14 - 19, 1990, 17p.

/387/ Herbert, H.-J., Sander, W. & Panzer, D. (1986): Results of the geochemical survey programme accompanying the flooding of the potash salt mine Hope in Northern Germany.- In: Proceedings Autumn 1986 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, Amsterdam, September 21 - 24, 1986, 27p.

/388/ Hermann, C. (1925): Einführung in die Kaliindustrie. 1. Auflage, Verlag von Wilhelm Knapp, Halle (Saale), 1925.

/389/ Herne, V. & McGuire, T. (2001): Mississippi Potash, Inc.'s Underground Operations.- In: Hustrulid, W. A. & Bullock, R.L. (2001): Underground Mining Methods - Engineering Fundamentals and International Case Studies.- 137 - 141; SME Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Littleton, Colorado, 2001, 137 - 141.

/390/ Herrmann, A. G. (1979): Methodical Investigations on the Origin of Brines in Salt and Potash Mines.- In: Proceedings Fifth Symposium on Salt, Hamburg, 29. Mai - 01. Juni 1979, 91 - 96.

/391/ Herrmann, A. G. (2007): 100 Jahre „Kali und Steinsalz" - 1907 - 2007. Ein Rückblick.- Kali und Steinsalz, 2007, 6 - 17.

/392/ Herrmann, A. G. & Röthemeyer, H. (1998): Langfristig sichere Deponien. Situation, Grundlagen, Realisierung. Springer Verlag, 475 Seiten.

/393/ HGB: Handelsgesetzbuch, Drittes Buch Handelsbücher, Zweiter Abschnitt, Ergänzende Vorschriften für Kapitalgesellschaften (Aktiengesellschaften, Kommanditgesellschaften auf Aktien und Gesellschaften mit beschränkter Haftung) sowie bestimmte Personenhandelsgesellschaften, Vierter Unterabschnitt Offenlegung. Prüfung durch den Betreiber des Bundesanzeigers, § 325 Offenlegung.

/394/ Hite, R. J. (1973): Evaporite Deposits of the Khorat Plateau, Northeastern Thailand.- In: Proceedings Fourth Symposium on Salt, Houston, Texas, April 08 - 12, 1973, The Northern Ohio Geological Society, 135 - 146.

/395/ Hite, R. J. (1983): The Sulfate Problem in Marine Evaporites.- In: Proceedings Sixth Symposium on Salt, Toronto, 24 - 28 May 1983, 217 - 230.

/396/ HLV (2014): Eine dauerhafte Lösung für die Entsorgung von Salzabwässern.- Gezähekiste, Hessischer Landesverband e.V. im Bund Deutscher Bergmanns-, Hütten- und Knappenvereine e.V. (HLV) 02/2014, 6 - 7.

/397/ HMUKLV (2014): Hessische Umweltministerin Priska Hinz und K+S Vorstandsvorsitzender Norbert Steiner stellen Vier-Phasen-Plan zur Salzabwasser-Entsorgung vor – Werra und Oberweser erreichen wieder Süßwasserqualität.- Pressemitteilung des Hessischen Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Wiesbaden, 29. September 2014.

/398/ HNA (2014): Haldenfest bei K+S: Bei brütender Hitze auf den Monte Kali. Hessische Niedersächsische Allgemeine, 09. Juni 2014 (Online: http://www.hna.de/lokales/rotenburg-bebra/haldenfest-ks-bruetender-hitze-monte-kali-3619041.html).- Abrufdatum: 05. Mai 2015.

/399/ Höck, M., Zippel, P., Siefen, S. & Schöche, G. (2013): Primärmagnesiumgewinnung aus geeigneten Salzlösungen der Kaliindustrie.- TU Bergakademie Freiberg, 2013.

/400/ Hodge, C. A. & Popovici, N. N. (1994) (Hrsg.): Pollution Control in Fertilizer Production, Marcel Dekker, New York, May 20, 1994.

/401/ Höfer, K.-H. (1958): Beitrag zur Frage der Standfestigkeit von Bergfesten im Kalibergbau.- FFH Freiberger Forschungshefte, A 100, 1958, 122 Seiten, 24 Anhänge.

/402/ Höfer, K.-H., Berthold, E. & Menzel, W. (1964): Rheologische Modelle und in situ-Messungen im Salzgebirge.- 6. Ländertreffen des Internationalen Büros für Gebirgsmechanik, Leipzig, November 1964, 58 - 67.

/403/ Höfer, K.-H., Fulda, D. & Seidl, E. (1967): Die praktische Durchführung eines Totalabbauversuches auf der Kaligrube Pöthen.- In: Kalisymposium Magdeburg 1965, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1967.

/404/ Hoffmann, D. (1972): Elf Jahrzehnte Deutscher Kalisalzbergbau, Verlag Glückauf, Essen 1972.

/405/ Hofmann, H. (2003): Untersuchungen zur Begrünung und zur Sukzession auf einer anhydritisch geprägten Rückstandshalde der Kaliindustrie im Werragebiet.- Dissertation an der Universität Kassel im Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften - Fachgebiet Landschaftsökologie und Naturschutz, Kassel, Juli 2003, 212 Seiten.

/406/ Hofmann, H.-J. (2001): Entwicklungstendenzen der Spülversatztechnik in den neunziger Jahren.- In: Rauche, H. & Sitz, P. (Hrsg.): Spülversatz im Salzbergbau.- FFH Freiberger Forschungshefte, A 855, Freiberg 2001, 81 - 91.

/407/ Höing-Schulze, F.-W. (1990): Die Exploration des Salzstocks Husum.- Kali und Steinsalz, 1990, 206 - 215.

/408/ Holcomb, D. J. & Shields, M. (1987): Hydrostatic Creep Consolidation of Crushed Salt With Added Water.- SAND87-1990, prepared by Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, 1987.

/409/ Hollstein, A. (1979): Die Granulierung von Kaliumsulfat.- Kali und Steinsalz, 1979, 498 - 500.

/410/ HOLZHAUSTHEATER (2014a): Bühnenplateau für salzigste Bühne Deutschlands perfekt vorbereitet. Holzhaustheater, 09. Juni 2014 (Online: http://www.holzhaustheater.de/news/1/241455/nachrichten/b%C3%BChnenplateauf%C3%BCr-salzigste-b%C3%BChne-deutschlands-perfekt-vorbereitet.html).- Abrufdatum: 05. Mai 2015.

/411/ HOLZHAUSTHEATER (2014b): Positive Bilanz für 15. Kalimandscharo-Festspiele. Holzhaustheater, 21. Juli 2014 (Online: http://www.holzhaustheater.de/news/1/247429/nachrichten/positive-bilanz-f%C3%BCr-15.-kalimandscharo-festspiele.html).- Abrufdatum: 21. Juli 2014.

/412/ Hoppe, W. (1964): Grundlagen, Auswirkungen und Aussichten der Kaliabwässerversenkung im Werra-Kaligebiet.- Geologie 11 (1964), 9, 1059 - 1089.

/413/ Hoppert, H.-D., Jockel, A., Rauche, H. & Rauche, H. (2003): Monitoring im Kali-Altbergbau Thüringens: Grundlage für die Gefährdungsbeurteilung und Maßnahmenplanung.- In: Hartmann, O. & Schönberg, G. (Ed.): Kali-, Steinsalz und Kupferschiefer in Mitteldeutschland IV - Exkurs.f. u. Veröffentl. GGW, 222, Berlin, 2003, 71 – 76.

/414/ Horita, J. & Matsuo, S. (1986): Extraction and isotopic analysis of fluid inclusions in halites.- Geochemical Journal 21 (1986), 261 - 272.

/415/ Horowitz, S. (2010): Salt Cave Therapy: Rediscovering the Benefits of an Old Preservative.- Alternative and Complementary Therapies, 16 (2010), 3, 158 - 162.

/416/ Horvath, T. (1986): Speleotherapy: a special kind of climatotherapy, its role in respiratory rehabilitation.- Int Rehabil Med 8 (1986), 90 - 92.

/417/ Hrynewich, W. (1983): Processing Practice at Central Canada Potash.- Canadian Mineral Processors Meeting, Ottawa, Paper 16.

/418/ Hryniv, S. P., Dolishniy, B. V., Khmelevska, O. V., Poberezhskyy, A. V. & Vovnyuk, S. V. (2007): Evaporites of Ukraine: a review.- In: Schreiber, B. C., Jugli, S. & Babel, M. (Hrsg..): Evaporites Through Space and Time. Geological Society, London, Special Publications, 285, 309 - 334.

/419/ Hsü, K. J. (1972): Origin of saline giants: a critical review after the discovery of the Mediterranean evaporite.- Earth Science Reviews 8 (1972), 371 - 396.

/420/ Hsü, K. J. & Siegenthaler, C. (1969): Preliminary experiments on Hydrodynamic movement induced by evaporation and their bearing on the dolomite problem. Sedimentology 12 (1969), 11 - 25.

/421/ Hufeland, C. W. (1801): Salzbäder in der Gicht.- Frankenhäuser Intelligenzblatt, 08. Juni 1801.

/422/ Hughes, L. (2012): The Colluli Potash Project, Danakhil Depression, Eritrea: The First (Designed) Open Pit Potash Project.- In: Abstracts & Lectures, Anniversary Symposium Potash Fertilizer Production in the 21st Century - 60 Years of Potash Engineering Made in Erfurt - 20 Years of ERCOSPLAN Group of Companies; Erfurt, 09. November 2012, 68 - 69.

/423/ Hüls, H., Menzel, W. & Schreiner, W. (1980): Ergebnisse geomechanischer Untersuchungen beim Abbau von Carnallitit in großen Teufen.- Neue Bergbautechnik, 10, 4, 203 - 209.

/424/ Hunstock, F. (2004): Entwicklungstendenzen bei Rationalisierungsprozessen im Kali- und Steinsalzbergbau.- Kali und Steinsalz, 2004, 17 - 28.

/425/ Husband , W. H. W. & Ozsahin, S. (1967): A Comparison of the Solution Mining and Refining of Potash with Conventional Methods in Saskatchewan.- CIM Bulletin 60 (1967), 661, 560 - 567.

/426/ Hustoft, J. W., Arnold, R. D. & Roberts, L. A. (2012): Effects of Sylvite and Carnallite Content on Creep Behavior of Potash.- In: Prodeedings Spring 2012 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, Regina, Saskatchewan, April 22 - 23, 2012, 121 - 130.

/427/ Hustrulid, W. A. & Bullock, R. L. (2001): Underground Mining Methods – Engineering Fundamentals and International Case Studies.- Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. Littleton, Colorado, 2001, 129 - 155.

/428/ ICRA (2013): Rating for Archean Chemical Industries Private Limited.- ICRA Limited Report.- New Dehli, September 2013, 3p.

/429/ IED (2010): Richtlinie 2010/75/EU - Industrial Emissions Directive - (IED) des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24. November 2010 über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung) (Neufassung). L 334/17 -119, veröffentlicht im Amtsblatt der Europäischen Union am 17.12.2010.

/430/ IFDC (1979): A Fertilizer Manual.- ed.: International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, AL, 1st edition 1979.

/431/ IFDC (1996): A Fertilizer Manual.- ed.: International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, AL, USA, 3rd edition.- Kluwer Academic Publishers.

/432/ IIED (2002): MMSD Mining, Minerals and Sustainable Development: Potash Case Study. Information supplied by the International Fertilizer Industry Association. International Institute for Environmental and Development, 65, February 2002, 71 - 76.

/433/ IM (2014): Perm's potash revival.- International Mining November 2014.

/434/ IMC (1977): The Year in Brief – Expansion Projects, Natural Resources, Operations.- In: Annual Report 1977. (1977): Annual Report. The Year in Brief. Exzerpt.

/435/ INFOMINE (2012): Company Key Facts, Stand Mai - Juli 2012 (Online: http://www.infomine.com).- Abrufdatum 11. Februar 2013.

/436/ INTERPOL (2013): INTERPOL clarifies inaccurate reports on Belarus request for Red Notices against Suleiman Kerimov and others, Pressemitteilung, 11. September 2013 (Online: http://www.interpol.int/News-and-media/News/2013/PR106).- Abrufdatum: 11. September 2013.

/437/ INTREPID (2012a): Excellence in Execution. Deliviering on Growth. Annual Reports 2011, Intrepid Potash, Inc., Denver, Colorado, 2012, 116p.

/438/ INTREPID (2012b): HB Solar Solution Mine Project, Intrepid Potash, Inc. (Online: http://www.intrepid-hbproject.com/).- Abrufdatum: 30. September 2012.

/439/ INTREPID (2013): Ingredients for growth. Annual Report 2012. Intrepid Potash, Inc., Denver, Colorado, 2013, 100p.

/440/ INTREPID (2014): Form 10-K for the fiscal year ended December 31, 2013. Intrepid Potash, Inc., Washington D.C., 2014.

/441/ ISO (2010): Environmental Management, The ISO 14000 family of International Standards, Edition 2, International Organization for Standardization, Vernier, Genf, 2010, 12p.

/442/ ITALKALI (2002): ITALKALI Società Italiana Sali Alcalini S.p.a., History Italkali, 2002 (Online: http://www.italkali.com/en/history.php).- Abrufdatum: 12. Februar 2005.

/443/ ITASCA (2007): Universal Distinct Element Code.- Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, Minnesota, USA, 2007.

/444/ IVUB e.V. & IUTA e.V. (2004): Schlußbericht für den Zeitraum: 01.08.02 bis 31.07.04 zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die AiF geförderten Forschungsvorhaben, Forschungsthema: Entwicklung von Rezepturen für Bodenersatzstoffe auf der Basis optimaler Nährstoffverfügbarkeit und minimaler Schadstofffreisetzung. AiF-Vorhaben-Nr. 13370 BG/ 1. Institut für Verfahrens-, Umwelt- und Bergbauforschung e.V. und Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V., Sondershausen, 29. Oktober 2004, 125 Seiten, 5 Anlagenteile.

/445/ Jackson, D., Jr. (1973): Solution Mining Pumps New Life into Cane Creek Potash Mine.- Engineering and Mining Journal July 1973, 59 - 69.

/446/ Jackson, P. & Liebe, H. (2005): Microbially Influenced Corrosion Issues in a Potash Solution Mine.- Proceedings Fall 2005 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, Nancy, France, October 02- 05, 2005, 13p

/447/ Jacob, T. (1997): Erstellung eines untertägigen Rohsalzbunkers unter Einsatz elektronischer und nichtelektronischer Zünder im Werk Neuhof-Ellers.- Kali und Steinsalz, 1997, 158 - 162.

/448/ Jacob, T. & Triebel, R. (2002): Automatisierung im Bergbau der K+S Gruppe.- Kali und Steinsalz, 2002, 18 - 27.

/449/ Jahn, G. (2014): Rekultivierung der Halde Niedersachen in Wathlingen - Baustein zur Umsetzung der Haldentstrategie.- Kali und Steinsalz, 2014, 46 - 53.

/450/ Jahne, H. & Pader, D. (1994): Untertageaufschluß eines Basaltschlotes durch den Bergbau im Werra-Kaligebiet.- Kali und Steinsalz, 1994, 218 - 224.

/451/ Jahne, H. & Zeibig, S. (2001): Zur Entwicklung, Ausbildung und Verbreitung der Kaliflöze im Werra-Becken Vortragskurzfassung).- In: Rauche, H. (Hrsg.): Regionale und angewandte Geologie der Grenzregion der Süddeutschen und Mitteldeutschen Scholle.- Programm und Kurzfassung der Vorträge.- 10. Jahrestagung Gesellschaft f. Geowissenschaften, Schmalkalden, 19. - 22. September 2001.- Exkursionsführer u. Veröff. Ges. f. Geowiss., 214, 131 - 312.

/452/ Jahne, H. & Zeibig, S. (2002): Zur Entwicklung, Ausbildung und Verbreitung der Kaliflöze im Werra-Becken - Development, lithology and distribution of the potash seams in the Werra basin.- Z- Geol. Wiss., 2002, 327 - 336.

/453/ Jahne, H., Voitel, R. & Haase, G. (1983): Tektonische Erscheinungsformen im Salinar des Werra-Kaligebiets auf dem Territorium der DDR.- Z. Geol. Wiss., 1983, 1085 - 1100.

/454/ Jendersie, H. (1969): Kali- und Steinsalzbergbau - Band II: Aufschluß und Abbau von Kali- und Steunsalzlagerstätten.- VEB Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1969, 474 Seiten.

/455/ Jeremic, M. L. (1994): Rock mechanics in salt mining.- A.A Balkema, Rotterdam, Brookfield, 1994.

/456/ Jeschke, H. & Sönksen, H. (2014): Fahrlader mit Super-Low-profile.- Kali und Steinsalz, 2014, 28 - 33.

/457/ Jianqi, Y., Chengyu, H. & Keqin, C. (1983): Characteristics of Salt Deposits in the Dry Salt Lake and the Formation of Potash Beds.- Salt Symposium Collection of SMRI Solution Mining Research Institute, Spring Symposium, Toronto, Mai 1983, 193 - 194.

/458/ Jockel, A. & Rauche, H. (2000): Tectonic structures of the potash seam Stassfurt (Permian, Zechstein 2) and their influence on the extraction technology and mine safety.- In: Проблемы формирования и комплексного освоения месторождений солей. От 17 - 20 октября 2000, Соликамск, 2000, стр 77-78. [Proceedings 6th International Salt Meeting „Problems of formation and complex development of salt deposits“,17. - 20. Oktober 2000, Solikamsk, 2000, 77 - 78.].

/459/ Johanson, J. R. (1996): Roll press feed systems.- Powder Handling Process 8 (1996), 2, 159 - 163.

/460/ John, K. D. & Malina, H. (1967): Die „Finite-Element-Methode“ in der Gebirgsmechanik.- 9. Ländertreffen des Internationalen Büros für Gebirgsmechanik, Leipzig, November 1967, 128 - 142.

/461/ Jones, P. & Prugger, F. (1982): Underground mining in Saskatchewan potash.- Mining Engineering 12 (1982), 1677 - 1683.

/462/ Junghans, W. (1953): Versuche zur Senkung der Abbauverluste im Kalibergbau des Südharzes.- Bergbautechnik 3, (1953) 1, 22 - 26.

/463/ K-UTEC (2001): Abschlußbericht B 309-98015. Ingenieurwissenschaftliche Untersuchungen zur Salzlösungsgenese an Althalden der Kaliverarbeitung in Nordthüringen zur ökologischen Sicherung der Nachbetriebsphase.- Kali-Umwelttechnik Sondershausen GmbH, Sondershausen, 2001.

/464/ K-UTEC (2002): Abschlußbericht 198/00. Modellierung und Prognose des Wasserbinde- und Speichervermögens von Rekultivierungsschichten auf Kalirückstandshalden anhand meteorologischer und bodenphysikalischer Daten.- Kali-Umwelttechnik Sondershausen GmbH, Sondershausen, 11. Oktober 2002 , 45 Seiten.

/465/ K-UTEC (2014a): Stellungnahme zur „Plausibilitätsprüfung der Projektidee „Eindampfen von 6,8 Mio. m3 Salzabwässern / Produktion von Kaliumsulfat".- K-UTEC AG Salt Technologies, Sondershausen, 17. Januar 2014.

/466/ K-UTEC (2014b): Überlegung zur Aufbereitung der Abstoßlösung des Werkes Werra.- Stellungnahme 16/2335 Landtag Nordrhein-Westfalen 16. Wahlperiode. Salzpipeline-Anhörung A17-19.11.2014: Ausschuss für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz. Präsentation vor dem Landtag Düsseldorf, 19. November 2014, 25 Seiten.

/467/ K+S (2008a): K+S - Maßnahmenpaket für Gewässerschutz und Standortsicherung im hessisch-thüringischen Kalirevier (Verbundwerk Werra, Werk Neuhof-Ellers). K+S Aktiengesellschaft, 28. Oktober 2008, Kassel, 16 Seiten.

/468/ K+S (2008b): K+S legt umfangreiches Maßnahmenpaket zum Gewässerschutz vor. Pressemitteilung, Kassel, 28. Oktober 2008.

/469/ K+S (2009): Gesamtstrategie zur Verminderung von Umweltbelastungen Gemäß § 2 der öffentlich-rechtlichen Vereinbarung zwischen dem Land Hessen, dem Freistaat Thüringen und der K+S KALI GmbH.- Kassel, überarbeitete Fassung, 31. Oktober 2009.

/470/ K+S (2010a): Düngemittelnachfrage zieht nach starkem Rückgang im Jahr 2009 wieder spürbar an.- Pressemitteilung, Kassel, 11. März 2010.

/471/ K+S (2010b): Planfeststellungsverfahren zur Zulassung eines Rahmenbetriebsplanes der K+S KALI GmbH zum Bau und Betrieb einer Rohrleitung von Neuhof nach Philippsthal, Werra einschließlich der damit zusammenhängenden Maßnahmen; Antrag auf Erteilung einer wasserrechtlichen Erlaubnis für die dauerhafte Einleitung der salzhaltigen Wässer in die Werra, Juni 2010.

/472/ K+S (2010c): Vorhabensbeschreibung Umsetzung eines nachhaltigen Rückstandsmanagements am Standort Hattorf, Verbundwerk Werra. K+S KALI GmbH, Kassel, 2010.

/473/ K+S (2011a): Jetzt geht's los! Baustart für Großprojekte zum Gewässerschutz.- Pressemitteilung, Kassel, 27. Oktober 2011.

/474/ K+S (2011b): Vorhabensbeschreibung Rohrfernleitungsanlage zur überregionalen Entsorgung der Salzwässer aus dem hessischthüringischen Kalirevier der K+S KALI GmbH. Neuhof, 30. November 2011.

/475/ K+S (2011c): Fabrikberichte Werk Neuhof-Ellers, Jahr 2011, K+S KALI GmbH, Werk Neuhof-Ellers, Neuhof, 2011.

/476/ K+S (2011d): Tischvorlage Erweiterung der Haldenkapazität Werk Zielitz. K+S KALI GmbH. Information zur Verfügung gestellt durch K+S. Seite 22.

/477/ K+S (2012a): Versatzsalzverbringung aus dem Kalibergwerk Unterbreizbach mittels Becherwerk.- Clausthal-Zellerfeld, 5. Kolloquium „Fördertechnik im Bergbau", 18./19.01 2012, Kurzfassung, 1 Seite.

/478/ K+S (2012b): Unternehmensmeldung der K+S KALI GmbH vom 13. April 2012: Neue Ladergeneration für Grube des Kaliwerkes Neuhof-Ellers (Online: http://www.kali-gmbh.com/dede/company/news/news-20120413-neue-ladergeneration-kaliwerk-neuhof-ellers.html).- Abrufdatum: 21. November 2013.

/479/ K+S (2012c): Reservebergwerk Siegfried-Giesen: Genehmigungsrechtliche Prüfung der Wiederaufnahme der Kaliproduktion wird vorbereitet. Pressemitteilung, Kassel, 13. Juni 2012.

/480/ K+S (2012d): Vorhabensbeschreibung Umsetzung eines nachhaltigen Rückstandsmanagements am Standort Wintershall, Werk Werra. K+S KALI GmbH. S. 27. Information zur Verfügung gestellt durch K+S.

/481/ K+S (2012e): 360-Millionen-Euro-Maßnahmenpaket zum Gewässerschutz: Umfangreiche Stahlbauarbeiten in Unterbreizbach abgeschlossen: Platz für neue Anlage.- Pressemitteilung vom 31. August 2012, Unterbreizbach.

/482/ K+S (2012f): The Food Challenge.- Uni Credit and Kepler German Investment Conference: Road Show Presentation by Norbert Steiner, CEO, K+S Aktiengesellschaft.- Munich, September 27, 2012, 25p.

/483/ K+S (2012g): Salzwasserentsorgung Kaliwerk Werra: Die neue Einleiteerlaubnis - ein weiterer wichtiger Schritt. Pressemitteilung, Kassel, 30. November 2010.

/484/ K+S (2012h): Lagerstättengeologische, berg- und verarbeitungstechnische Betriebsinformationen zu ausgewählten Produktionsstandorten der K+S KALI GmbH.- Internes Informationssystem der K+S KALI GmbH, Kassel, 2012.

/485/ K+S (2012i): Bergwerk Merkers: Versatzsalzverbringung aus dem Kalibergwerk Unterbreizbach mittels Becherwerk.- Clausthal-Zellerfeld, 5. Kolloquium „Fördertechnik im Bergbau".

/486/ K+S (2013a): Finanzbericht 2012. Lösungen liefern. K+S Aktiengesellschaft, Kassel, 27. Februar 2013, 242 Seiten.

/487/ K+S (2013b): Einleiteerlaubnis Neuhof-Ellers: Ordnungsgemäße Entsorgung weiterhin gesichert. Pressemitteilung, Kassel, 17. Juli 2013.

/488/ K+S (2014a): Vorstellung des Vier-Phasen-Plans - Die realisierbare Komplettlösung der Salzabwasser-Entsorgung: 25. Sitzung des Runden Tisches.- Pressemitteilung, Kassel, 21. November 2014.

/489/ K+S (2014b): Antrag auf Planfeststellung Hartsalzwerk Siegfried-Giesen.- Hildesheim, 17. Dezember 2014 (online: http://portals.geodin.com/k-plus-s/).- Abrufdatum 22. Juni 2015)

/490/ K+S (2015a): Kompendium. Wissenswerte Fakten über K+S.- K+S Aktiengesellschaft, Kassel, März 2015, 93 Seiten.

/491/ K+S (2015b): Vier Phasen-Plan ist wesentlicher Baustein der Bewirtschaftunsplanung 2015-2021: Bewirtschaftungsplanung der FGG Weser.- Pressemitteilung, Kassel, 17. März 2015.

/492/ K+S (2015c): Potash Corporation of Saskatchewan Inc. hat der K+S Aktiengesellschaft einen schriftlichen Vorschlag zur Übernahme aller Aktien übermittelt. Ad-hoc-Meldung gem. §15 WpHG vom 25. Juni 2015, Kassel.

/493/ Käbel, H. (2006): Grundwasserstockwerke im thüringischen Werra-Kaligebiet und Folgen der Salzabwasserversenkung bis 1980.- Geol. Jb. Sonderhefte 5 (2006), 3 - 114.

/494/ Käding, K.-C. (1995): Kali- und Steinsalzvorkommen - Verbreitung, Vorräte, Bergbau.- Kali und Steinsalz, 1995, 319 - 325.

/495/ Kahle, K. & Leib, G. (1991): Entwicklungsstand der Antiback- und Antistaubbehandlung in der KALI-Südharz AG.- Proceedings Kali ' 91: Second lnternational Potash Technology Conference, Hamburg, 26 - 29 May 1991.

/496/ Kahle, K. & Scherzberg, H. (2000): New potassium-projects as a source for sodium chloride products with a high purity.- In: Proceedings Eight Symposium on Salt, The Hague, The Netherlands, May 07 - 11, 2000, 583 - 587.

/497/ KALIVEREIN (1988): Die Kaliindustrie in der Bundesrepublik Deutschland, 6. Auflage, Kaliverein e.V., 1988, 64 Seiten mit Abb. und Tabellen.

/498/ KALIWERK STASSFURT (1952): 1852–1952. Hundert Jahre Staßfurter Salzbergbau.- Anhang zu der anlässlich der Hundertjahrfeier vom Kaliwerk Staßfurt am Tage des Bergmanns 1952 herausgegebenen Festschrift.- VEB Kaliwerk Staßfurt (Hrsg.), Kreuz-Verlag, Halle (Saale), 152 Seiten.

/499/ Kamlot, P., Stockmann, N., Teichmann, L. & Popp, T. (2006): Stability Proof of the Asse Salt Mine and Geomechanical Assessment of the Planned Closing Measures Abstract to SMRI Fall Meeting Nancy, France, October 02- 05, 2005, .- In: Proceedings Spring 2006 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, Brussels, Belgium, April 30 - May 2006, 199 - 223.

/500/ Kappei, G. (2004): Die Abbaue in der Südflanke sind verfüllt, die Verfüllarbeiten im Tiefenaufschluss in Angriff genommen.- Vortrag anlässlich der 5. Informationsveranstaltung der GSF am 13.05.04 in Remlingen im Dorfgemeinschaftshaus, 33 Seiten.

/501/ Kaskiw, L., Morgan, R. & Ruse, D. (1989): Backfilling at IMC (Canada) K2 Potash Mines.- Proceedings, 4th International Symposium on Innovations in Mining and Backfill Technology, Montreal, Quebec, 1989.

/502/ Katzenbach, R. & Leppla, S. (2012a): Stability and serviceability of infrastructure facilities due to large tailings heaps consisting of viscoplastic salt material. International Conference "Topical Issues of Rational Use of Natural Resources", St. Petersburg State Mining University, St. Petersburg, 25. - 27. April 2012, 55 - 57.

/503/ Katzenbach, R. & Leppla, S. (2012b): Displacement of infrastructures due to large tailings heaps of viscoplastic material and the resulting soil-structure interaction.- In: 11th International Symposium on Environmental Geotechnology, Energy and Global Sustainable Development, Los Angeles, 27. - 29. Juni 2012, 385 - 393.

/504/ Katzenbach, R., Leppla, S. & Seip, M. (2012a): Rückstandssalzmechanik und Haldenkörperverhalten. K+S Inhouse - Workshop, Magdeburg, 28. November 2012.

/505/ Katzenbach, R., Leppla, S. & Seip, M. (2012b): Komplexe Interaktion zwischen Haldenkorpus, technischen Einrichtungen und dem Baugrund. K+S Inhouse - Workshop, Magdeburg, 28. November 2012.

/506/ Katzenbach, R., Leppla, S., Seip, M., Schleinig, J.-P. & Schnürer, F. (2011): Verformungsprognosen für Infrastruktureinrichtungen im Nahbereich von Rückstandssalzhalden unter Verwendung eines visko-plastischen Stoffgesetzes, Kali und Steinsalz, 2011, 20 - 29.

/507/ Katzenbach, R., Leppla, S., Seip, M., Schleining, J.-P. & Schnürer, F. (2010): Verformungen an Infrastruktureinrichtungen durch die Belastungen des Baugrundes aus großflächigen Rückstandshalden. 31. Baugrundtagung der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V., München, 03. - 06. November 2010, 57 - 64.

/508/ Katzenbach, R., Leppla, S., Seip, M., Schleining, J.-P. & Schnürer, F. (2013): Large tailings heaps and the influence on infrastructures due to the resulting soil deformation. 18th Conference of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, September 02 - 16, 2013, Paris, France, Vol. 3, 2027 - 2030.

/509/ KBW (1983): ASI I 129/84 CO2-Schutz, Arbeitsschutzinstruktion Nr. 1 129/84 zum Schutz vor Gefahren durch Ausbrüche von Gas und Salz sowie CO2-Bläsern im VEB Kalibetrieb Werra,- Bestandteil des Sonderbetriebsplanes CO2-Schutz.- VEB Kalibetrieb Werra Merkers, 1984, 29 Seiten, 21 Anlagen.

/510/ Kegel, K. (1942a): Über die Berechnung der Tragfähigkeit von Bergfesten beim Kammerbau, insbesondere im Salzbergbau.- Kali, verwandte Salze und Erdöl - Zeitschrift für Kali-, Steinsalz- und Erdölindustrie sowie Salinenwesen, 11. November 1942, 173 - 186.

/511/ Kegel, K. (1942b): Über die Berechnung der Tragfähigkeit von Bergfesten beim Kammerbau, insbesondere im Salzbergbau.- Kali, verwandte Salze und Erdöl - Zeitschrift für Kali-, Steinsalz- und Erdölindustrie sowie Salinenwesen, 12. Dezember 1942, 191 - 194.

/512/ Keidel, R. (2013): Maßnahmenpaket zum Gewässerschutz im Werk Werra - Stand und Perspektiven.- Vortrag Roland Keidel, K+S KALI GMBH, 22. Sitzung des Runden Tisches, Stadthalle Beverungen, 24. September 2013, 23 Seiten.

/513/ Kelly, T. E. (2000): Natural solution of Salado salt southeastern New Mexico.- In: Proceedings Fall 2000 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, San Antonio, Texas, October 15 - 18, 2000, 12p.

/514/ Kenat, J. (1965): The Production of Potassium Chloride from the Dead Sea by Crystallization.- In: Proceedings Second Symposium on Salt, Cleveland, Ohio, May 03 - 05, 1965, 195 - 203.

/515/ Kendall, A. C. (1992): Facies models 19. Evaporites.- In: Walker, R. G. & James, N. P. (Hrsg.): Facies Models: Response to Sea Level Change, Geol. Assoc. Can., 375-409.

/516/ Keys, D. A. & Wright, J. Y. (1965): Geology of the I.M.C. Potash Deposit Esterhazy, Saskatchewan.- In: Proceedings Second Symposium on Salt, Cleveland, Ohio, May 03 - 05, 1965, 95 - 101.

/517/ KFI (1944): 25 Jahre Kali-Forschungs-Anstalt.- Kali, verwandte Salze und Erdöl 38 (1944), 9, 155 - 169.

/518/ KFI (1970): 50 Jahre Deutsche Kaliforschung.- Kali und Steinsalz, 1970, 289 - 326.

/519/ Kießling, H. (2008): Maßnahmen zur Reduzierung der Salzlast in der Werra.- Thüringer Landesbergamt , Gera, 21. Oktober 2008, 15 Seiten.

/520/ King, M. S. & Acar, K. Z. (1969): Creep Properties of Saskatchewan Potash as a Function of Changes in Temperature and Stress.- In: Proceedings Third Symposium on Salt, Cleveland, Ohio, April 21 -24, 1969, 226 - 235.

/521/ Kirienko V. M., Tarakanov V. A., Zheleznyak V. M., Sherba V. Y. & Shamanin A. V. (2010): КИРИЕНКО, В. М., ТАРАКАНОВ, В. А., ЖЕЛЕЗНЯК, В. М., ЩЕРБА, В. Я. & ШАМАНИН, А. В. (2010): НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СЛОЕВОЙ ВЫЕМКИ ПЛАСТА ТРЕТЬЕГО КАЛИЙНОГО ГОРИЗОНТА. ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ, 2010, Ne 8, стр. 34 - 36. [Kirienko V. M., Tarakanov V. A., Zheleznyak V. M., Sherba V. Y. & Shamanin A. V. (2010): New Technology of the Seam Mining of the third Potash Level Stratum.- Mining Journal, 2010, 8, 34 - 36.]

/522/ Kirienko V.M. (2011): Уверенное завтра „Беларускалия“, интервью с генеральным директором предприятия Кириенко В.М.- „Экономика Беларуси“, учредители Министерства экономики, финансов и иностранных дел Республики Беларусь, 2011, 4, 80-84. [Kirienko V.M. (2011): Das sichere Morgen von „Belaruskali“, ein Interview mit dem Generaldirektor des Unternehmens Kirienko V.M.- In: Wirtschaft von Belarus, Herausgeber Wirtschafts-, Finaz- und und Außenministerien der Republik Belarus, 2011, 4, 80-84.]

/523/ Kirk-Othmer (2005): Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology.- 5th edition, Wiley-Interscience, Hoboken, New Jersey, 2004, 896p.

/524/ Kityk, W.I., Bokun, A.N., Panov, G.M., Slivko, E.P. & Shaydetskaya, V.C. (1983): Китык, В. И., Бокун, А.Н., Панов, Г.М., Сливко, Е.П. & Шайдецкая, В.С.: Галогенные формации Украины: Закарпатский прогиб.- Наукова думка, Киев, 1983, 168 стр. [Salzformationen in der Ukraine: Vorkarpaten Senke.- Naukova Dumka, Kiev, 1983, 168 S.]

/525/ Kityk, W.I., Petrychenko, O.I., Polkunov, W.F. et al. (1971): Китык, В. И., Петриченко, О.Й., Полкунов, В.Ф. и др.: Путеводитель экскурсии симпозиума по проблеме «Галогенные формации Украины и связанные с ними полезные ископаемые».- Наукова думка, Киев, 1971, 63 стр. [Exkursionsführer zum Symposium „Salzformationen in der Ukraine und in Verbindung mit ihnen auftretende Bodenschätze“.- Naukova Dumka, Kiev, 1971, 63 S.]

/526/ KK (1983a): Fabrikberichte Werk Ernst Thälmann, Merkers, Jahr 1983.- VEB Kombinat Kali, Kalibetrieb Werra, Merkers.

/527/ KK (1983b): Richtlinie 4 für Bauwerke auf Rückstandshalden des Kalibetriebes Südharz.- VEB Kombinat Kali, Direktionsbereich 5 (Technik), Erfurt, 01. November 1983.

/528/ KK (1984): Entwicklung neuer Abbauverfahren, Technologisches Projekt “Spülversatz im Carnallititabbaublock K 61”.- VEB Kombinat Kali, Direktionsbereich 4 (Forschung), Sondershausen, 19. Januar 1984.

/529/ KK (1985): Fabrikberichte Werk Heinrich Rau, Roßleben, Jahr 1985.- VEB Kombinat Kali, Kalibetrieb Südharz, Roßleben.

/530/ KK (1989): Produktionskennziffern Gruben.- VEB Kombinat Kali, Direktionsbereich 6 (Ökonomie), Sondershausen.

/531/ Klein, M. O. & Goldsmith, E. L. (1992): Physical Properties of Potash Products: Quality Con-trol Procedures and Their Importance.- In: Proceedings Seventh Symposium on Salt, Kyoto, 06. - 09. April 1992, 531 - 540.

/532/ Knipping, B. (1988): Die genetische Interpretation von Salzgesteinskörpern mit Hilfe von Stoffbilanzrechnungen.- Vortrag, 66. Jahrestagung der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft, Bonn, 16. September 1988.

/533/ Knipping, B. (1989): Miozäne Basalte im Kontakt zu Perm-Evaporiten.- Vortag, Geologisches Institut der Universität, Bonn, 12. Januar 1989.

/534/ Knipping, B. (1992): Stoffbestand von Salzgesteinskörpern - Kriterien für die Langzeitsicherheit von Untergrund-Deponien anthropogener Abfälle.- Vortrag, Bundesfachschaftentagung Geologie/ Mineralogie, 18. - 21. Juni 1992 in Hannover, 20. Juni 1992.

/535/ Knipping, B. & Türck, F. (1992): Quantitative Analysis of Fluid Inclusions in Evaporites by Ion Chromatography.- Lecture International Ion Chromatography Symposium 1992, Linz, 21. – 24. September 1992.

/536/ Knipping, B., Siemann, M. & Herrmann, K. (1992): Röntgenanalytik von Evaporiten.- Vortrag, 70. Jahrestagung der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft, Tübingen, 14. September 1992.

/537/ Knoll P. (1990): The fluid-induced tectonic rockburst of March 13, 1989 in the Werra potash mining district of the GDR (first results).- Gerlands Beitraege Zur Geophysik 99 (1990), 239 - 245.

/538/ Koch, G. & Gaitzsch, H. (1989): Speicherraumausbildung in Salzlösungsvorkommen im Salinar des Werra-Kaligebietes und ihre Bedeutung für Abdichtungsinjektionen.- Z. Angew. Geol., 1989, 175 - 179.

/539/ Koch, K. (1978): Zur Entstehung von Tonmineralen im Kontaktbereich Basalt-Salinar.- Z. Geol. Wiss., 1978, 733 - 747.

/540/ Koch, K. & Oettel, S. (1969): Zur Sylvinitbildung auf der Schachtanlage Alexandershall- Abterroda im Werra-Kaligebiet.- Jb. Geol. 2 (f. 1966), 223 - 242.

/541/ Koch, K. & Vogel, J. (1980): Zu den Beziehungen von Tektonik, Sylvinitbildung und Basaltintrusion im Werra-Kaligebiet (DDR).- FFH Freiberger Forschungshefte, C 347, Leipzig, 1980.

/542/ Kogelmann, W. J. (1973): Use of Boom-Type Miners.- PIn: Proceedings Fourth Symposium on Salt, Houston, Texas, April 08 - 12, 1973, The Northern Ohio Geological Society, 471 - 482.

/543/ Kokorsch, R. (1991): Die technische Entwicklung in den Bergwerksbetrieben der Kali und Salz AG.- Kali und Steinsalz, 1991, 352 - 358.

/544/ Kokorsch, R. (1993): Qualitätssicherung bei der Rohsalzgewinnung in den Grubenbetrieben der KALI und Salz AG.- Kali und Steinsalz, 1993, 66 - 73.

/545/ Kokorsch, R. & Psotta, M. (1984): Die Rohstoffversorgung der Kalifabriken Wintershall und Hattorf.- Kali und Steinsalz, 1984, 39 - 51.

/546/ Konitz, O. & Schäbitzer, R. (1964): Neue Erkenntnisse über die Ausbildung des Kaliflözes Thüringen.- Erfahrungen in den Grubenfeldern „Ernst Thälmann II/III“ und Menzengraben und deren bergmännische Berücksichtigung.- Z. Angew. Geol. 1964, 129 - 133.

/547/ Kosteniuk, P. & Prugger, A. (1999): Automated Microseismic Event Analysis.- Annual General Meeting of the CIM, Calgary, Alberta, 8p.

/548/ Kovalev, O. V. & Mozer, S. P. (2012): Ковалев, О. В.& Мозер, С. П. (2012): Некоторые подходы к обеспечению безопасной отработки калийных месторождений.- Доклад на интернет-конференции «Экологические проблемы минерально-сырьевого комплекса», Национальный минерально-сырьевой университет "Горный", Санкт-Петербург, 12 марта - 12 апреля 2012г., 7 стр. [Some Approaches to Secure Mining of Potash Deposits.- Report on the internet conference „Environmental Problems of the Mineral and Raw Materials Complex", National Mineral Resources University, Sankt-Petersburg, 12th March-12th April 2012, 7 S.].

/549/ Kovalevich, V. M. (1975): Thermometric studies of inclusions in artificial crystals of halite.- Fluid Inclusion Research 8 (1975), Seite 96.

/550/ Kovalevich, V. M. (1976): Halite of the salt deposits of Miocene age from the Forecarpathians.- Fluid Inclusion Research 9 (1976), Seite 72.

/551/ Kovalevich, V. M. & Peryt, T. M. (1995): Chemistry of fluid inclusions in the Werra (Zechstein, Upper Permian) Halite of North Poland.- Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía 18 (1995), 1, 110 - 111.

/552/ Kovin, O. N. (2010): Ground Penetrating Radar Investigations in Upper Kama Potash Mines.- Dissertation, Missouri University of Science and Technology, 2010, 160p.

/553/ Kovin, O. N., Mironov, C. A., Kvitkin, S. Y. & Kuznetsov, N. V. (2002): Ковин, О. Н., Миронов, С. А., Квиткин, С. Ю. & Кузнецов, Н. В. (2002): Опыт применения георадара для обеспечения безопасности горных работ в условиях калийных рудников ОАО „Уралкалий".- Материалы Научно-практ. конф. «Георадар-2002», МГУ, Москва, 28 января-1 февраля, 2002, стр. 18 - 20. [Case history: application of georadar for solving mining problems in potash mines of JSC "Uralkali".- Proceedings of International Conference "Georadar 2002", Moscow State University, Moscow, January 28 - February 1, 2002, p. 18 - 20 (in Russian)].

/554/ KPMG (2006): KPMG-Studie: Ewigkeitskosten der Kohle betragen 13 Milliarden Euro - Unwägbare Risiken für Trinkwasser.- Gutachten im Auftrag des Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle 2006.

/555/ Krasnostein, A. E. (1995): Красноштейн, А. Е. (1995): Проблемы безопасности при эксплуатации месторождений полезных ископаемых в зонах градопромышленных агломераций.- Тез. докл. Междунар. симпоз. SPM-95, Москва - Пермь, 15-21 сент. 1995 г., Редкол.: Красноштейн, А. Е. (отв. ред.) и др., Пермь, 1995, 168 стр. [Sicherheitsprobleme bei der Gewinnung der Lagerstätten in den Gebieten der städtisch-industriellen Agglomerationen.- Thesen der Vorträge des Internationalen Symposiums SPM-95, Moskau - Perm, 15. - 21. September 1995, Krasnostein, A. E. (Hrsg.) u. a., Perm, 1995, 168 S.].

/556/ Krasnostein, A. E. (Hrsg.) (1999a): Красноштейн А. Е. (1999): Вопросы, курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. Красноштейн., А. Е., 1999, 3, 25-28 [Fragen der Kurortlehre, Physiotherapie und therapeutischen Körperkultur, Krasnostein, A. E. u. a., 1999, 3, 25 - 28].

/557/ Krasnostein, A. E. (1999b): Красноштейн, А. Е., Бачурин, Б. А. &. Болотова, Е. Л. (1999): Проблемы безопасности и совершенствования горных работ.- Мельниковские чтения: Тез. докл. Междунар. конф., Москва - Санкт-Петербург, 11-17 сент. 1999 г., Науч. совет РАН по проблемам горных наук, Пермь, 1999, 277 стр. [Probleme der Sicherheit und der Weiterentwicklung der Bergbauarbeiten.- Melnikov-Lesungen: Thesen der International Konferenz, Moskau - St.-Petersburg, 11. - 17. September 1999, Wissenschaftlicher Rat der Akademie der Wissenschaften Russlands für Probleme der Gebirgswissenschaften, Perm, 1999, 277 S.].

/558/ Krasnostein, A. E. & Novoselitski, V. M. (1991): Красноштейн, А. Е. & Новоселицкий, В. М. (1991): Комплексное освоение недр Западного Урала.- Сб. науч. тр., УрО АН СССР, Урал. рабочий, Свердловск, 1991, 128 стр. [Komplexe Erschließung der Lagerstätten im Westural.- Sammelband der wissenschaftlichen Arbeiten der Uraler Abteilung der Akademie der Wissenschaften der UdSSR, Verlag Uraler Arbeiter, Sverdlovsk, 1991, 128 S.].

/559/ Krasnostein, A. E., Barannikov, V. G., Papulov, A. V. et al. (1996): Красноштейн, А.Е. (1996): Спелеотерапия в калийном руднике.- Красноштейн, А.Е., Баранников, В.Г., Папулов, А.В. и др., УрО РАН, Екатеринбург, 1996, 176 стр. [Speläotherapie in einer Kaligrube.- Krasnostein, A. E., Barannikov, V. G., Papulov, A.V. u.a., Uraler Abteilung der Russischen Akademie der Wissenschaften (UrO RAN), Ekaterinburg, 1996, 176 S.].

/560/ KREISZEITUNG (2014): Kalihalden sollen zu Ausflugszielen für Touristen werden. Mediengruppe Kreiszeitung, 01. Oktober 2014 (Online: http://www.kreiszeitung.de/lokales/niedersachsen/halden-kali-salzindustrie-sollen-ausflugszielen-touristen-werden-4013714.html).- Abrufdatum: 05. Mai 2015.

/561/ Kreller, O. (1939): Über die Schwimmaufbereitung von Kalisalzen.- Kali und verwandte Salze Erdöl 33 (1939), 4/5/6, 35 - 37/46 - 47/53 - 57.

/562/ Kröger-Herke, A., Rauche, H. & Azimi, M. (2012): Altlastensanierung an Kalistandorten: Was lernen wir für die Umweltverträglichkeitsprüfung neuer Projekte?- In: Abstracts & Lectures, Anniversary Symposium Potash Fertilizer Production in the 21st Century - 60 Years of Potash Engineering Made in Erfurt - 20 Years of ERCOSPLAN Group of Companies; Erfurt, 09. November 2012, 110 - 113.

/563/ Kruger, F. C. (1973): Exploration and Evaluation of Deep Potash Bodies.- In: Fall Meeting of the Society of Mining Engineers (U.S.A.), September 1973, Preprint 73-i-316, 12p.

/564/ Krupp, R. E. (2008): Kein Stillstand der Technik im Kalibergbau. Vortrag, 3. Werra-Weser-Anrainerkonferenz in Bremen, 17. November 2008, 20 Seiten.

/565/ Krupp, R. E. (2011): Alternative Produktions-, Aufbereitungs- und Entsorgungsverfahren im Thüringisch-Hessischen Kalirevier, Betrachtungen zur Nachhaltigkeit des Kalibergbaus.- Burgdorf, Dezember 2011, 86 Seiten.

/566/ Krupp, R. E. (2014a): Nachhaltige Entsorgung mineralischer Abfälle aus Sicht eines Umweltverbandes.- Präsentation, Forum „Nachhaltige Entsorgung mineralischer Abfälle“ vom Niedersächsischen Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz, Hannover, 21. Mai 2014, 14 Seiten.

/567/ Krupp, R. E. (2014b): Memorandum. Wege zu einer umweltverträglichen Kaliindustrie. Burgdorf, 14. Juli 2014, 13 Seiten.

/568/ KrWG (2012): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG).- vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das durch § 44 Absatz 4 des Gesetzes vom 22. Mai 2013 (BGBl. I S. 1324) geändert worden ist.- Geändert durch Art. 3 vom 08. April 2013; BGBl. I 734.

/569/ Kühnel, W. (1953): Kalifachkunde.- Fachbuchverlag Leipzig, 1953, 429 Seiten, 298 Abbildungen, 17 Tabellen.

/570/ Kulshreshtha, S. N. (1988): Estimation of Contributions of a Resource Sector to a Provincial Economy: The Case of Saskatchewan Potash.- Canadian Journal of Regional Science/Revue canadienne des sciences régionales. XI:3 (Autumn/automne 1988), 431 - 444.

/571/ Kulyniak, D. (2002): Chemical plant in Lviv Oblast poses danger to Stebnyk region.- The Ukrainian Weekly, 14. Juli 2002.

/572/ Kurlansky, M. (2001): Salt: A World History. Walker & Company, November 2001, 496p.

/573/ Kurtanjek, M. P. (1983): Mining and Beneficiating Potash, Recent Developments and Trends outside North America.- Phosphorus Potassium 128 (1983), Nov/Dec, 26 - 31.

/574/ Kuyumcu, M. (2012): Bewältigung von technischen, ökologischen und sozialen Herausforderungen bei der Stilllegung von Kalibergwerken im Südharz-Revier.- In: Abstracts & Lectures, Anniversary Symposium Potash Fertilizer Production in the 21st Century - 60 Years of Potash Engineering Made in Erfurt - 20 Years of ERCOSPLAN Group of Companies; Erfurt, 09. November 2012, 36 - 37.

/575/ Kuznetsov, N. V. (1967): Einige Elemente des Bruchmechanismus klüftiger Schichtgesteine über Abbauen und die Bedingungen der Standfestigkeit des Hangenden.- 9. Ländertreffen des Internationalen Büros für Gebirgsmechanik, Leipzig, November 1967, 104 - 121.

/576/ Kuznetsov, N. V. (2006): Кузнецов, Н.В. (2006): Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей.- Пезентация, Березники, 2006, 72 стр. [Verchnekamskoe-Lagerstätte der Kali- und Magnesiumsalze.- Präsentation, Berezniki, 2006, 72 Seiten.]

/577/ LAB (2004): LÄNDERAUSSCHUSS BERGBAU, Anforderungen an die Verwertung von bergbaufremden Abfällen im Bergbau über Tage: Technische Regeln. Stand: 30.03.2004, 60 Seiten, 4 Abbildung, 1 Tabelle, 6 Anlagen.

/578/ LAB (2014): LÄNDERAUSSCHUSS BERGBAU, Kriterien für die Abgrenzung bergbaulicher Abfälle (§ 22a Abs. 1 Satz 1 ABBergV, § 2 Abs. 2 Nr. 7 KrWG).

/579/ Labbe, P. & Kelly, D. (2009): A Saskatchewan Potash Review.- In: Salt Symposium Collection of SMRI Solution Mining Research Institute, Fall Symposium, November 2009, Bejing, China, 12p.

/580/ Lamster, E. (2003): Zur Entwicklung der Energieanlagen.- In: Bartl, H.; Döring, G., Hartung, K., Schilder, C. & Slotta, R. (Hrsg.): Kali im Südharz-Unstrut-Revier.- Band 1, Selbstverlag des Deutschen Bergbau-Museums Bochum, Sondershausen, 2003, 245 - 291.

/581/ Landgraeber, W. (1927): Kalihaltige Lagerstätten im In- und Auslande.- Polytechnisches Journal, 342, 1927, 55 - 57, digitalisiert unter http://dingler.culture.hu-berlin.de/article/pj342/ar342013.- Abrufdatum: 17. Mai 2015.

/582/ Landine, P. G. (1993): Weathering and diagenesis of Saskatchewan potash tailings.- A Thesis submitted to the College of Graduate Studies and Research in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in the Department of Civil Engineering University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Fall 1993, 494p.

/583/ Landine, P. G., Barbour, S. L. & Reeves, M. J. (1992): Weathering characteristics of potash tailings: Environmental Management for Mining, Saskatoon, Saskatchewan.

/584/ Langefeld, O. (2005): Einsatz von Rückhaltesystemen in untertägigen Fahrzeugen des Kali- und Salzbergbaus.- Kali und Steinsalz, 2005, 12 - 15.

/585/ Larmour, D. (1983): Electrostatic Separation of Potash.- In: McKercher, R.M. (ed.): Proceedings First International Potash Technology Conference Potash‘ 83, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, October 03 - 05, 1983, Pergamon Press, Toronto, 597 - 602.

/586/ Le Baron, I. M. & Knopf, W. C (1958): Application of Electrostatics to Potash Beneficiation.- Min. Eng. 10 (1958), 1081 - 1083, Littleton Co. 1958.

/587/ Lekhov, A.V. (2007): Bewertung der Einwirkung der Halde im Werk SKRU-2 auf die Grundwasser.- Naturwissenschaftliches Institut der Permer Staatsuniversität, Perm, 2007. [Лехов, А.В. (2007): Оценка влияния солеотвала СКРУ-2 на подземные воды. Пермь, ЕНИ ПГУ, 2007].

/588/ Leland, R. & Pekeski, D. (2012): Western Potash Corp. Milestone Project: How does it compare?.- In: Proceedings Spring 2012 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, Regina, Saskatchewan, April 22 - 23, 2012, 113 - 26.

/589/ Lenz, O. (1983): Stand der Untersuchungen zur Begrünung von Rückstandshalden der Kaliindustrie.- Kali und Steinsalz, 1983, 406 - 410.

/590/ Leppla, S. (2012): Baugrund-Tragwerk-Interaktion von Rückstandshalden. Forum für junge Geotechnik-Ingenieure der 32. Baugrundtagung der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V., Mainz, 26. September 2012.

/591/ Liebig, J. (1843): Die Chemie in ihrer Anwendung auf Agricultur und Physiologie 1840.- Verlag Vieweg Braunschweig, 5. korr. und sehr vermehrte Aufl. 1843.

/592/ Liemen, F., Bernsdorf, S. & Meissner, R. (2010): Recultivation of a potassium mining waste dump with municipal sewage sludge compost.- In: Congress Handbook, 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, 01. - 06. August 2010, Brisbane, Australien, 59 - 61.

/593/ Lima Faria, de, F. M. (2012): How Will Brazil Satisfy Its Hunger for Potash in the Future? .- In: Abstracts & Lectures, Anniversary Symposium Potash Fertilizer Production in the 21st Century - 60 Years of Potash Engineering Made in Erfurt - 20 Years of ERCOSPLAN Group of Companies; Erfurt, 09. November 2012, 86 - 87.

/594/ Lindenberg, Udo (2008): Mein Hermann Hesse: Ein Lesebuch. 2. Auflage, Suhrkamp Verlag, Seite 26.

/595/ Lindert, A. & Schreiner, W. (1988): Verfahren zur Prognose standzeitbedingter Gebirgsbewegungen um große untertägige Hohlräume im Salzgebirge.- Neue Bergbautechnik 18 (1988), 4, 147 - 152.

/596/ Lindloff, U. & Klemmer U. (1999): Dickstoffversatz im Kalibergbau.- Glückauf mit Kali und Steinsalz, 1999, 525 - 529.

/597/ Link, H. (1971): Watertight Shaft Lining of Combined Concrete and Steel-Plate Construction for a Canadian Potash Mine Shaft.- CIM Bulletin 64 (1971), 711, 73 - 78.

/598/ Linn, K. O. B. (1965): Halite Zones in Potash Deposits Carlsbad, New Mexico.- In: Proceedings Second Symposium on Salt, Cleveland, Ohio, May 03 - 05, 1965, 59 - 69.

/599/ Liu, C., Wang, M., Jiao, P., Chen, Y. (2008): Characteristics and formation of the potash deposits in Lop Nur salt lake, Xinjiang, China.- In: Proceedings 33rd International Geological Congress, Oslo, 06. - 14. August 2008.

/600/ Livingstone, P., Purcell, J., Morehouse, D. & Waugh, D. (2001): Mining at IMC Potash Carlsbad.- In: Hustrulid, W. A. & Bullock, R.L. (2001): Underground Mining Methods - Engineering Fundamentals and International Case Studies.- 131 - 136; SME Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Littleton, Colorado, 2001.

/601/ Longbo, C., Fuliang, W., Xingxing, X. & Strauss, A. (2012): The Mengo Potash Project: The First MOP Production in West Africa.- In: Abstracts & Lectures, Anniversary Symposium Potash Fertilizer Production in the 21st Century - 60 Years of Potash Engineering Made in Erfurt - 20 Years of ERCOSPLAN Group of Companies; Erfurt, 09. November 2012, 70 - 73.

/602/ Lopushnyak, A. G. (1991): Environmental Protection at Potassium Plants of the USSR.- In: Proceedings Kali '91 - Second International Potash Technology Conference. Hamburg, 26 - 29 May 1991.

/603/ Lotze, F. (1957): Steinsalz und Kalisalze.- 2. Auflage, Gebr. Bornmträger, Berlin, 1957.

/604/ Lowenstein, T. K., Timofeeff, M. N., Brennan, S. T., Hardie, L. A. & Demicco, R. V. (2001): Oscillations in Phanerozoic seawater chemistry: Evidence from fluid inclusions.- Science 294 (2001), 2, 1086 - 1088.

/605/ Lozowski, D. (2012): Technology from Veolia Water Solutions is selected for potash and salt recovery in Spain. Chemical Engineering. 30.08.2012 (Online: http://www.chemengonline.com/technology-from-veolia-water-solutions-is-selected-for-potash-and-salt-recovery-in-spain/).- Abrufdatum: 14. Dezember 2012.

/606/ LRP (2007): О краевой целевой программе «Развитие и использование минерально-сырьевой базы Пермского края на 2007-2010 годы», 05.04.2007 № 24-ПК (с изм. на 12.03.2010); приложение „Краевая целевая программа «Развитие и использование минерально-сырьевой базы Пермского края на 2007-2010 годы»», разработанное Горным институтом УрО РАН .- предоставлен http://docs.cntd.ru/document/911516747, [Электронный ресурс], 2015 [LEGISLATIVE REGION PERM: Gesetz der Region Perm: „Über das regionale zweckbestimmte Programm „Entwicklung und Nutzung der Mineralrohstoffbasis der Region Perm 2007-2010", 05.04.2007 Nr. 24-PK (mit Änderungen vom 12.03.2010); Anlage „Das regionale zweckbestimmte Programm „Entwicklung und Nutzung der Mineralrohstoffbasis der Region Perm 2007-2010", Autor - Berginstitut UrO RAN .- http://docs.cntd.ru/document/911516747, [digital], 2015.].

/607/ Lücke, M. (1997): Rekultivierung von Rückstandshalden der Kaliindustrie -1- Untersuchungen zum Standort zur Begründung mit Komposten und zur Gehölzsukzession von Rückstandshalden mit anhydritischen Auflageschichten.- Ökologie und Umweltsicherung 12/1997, Universität – Gesamthochschule Kassel; Fachbereich Landwirtschaft, Internationale Agrarentwicklung und Ökologische Umweltsicherung.

/608/ Lugli, S. (1999): Geology of the Realmonte salt deposit, a desiccated Messinian Basin (Agrigento, Sicily).- Memorie della Societá Geologica Italiana 54 (1999), 75 - 81.

/609/ Lukas, V. (2011): Erweiterung der Untertageverwertung Unterbreizbach.- Runder Tisch, Kassel, 20. September 2011, 18 Seiten.

/610/ Lux, K.-H. & Heusermann, S. (1983): Creep Tests on Rock Salt with Changing Load as a Basis for the Verification of Theoretical Material Laws.- Sixth Symposium on Salt, Toronto, 24. - 28. Mai 1983, 417 - 435.

/611/ Maas, K. (2003): New Approaches to the Modelling of Salt Leaching Processes in a Flooded Potash Shaft.- In: Proceedings Spring 2003 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, Houston, Texas, 27. - 30. April 2003, 8p.

/612/ Mackintosh, A. D. (1977): Strata Control in a Deep Potash Mine. Proceedings 6th International Strata Control Conference, Banff, Alberta, 1977, 12p.

/613/ Mackintosh, A. D. & McClung, W. C. (2000): The Control of a Brine Inflow and Support to the Resulting Solution Cavern in a Conventional Saskatchewan Potash Mine.- In: Proceedings Eight Symposium on Salt, The Hague, The Netherlands, May 07 - 11, 2000, 381 - 386.

/614/ Maia da Costa, A. & Cabral de Melo, P. R. (1992): Stress analysis and sizing of caverns mined by dissolution of halite of the evaporitic basin at the state of Alagoas in Brazil.- In: Proceedings Fall 1992 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, Houston, Texas, 18. - 22. October 1992, 38p.

/615/ Malovichko, A.A., Sabirov, R. H. & Mynka, Y. V. (2001): Seismological monitoring in the system of comprehensive control at Upper Kama Potash Mines.- Exkurs.f. u. Veröffentl. GGW, 211, Berlin, 2001, 5-27 - 5-35.

/616/ Malovichko, A.A., Shulakov, D. Y., Sabirov, R. H., Ghilyov, M. V. & Fominykh, V. I. (1999): Ground and seismic control of al large scale emergency at a potash mine.- Proc. 101st Annual Gen. Meeting of the Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Calgary, May 02 - 05, 1999.

/617/ Malovichko, D., Dyagilev, R., Shulakov, D. Y. & Butyrin, P. (2009): Seismic monitoring of large-scale karst processes in a potash mine.- In: Tang, C. (ed.): Controlling seismic hazard and sustainable development of deep mines.- Volume 2, Rinton Press, New York, 2009, 989 - 1002.

/618/ Manker, E. A. (1969): Hydraulic Fracturing in Salt and Potash Formations.- In: Proceedings Third Symposium on Salt, Cleveland, Ohio, April 21 -24, 1969, 439 - 444.

/619/ Manthei, G. (1997): Seismic Tomography on a Pillar in a Potash Mine.- In: Prcoeedings 4th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines, Cracow, Poland, A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 1997, 237 - 243.

/620/ Manzi, V., Gennari, R., Lugli, S., Roveri, M. & Schreiber, B.C. (2011) The Messinian „Calcare di Base“ (Sicily, Italy) revisited.- Geological Society of America Bulletin 123 (2011), 347-370.

/621/ Martens, P. N. (2009): Stellungnahme zum Beitrag zur Güteverbesserung in Werra und Weser durch untertägigen Versatz von festen und flüssigen Rückständen aus der Kaliproduktion (Darstellung und Bewertung von technischen Lösungen).- Aachen, 26.03.2009, 51 Seiten.

/622/ Marx, H. , Kaps, S., Scherzberg, H. & Bach, J. (2013): Überlegung zur Aufbereitung der Abstoßlösungen des Werkes Werra.- Vortrag Dr. Heiner Marx, K-UTEC AG Salt Technologies, 22. Sitzung des Runden Tisch, Stadthalle Beverungen, 24. September 2013, 12 Seiten.

/623/ Marx, H., Scherzberg, H., Schultheis, B., Bach, J. & Stäubert, A. (2012a): Überlegungen zur abstoßfreien Produktion von Salzen.- Vortrag Dr. Heiner Marx, K-UTEC AG Salt Technologies, 20. Sitzung des Runden Tisches, Kongress Palais Kassel, 18. September 2012.

/624/ Marx, H., Scherzberg, H., Schultheis, B., Bach, J. & Stäubert, A. (2012b): Möglichkeiten zur abstoßreduzierten Produktion von Salzen.- Vortrag Dr. Heiner Marx, K-UTEC AG Salt Technologies, Festkolloquium vom 05. Oktober 2012, Haus der Kunst, Sondershausen.

/625/ Matthews, R. D. & Egleson, G. C. (1973): Origin and Implications of a Mid-Basin Potash Facies in the Salina Salt of Michigan.- In: Proceedings Fourth Symposium on Salt, Houston, Texas, April 08 - 12, 1973, The Northern Ohio Geological Society, 15 - 34.

/626/ Mayhew, E. J. (1965): Complex Salts and Brines of the Paradox Basin.- In: Proceedings Second Symposium on Salt, Cleveland, Ohio, May 03 - 05, 1965, 221 - 235.

/627/ Mayrhofer, H. (1983): World Reserves of Mineable Potash Salts Based on Structural Analysis.- In: Schreiber, C. (ed.): Proceedings Sixth International Symposium on Salt, Toronto, 24. - 28. Mai 1983.- Vol. 1: The Salt Institute, Alexandria, 1985, 141 - 160.

/628/ McKercher, R. M. (ed., 1983): Potash Technology - 1st International Potash Technology Conference, Saskatchewan, Canada, 03. - 05. Oktober 1983. Pergamon Press, Toronto 1983.

/629/ McWhorter, C. E. (1962): Development of Continuous Boring Machines for Salt and Potash Underground Mining.- In: Proceedings First Symposium on Salt, Cleveland, Ohio, 03. - 05. Mai 1962, 348 - 359.

/630/ MDHES (2008): Environmental Project Proposal – Mosaic Potash Esterhazy K2 TMA Expansion.- MDH ENGINEERED SOLUTIONS, 2008, 117p.

/631/ MDPA (2004a): 1904 - 2004 - Un Sielce de Potasse en Alsace.- MDPA Mines de Potasse d‘ Alsace, Wittelsheim, 2004, 159p., 2 DVD.

/632/ MDPA (2004b): La Memoire en Partage.- In: 1904 - 2004 - Un Sielce de Potasse en Alsace.- MDPA Mines de Potasse d‘ Alsace, Wittelsheim, 159p.

/633/ MDPA (2004c): La Potasse en Alsace.- In: 1904 - 2004 - Un Sielce de Potasse en Alsace.- MDPA Mines de Potasse d‘ Alsace, Wittelsheim, DVD 1.

/634/ MDPA (2004d): Le Mines et les Mineures.- In: 1904 - 2004 - Un Sielce de Potasse en Alsace.- MDPA Mines de Potasse d‘ Alsace, Wittelsheim, DVD 2.

/635/ Medemblik, L. (1983): Potassium Chloride in the French Potash Industry.- In: McKercher, R. M. (ed.): Proceedings Potash ‘83 - First International Potash Technology Conference, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, October 03 - 05, 1983, Pergamon Press, Toronto, 653 - 659.

/636/ Meijering, M. (1978): Die Werraversalzung - ein derzeit unlösbares ökologisches Problem.- Naturschutz in Nordhessen 2 (1978), 109 - 110.

/637/ Mellegard, K. D., Pfeife, T. W. & Senseny, P. E. (1983): Constitutive Behavior of Salina Salt from the Cleveland Mine.- In: Proceedings Sixth Symposium on Salt, Toronto, Mai 1983, 481 - 486.

/638/ Menk, H. (1980): Die Werra-Versalzung - ein Umweltskandal.- Hessischer Gebirgsbote 81 (1980), 4, 118 - 122.

/639/ Menzel, W. (1970): Beitrag zur Dimensionierung von Kammerpfeilern im Salzbergbau.- Dissertation der Bergakademie Freiberg, 1970, 122 Seiten, 4 Anlagen.

/640/ Menzel, W. (1972): Ein Beitrag zur Dimensionierung von Kammerpfeilern im Salzbergbau.- Neue Bergbautechnik 2 (1972), 5, 345 - 353.

/641/ Menzel, W. (1975): Das Festigkeits- und Verformungsverhalten von Carnallitit als Grundlage für die Standsicherheitsbewertung von Grubenbauen.- Neue Bergbautechnik 5 (1975), 6, 451 - 457.

/642/ Menzel, W. & Schreiner, W. (1977): Zum geomechanischen Verhalten von Steinsalz verschiedener Lagerstätten der DDR Teil II: Das Verformungsverhalten.- Neue Bergbautechnik 7 (1977), 8, 565 - 571.

/643/ Menzel, W. & Schreiner, W. (1978): Zum geomechanischen Verhalten von Steinsalz verschiedener Lagerstätten der DDR Teil III: Zum Einfluss erhöhter Temperatur, schwellenden Drucks und radioaktiver Strahlung.- Neue Bergbautechnik 8 (1978), 3, 143 - 148.

/644/ Menzel, W., Eckart, D., Brückner, G. & Thoma, K. (1972): Gegenwärtiger Stand der vom Institut für Bergbausicherheit entwickelten Methoden zur Dimensionierung von Pfeilern und Firstspannweiten im Kalibergbau.- Vortrag zum 5. Internationalen Kongress für Gebirgsdruckforschung, London, 1972.

/645/ Menzel, W., Minkley, W. & Salzer, K. (2000): Rock Mechanical Hazard Analyses and Filling for Salt Mines to be Abandoned.- In: Proceedings Eight Symposium on Salt, The Hague, The Netherlands, May 07 - 11, 2000, 1183 - 1184.

/646/ Meyer, H. E. (1970): Solution Mining in a Two-Well System.- Research Project Report No. 70-0001-S prepared for Spring 1970 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, Austin, Texas, Mai 1970, 99p.

/647/ Michailov, V. I., Petkevich, M. Z., Titkov, S. N. & Chizick, V. A. (1979): Михайлов, В. И., Петкевич, Н. З., Титков, С. Н. & Чижик, В. И. (1979): Протонная релаксация в воде на поверхности кристаллов хлористого натрия.- Журнал структурной химии, 1979, т. 20, № 1, 174-175 [Proton relaxation in water and onto surface of sodium chloride.- Journal of Structural Chemistry 1, 22 - 27].

/648/ Michalzik, A. (1966): Die Bedeutung des Versatzes für die planmäßige Senkung der Abbauverluste im Kalibergbau.- FFH Freiberger Forschungshefte, A 400, Leipzig, 1966.

/649/ Michalzik, A. (2001): Rückblick auf die Anwendung des Spülversatzes aus Rückständen der Rohsalzverarbeitung im Kalibergbau.- In: Rauche, H. & Sitz, P. (Hrsg.): Spülversatz im Salzbergbau.- FFH Freiberger Forschungshefte, A 855, Freiberg 2001, 17 - 31.

/650/ Michels, W. & Przibylla, C. (1916): Die Kalirohsalze. Ihre Gewinnung und Verarbeitung. Verlag Otto Spamer, Leipzig, 1916, 339 Seiten.

/651/ Michl, M. & Spachtholz, F. X. (2005): Überwachung und Bewertung der Grubenwetter in den Bergwerken der KS Gruppe im Umfeld nationaler und europäischer Grenzwertdiskussion.- Kali und Steinsalz, 2005, 16 - 21.

/652/ Middleton, A. S. (2011): Technical and Economic Considerations for the Development of a New Potash Solution Mine in Saskatchewan.- In: Proceedings Spring 2011 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, Galveston, Texas, 18. - 19. April 2011, 16p.

/653/ Middleton, A. S. (2012): Who, What, When, Where, Why? An engineering perspective on current developments in the Canadian potash industry.- In: Abstracts & Lectures, Anniversary Symposium Potash Fertilizer Production in the 21st Century - 60 Years of Potash Engineering Made in Erfurt - 20 Years of ERCOSPLAN Group of Companies; Erfurt, 09. November 2012, 40 - 41.

/654/ Middleton, A. S., Cormode, D. A. & Scotten, J. E. (1983): Compaction Plant Expansion Process design and Equipment Selection at Cominco Ltd., Potash Operations.- In: McKercher, R.M. (ed.): Proceedings First International Potash Technology Conference Potash, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, October 03 - 05, 1983, Pergamon Press, Toronto, 647-651.

/655/ Miller, H. D. S. (1980): Stability of Excavations and Design of Mining Layouts in a Deep Level Potash Mine.- Ph.D. Thesis, Newcastle upon Tyne, England, 508p.

/656/ Miller, H. D. S. (1983): Factors to be Considered for Increasing the Extraction of Underground Potash Deposits.- First International Conference On Stability In Underground Mining Chapter (Kapitel 22).- Design Considerations, 6p.

/657/ MINING INSTITUTE (2014): Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей (пятая редакция).- Автор :Горный институт УрО РАН, утверждено: ПАО «Уралкалий», ЗАО „Верхнекамская калийная компания“, ООО „ЕвроХим - Усольский калийный комбинат“, Санкт-Петербург - Пермь, 2014, 130 стр. [Mining Institute UB of RAS (2014): Instructions for Protection of Mines against Flooding and for Protection of undermined Objects on the Upper Kama Potash-Magnesium Deposit.- Mining Institute UB of RAS, PAO Uralkali, ZAO „Verkhnekamsk Potash Company“, OOO „EuroChem“, Sankt-Petersburg - Perm, 2014, 130 p.].

/658/ MINING INSTITUTE, URALKALI, SILVINIT & Technological Administration (2008): Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей.- Горный институт УрО РАН, ОАО «Уралкалий», ОАО «Сильвинит», Пермское межрегиональное управление по технологическому и экологическому надзору, Санкт-Петербург, 2008, 52 стр. [Mining Institute UB of RAS, OAO Uralkali, OAO Silvinit, Local Administration for Technological and Ecological Supervision Perm, Sankt-Petersburg (2008): Instructions for Protection of Mines against Flooding and for Protection of undermined Objects under the Conditions of the Upper Kama Potash Deposit.- Mining Institute UB of RAS, OAO Uralkali, OAO Silvinit, Local Administration for Technological and Ecological Supervision Perm, Sankt-Petersburg, 2008, 52 p.].

/659/ Minkley, W. (1989): Festigkeitsverhalten von Sedimentgesteinen im post-failure-Bereich und Gebirgsschlagerscheinungen.- In: Proceedings Int. Symp. Rock at Great Depth, Pau, Vol. 1, 59 - 65.

/660/ Minkley, W. (1997): Sprödbruchverhalten von Carnallitit und seine Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit von Untertagedeponien. Berichte FZKA-PTE Nr.5, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 1997, 249 - 275.

/661/ Minkley, W. (1998): Zum Herdmechanismus von großen seismischen Ereignissen im Kalibergbau.- Geologisches Jahrbuch, E 55, 1998, 69 - 84.

/662/ Minkley, W. (2003): Gebirgsmechanische Beschreibung von Entfestigung und Sprödbruch- erscheinungen im Carnallitit.- Habilitation TU Bergakademie Freiberg, 2003.

/663/ Minkley, W. (2004a): Gebirgsmechanische Beschreibung von Entfestigung und Sprödbrucherscheinungen im Carnallitit; Schriftenreihe des Instituts für Gebirgsmechanik GmbH, Heft 1, Shaker Verlag, Aachen, 2004, 200 Seiten.

/664/ Minkley, W. (2004b): Back analysis rock burst Völkershausen 1989.- In: Proceedings of 1th International UDEC/3DEC Symposium, Numerical Modelling of Discrete Materials in Geotechnical Engineering, Civil Engineering and Earth Sciences, Bochum, Germany 29 September - 01 October 2004, A.A Balkema, Rotterdam, 105 - 112.

/665/ Minkley, W. & Menzel, W. (1999): Vorausberechnung des Kollapses eines Grubenfeldes - Gebirgsschlag Teutschenthal 11. September 1996.- In: Proceedings 9th Int. Congress on Rock Mechanics, Paris, France, Vol. 2, 1999, 1115 - 1118.

/666/ Minkley, W. & Mühlbauer, J. (2007): Constitutive Models to describe the mechanical Behaviour of Salt Rocks and the imbedded weakness Planes.- In: The Mechanical Behavior of Salt; Proceedings 6th Conference, Hannover, 22 - 25 May 2007, Taylor & Francis/Balkema, Leiden, 2007, 119 - 128.

/667/ Minkley, W. & Rauche, H. (2013): Stability and Integrity - Geomechanical Constraints in Potash and Salt Mining.- Proceedings Fourth Thailand Rock Mechanics Symposium (ThaiRock 2013), January 24 - 25, 2013, 27p.

/668/ Minkley, W. & Rose, K. (1989): A geomechanical model of mining-induced seismicity.- Gerlands Beitr. Geophys. 98, 6, 491 - 499.

/669/ Minkley, W. & Wüste, U. (1979): Nichtlineare Festigkeitskriterien für Gesteine und Gesteinstrennflächen.- Neue Bergbautechnik 9, 310 - 314.

/670/ Minkley, W., Berest, P., Schleinig, J. P., Farkas, F. & Böttge, V. (2012): Dynamic back-calculation of the collapse of the Saint-Maximilien mining field during mining on rock salt in Varangéville (1873). The Mechanical Behaviour of Salt.- In: Proceedings 7th Conference (SaltMech7), Paris, France, 2012, Taylor and Francis, 241 – 252.

/671/ Minkley, W., Knauth, M. & Wüste, U. (2012): Integrity of salinar barriers under consideration of diskontinuum-mechanical aspects.- In: Proceedings of 7th Conference (SaltMech7) Paris, France, 2012, Taylor and Francis, 469-478.

/672/ Minkley, W., Menzel, W., Konietzky, H. & te KAMP, L. (2001): A visco-elasto-plastic model and its application for solving static and dynamic stability problems in potash mining.- In: Proceedings 2nd Int. FLAC Symposium, Lyon, 29 – 31 October, 21 - 27.

/673/ Minkley, W., Mühlbauer, J. & Storch, G. (2007): Dynamic processes in salt rocks – a general approach for softening processes within the rock matrix and along bedding planes.- In: M. Wallner, K.H. Lux, W. Minkley & H. R. Hardy. The Mechanical Behaviour of Salt – Understanding of THMC Processes in Salt.- 6th Conference (SaltMech6), Hannover, Germany, 22 - 25 May 2007, Taylor and Francis, 295 - 303.

/674/ Minnich, M. (1996): Die Rekultivierung von Kalirückstandshalden. Begrünungsversuche auf der Halde Bleicherode/Thüringen unter besonderer Berücksichtigung bodenkundlicher Parameter, begleitet von Gefäß- und Kleinlysimeterversuchen.- Geoid 1 (1996), 2, 18 - 31.

/675/ Mocka, N. (1994): Der Systemkuppenabbau in der Grube Unterbreizbach.- Kali und Steinsalz, 1994, 256 - 262.

/676/ MOE (2014): Ministry of Economy: Potash Dispositions (Online: www.economy.gov.sk.ca/adx/aspx/adxGetMedia.aspx?DocID=10783,10560,10306,3385,5460,2936,Documents&MediaID=106198c8-b91c-42ef-8cd9-d71abda84193&Filename=Potash+Dispositions+Map+October+1%2c+2014.pdf).-Abrufdatum: 21. Januar 2015.

/677/ Molavi, M. A. (1987): A study of potash mining methods related to ground control criteria.- Master Thesis in Engineering. Department of Mining and Metallurgical Engineering, McGill University, Montreal, Quebec, Juli 1987.

/678/ Moloshtanova, N. E. & Vishnyakov, A. K. (2010): Молоштанова, Н.Е., Вишняков, А.К. (2010): Комплексные минерально-технологические исследования калийных руд Верхнекамского месторождения. В: Группа предприятий ЗУМК(изд.): Рудник будущего. Научно-технический журнал, Пермь, специальный выпуск №4, 2010, стр. 77 - 81. [Moloshtanova, N. E. & Vishnyakov, A. K. (2010): Komplexe mineralogisch-technologische Untersuchungen der Kalisalze der Verchnekamskoe-Lagerstätte.- In: Unternehmensgruppe ZUMK (Hrsg.): Bergwerk der Zukunft, Perm, Spezialausgabe Nr. 4, 2010, 77 - 81].

/679/ Moore, G., Danyluk, T., Franklin, B., Prugger, A. & Vander Most, A. (2011). National Instrument 43-101 Technical Report on Rocanville Potash Deposit (KLSA-002).- Saskatchewan, Canada, Securities Exchange Commission Public Filing, 68p.

/680/ Moore, P. (2012): Potash from Iberia.- In: Team Publishing Ltd. (Hrsg.): International Mining, Berkhamsted, großbritannien, Juni 2012, 16 - 18.

/681/ MOSAIC (2012a): Form 10-K for the fiscal year ended May 31, 2011. The Mosaic Company, Washington D.C., 2011.

/682/ MOSAIC (2012b): The Mosaic Company, 2012 Sustainability Report.- Plymouth, November 2012, 78p.

/683/ MPC (1990): Use of Backfill in the New Brunswick Potash Mines - Phase II.- Prepared for Denison-Potacan Potash Company, Sussex, New Brunswick, by Mraz Project Consultants, Saskatoon, Sasketchewan, under the auspices of CANMET, Project No. 1.4.09.05, 1990.

/684/ MR BELARUS (2011): Мероприятия по выполнению Программы социально-экономического развития Республики Беларусь на 2011–2015 годы.- [Maßnahmen zur Durchführung des Programms für die sozial-ökonomische Entwicklung der Republik Belarus für 2011-2015], verabschiedet durch einen Beschluss von dem Ministerrat der Republik Belarus vom 11.07.2011, Beschluss-Nr 942.- Minsk, 2011.

/685/ Mraz, D. Z. (1972): The Theory of Flow and its Practical Application for Pillar Design in Deep Potash Mines.- Western Miner, April 1972, 22 - 26.

/686/ Mraz, D. Z. (1973): Behaviour of Rooms and Pillars in Deep Potash Mines. CIM Bulletin 66 (1973), 735, 60 - 65.

/687/ Mraz, D. Z. (1978): Theoretical Predictions Confirmed by In Situ Rock Behaviour in Deep Potash Mine.- In: Proceedings, 19th U.S. Symposium on Rock Mechanics, Reno, Nevada, 01. - 03. Mai 1978, 468 - 475.

/688/ Mraz, D. Z. & Hambley, D. F. (1987): Behaviour of Rooms and Pillars in Deep Potash Mines - A case History.- In: ARMA (Hrsg.): The 28th U.S. Symposium on Rock Mechanics, Tuscon, Arizona, 29. Juni - 01. Juli 1987, 138 - 143.

/689/ Mraz, D. Z. & Jones, R. S. (1986): A Case History Of Convergence And Subsidence Over A Deep Saskatchewan Potash Mine.- SME Reference Book Mine Subsidence, Chapter 17 - Subsidence in Hardrock Mining, SME Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Littleton, Colorado, 11p.

/690/ Mróz, Z. & Zadroga, B. (1980): Bearing Capacity Analysis for a Compressed Strip of an Elasto-Plastic Material with Softening.- Arch. Hydrotechn., Vol. 27.

/691/ MS (2014): Theater „vom Dorf“. Magdeburger Sonntag, 10. Juni 2014 (Online: http://www.magdeburgersonntag.info/artikel/theater-vom-dorf-furs-ganze-land-0610).- Abrufdatum: 05. Mai 2015.

/692/ MSEC (2007): Introduction to Longwall Mining and Subsidence.- Chatswood, Revision A, MINE SUBSIDENCE ENGINEERING CONSULTANTS, August 2007, 12p.

/693/ Müller, P. & Fruth, R (1978): Darstellung geomechanischer Probleme bei der großflächigen Anwendung des Kammerbaus mit zeitlich begrenzter Standfestigkeit der Pfeiler im Kalibergbau der DDR.- Vortrag anlässlich des 15. Geomechanischen Kolloquiums in Leipzig.

/694/ Munroe, S. (1986): Contribution to Use of Backfill in New Brunswick Potash Mines.- Prepared by Denison-Potacan Potash Co., Mraz Project Consultants Ltd. and University of Waterloo for the Canada Centre for Mineral and Energy Technology, Department of Energy Mines and Resources, Project No. 1.4.09.05, 1986.

/695/ Munson, D. E. & Dawson, P. R. (1980): Numerical Simulation of Creep Closure of Deep Potash Mines (With Application to Waste Isolation). Report SAND-80-0467/XAB, Sandia Laboratories, Albuquerque, New Mexico, Juli 1980, 28p.

/696/ MZ (2014): Hochadel auf Mondsafari, Mitteldeutsche Zeitung 11. Juli 2012 (Online: http://www.mz-web.de/kultur/kalimandscharo-festspiele-hochadelauf-mondsafari, 20642198,17078582.html).- Abrufdatum: 05. Mai 2015.

/697/ NABU (2014): Keine Salzeinleitung in die Werra: Ernsthafte Verbesserung nur durch klare Vorgaben, 21. November 2014 (Online: https://niedersachsen.nabu.de/natur-und-landschaft/fluesse/werra-weser/07031.html).- Abrufdatum: 15. Mai 2015.

/698/ Nachsel, G. & Franz, E. (1983): Zur Ausbildung der Wippertal-Störungszone in Bereich der Grubernfelder des Kaliwerks “Glückauf” Sondershausen.- Z. Geol. Wiss., 1983, 1005 - 1021.

/699/ Nair, K., Chang, Y. C., Singh, R. D. & Abdullah, A. M. (1973): Time-Dependent Analysis to Predict Closure in Salt Cavities.- In: Proceedings Fourth Symposium on Salt, Houston, Texas, April 08 - 12, 1973, The Northern Ohio Geological Society, 129 - 139.

/700/ Nancy, C. (2012): Overview of the Potash Mining and Refining Process at Mosaic Belle Plaine.- In: Proceedings Spring 2012 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, Regina, Saskatchewan, April 22 - 23, 2012, 237 - 242.

/701/ Natau, O. (2012): 20 Jahre gutachterliche Begleitung der Verwahrungsarbeiten im Südharz-Kalirevier.- In: Abstracts & Lectures, Anniversary Symposium Potash Fertilizer Production in the 21st Century - 60 Years of Potash Engineering Made in Erfurt - 20 Years of ERCOSPLAN Group of Companies; Erfurt, 09. November 2012, 104 - 105.

/702/ NCBI (2014): A review of halotherapy for chronic obstructive pulmonary disease.- February 21, 2014, (Online: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3937102/).- Abrufdatum: 17 Mai 2015.

/703/ Neitzel, U. (1971): Kristallisation von Salzen aus den Laugen des Großen Salzsees in Theorie und Praxis.- Kali und Steinsalz, 1971, 327 - 334.

/704/ Neitzel, U. (1996): Zur Historie der Namen Kali und Potash.- Kali und Steinsalz, 1996, 79 - 85.

/705/ Neuber, L., Müller, D. & Döring, G. (1967): Patentschrift 53 054, Amt für Erfindungs- und Patentwesen der Deutschen Demokratischen Republik, Berlin, 05. Januar 1976.

/706/ Neuwirth, G. (1959): Bewegungsvorgänge im Kalibergbau des Werra-Fulda-Gebietes.- Dissertation TU Berlin, Kiel, 1959, 95 Seiten.

/707/ Neuwirth, G. (1960): Bewegungsvorgänge im Kalibergbau des Werra-Fulda-Gebietes.- Kali und Steinsalz, 1960, 37 - 54.

/708/ Niemczyk, W. (1949): Bergschadenkunde.- Essen, Verlag Glückauf, GmbH, 1949, 6 Tafeln, 40 Zeichentafeln, 266 Abbildungen.

/709/ Niessing, S. (2005): Rekultivierung von Rückstandshalden der Kaliindustrie. Begrünungsmaßnahmen auf der Rückstandshalde des Kaliwerkes Sigmundshall in Bokeloh.- In: UNIVERSITÄT KASSEL (Hrsg.): Ökologie und Umweltsicherung 25/2005, Universität Kassel; Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften, Fachgebiet Landschaftsökologie und Naturschutz. Kassel, 197 Seiten.

/710/ Nigbor, M. T. (1982): State of the Art of Solution Mining for Salt, Potash and Soda Ash.- Research Project Report, No. 82-0002-SMRI prepared for SMRI Solution Mining Research Institute, Denver, Colorado, 99p.

/711/ NINEMSN (2012): Salt therapy, 24 May 2012, A Current Affair on ninemsn (Online: http://aca.ninemsn.com.au/article/8472866/salt-therapy).- Abrufdatum: 17. Mai 2015.

/712/ NMED (2011): Discharge Permit Renewal Mosaic Potash Carlsbad, DP-1399 Potash Tailing And Brine Management System.- Draft Version.- NEW MEXICO ENVIRONMENT DEPARTMENT, March 09, 2011, 18p.

/713/ NMHFM (2015): NATIONAL MINING HALL OF FAME AND MUSEUM, Inductee Database Goodman, Herbert E. (Online: http://mininghalloffame.org/inductee/goodman).- Abrufdatum: 10. Februar 2015.

/714/ Nörr, K. W. (1991): Das Reichskaligesetz 1910: ein Musterstatut der organisierten Wirtschaft.- Zeitschrift der Savigny-Stiftung für Rechtsgeschichte, Böhlau Verlag Köln-Wien-Weimar, 1991, 347 - 357.

/715/ Northcott, E. & Le Baron, I. M. (1958): Application of Electrostatics to Feldspar Benefication.- Mining Engineering 10, (1958) 10, 1087 - 1093.

/716/ Notholt, A. J. G. (1983): Potash in Developing Countries.- In: McKercher, R. M. (ed.): Proceedings Potash '83 - First International Potash Technology Conference, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, October 03 - 05, 1983, Pergamon Press, Toronto, 29 - 40.

/717/ NRMRP (2012): Отчет об исполнении краевой целевой программе «Развитие и использование минерально-сырьевой базы Пермского края на 2007-2010 годы» за перод с 2007 по 2010 годы.- Министерство природных ресурсов Пермского края, Пермь, 2012, предоставлен http://priroda.permkrai.ru/programs/, [Электронный ресурс], 2015 [Bericht über die Umsetzung des Regionalen zweckbestimmten Programms „Entwicklung und Nutzung der Mineralrohstoffbasis der Region Perm 2007-2010“ für den Zeitraum 2007-2010.- Ministerium der Naturressourcen der Region Perm, Perm, 2012, http://priroda.permkrai.ru/programs/, [digital], 2015.].

/718/ NYSE (2009): Listed Company Manual, The New York Stock Exchange, New York, Juli 2009.

/719/ Ockenga, J. (2015): Bergbau in Ronnenberg (Online: http://www.geschichtsatlas.de/~gc20/g-atlas.htm).- Abrufdatum: 09. Juni 2015.

/720/ Oellers, T., Moniquet, J.-P. & Koshurnikov, N. S. (2014): Оллерс, Т., Монике, Ж.-П., Кошурников, Н.С. (2014) Проектирование строительства стволов калийных и соляных рудников. В: Группа предприятий ЗУМК (изд.): Рудник будущего. Научно-технический журнал, Пермь, специальный выпуск №4, 2014, стр. 12 - 20. [Oellers, T., Moniquet, J.-P. & Koshurnikov, N. S. (2014): Projektierung der Schächte für Kali- und Steinsalzbergwerke.- In: Unternehmensgruppe ZUMK (Hrsg.): Bergwerk der Zukunft, Perm, Spezialausgabe Nr. 3 - 4 (19 - 20), 2014, 21 - 37.].

/721/ OHN (2014): Haldenfest in Heringen. Haldenfest an Fuße des „Monte Kali“ in Heringen gefeiert - Viele Besucher, Osthessen-News, 09. Juni 2014 (Online: http://m.osthessen-news.de/beitrag.php?id=1249722).- Abrufdatum: 05. Mai 2015.

/722/ Orihuel, J. (2012): Iberpotash destina 80 millones a una planta de sal en Súria.- Madrid, Spain. Expansion.com (Online: http://www.expansion.com/2012/01/13/catalunya/1326484925.html#).- Abrufdatum: 14. Januar 2012.

/723/ Ostermeyer, J. (1980): Ein sterbender Fluß? Der andere Staat vergiftet die Werra.- In: Keller, W. (Hrsg.) Werraland.- MERIAN - das Monatsheft der Städte und Landschaften, Sonderheft Juli 1980, 56 - 61.

/724/ Palij, V. D., Smeljanskij, E. S. & Kravchenko, V. T. (1983): Палий, В. Д., Смелянский, Е. С. & Кравченко В. Т. (1983): Определение нормативной прочности твердеющей закладки.- Горный журнал, №3, 1983, стр. 25 - 28. [Bestimmung der Normfestigkeit des erhärtenden Versatzes.- Bergbaujournal, Nr. 3, 1983, S. 25 - 28].

/725/ PAP (1979): The Italian Potash Industry - 20 years since first production.- Phosphorus and Potassium, 1979, 28 - 30.

/726/ PAP (1987): Environmental considerations during potash production.- Phosphorus and Potassium, 1987, 30 - 35.

/727/ PAP (1990): Potassium sulphate in Italy - Geared to expand.- Phosphorus and Potassium, 1990, 12 - 13.

/728/ PAP (1992) Optimization of solar evaporation systems.- Phosphorus and Potassium, 1992, 17 - 25.

/729/ Parnieske-Pasterkamp, J. (2003): Zur Haldenstruktur und Salzlösungsgenese von Rückstandshalden der Kaliindustrie in Nordthüringen.- Z. Geol. Wiss., 2003, 45 - 91.

/730/ Pavilonski, V. M. (1982): Forschung der Rückstandsanlagen und Sammelbecken für Industrieabwässer.- Forschungssammelband VNII VODGEO, 1982, 12-28. [Павилонский, В.М. (1982): Исследования хвостохранилищ и накопителей промстоков.- Сборник научных трудов ВНИИ „ВОДГЕО“, 1982, С. 12-28.].

/731/ Pavlovic-Zuvic, P., Parada-Frederick, N. & Vergara-Edwards, L. (1983): Recovery of Potassium Chloride, Potassium Sulfate and Boric Acid from the Salar de Atacama Brines.- In: Salt Symposium Collection of SMRI Solution Mining Research Institute.- Proceedings Sixth International Symposium on Salt, Toronto, May 1983, 377 - 394.

/732/ Pawlik, J. (1943a): Über die Untersuchungsarbeiten im Gebirgsschlagfeld des Kaliwerks Krügershall.- Kali und verwandte Salze und Erdöl - Zeitschrift für Kali-, Steinsalz- und Erdölindustrie sowie Salinenwesen, August 1943, 8, 130 - 136.

/733/ Pawlik, J. (1943b): Über die Untersuchungsarbeiten im Gebirgsschlagfeld des Kaliwerks Krügershall.- Kali, verwandte Salze und Erdöl - Zeitschrift für Kali-, Steinsalz- und Erdölindustrie sowie Salinenwesen, September 1943, 9, 150 - 160.

/734/ Pawlik, J. (1943c): Über die Untersuchungsarbeiten im Gebirgsschlagfeld des Kaliwerks Krügershall.- Kali, verwandte Salze und Erdöl - Zeitschrift für Kali-, Steinsalz- und Erdölindustrie sowie Salinenwesen, Oktober 1943, 10, 169 - 173.

/735/ Pawlik, J. (1943d): Über die Untersuchungsarbeiten im Gebirgsschlagfeld des Kaliwerks Krügershall.- Kali, verwandte Salze und Erdöl - Zeitschrift für Kali-, Steinsalz- und Erdölindustrie sowie Salinenwesen, November 1943, 11, 190 - 192.

/736/ PCS (2011a): The Next Stage of Growth. Form 10-K for the fiscal year ended December 31, 2010. Potash Corporation of Saskatchewan Inc., Washington D.C., 2011.

/737/ PCS (2011b): PotashCorp and Mosaic Reach an Agreement on Esterhazy Tolling Ligitation, News Release 8 December 2011 (Online: http://www.potashcorp.com/news/1363/).- Abrufdatum: 08. Dezember 2011.

/738/ PCS (2012): Feeding Tomorrow. Form 10-K for the fiscal year ended December 31, 2011. Potash Corporation of Saskatchewan Inc., Washington D.C., 2012.

/739/ Pearson, W. J. (1962): Salt Deposits of Canada.- SMRI Solution Mining Research Institute, Woodstock, USA, Mai 1962, 197 - 239.

/740/ Peirce, H. W. & Gerrard, T. A. (1965): Evaporite Deposits of the Permian Holbrook Basin, Arizona.- In: Salt Symposium Collection of SMRI Solution Mining Research Institute, Spring, Symposium, Cleveland, Ohio, Mai 1965, 1 - 10.

/741/ Pel'š, A. D. (1973/1975): Пельш, А. Д. (1973/1975): Справочник экспериментальных данных по растворимости многокомпонентных водно-солевых систем.- Под ред. А. Д. Пельша [сост.: А. Б.Здановский, Е. Ф.Соловьева, Е. И. Ляховская и др.], Т.1, кн.1: Трехкомпонентные системы, 2-е изд.,перераб.и доп., ВНИИГ, Химия, Ленинград, 1973 & Т.2, кн.2: Четырехкомпонентные и более сложные системы, 2-е изд.,перераб.и доп., ВНИИГ, Химия, Ленинград, 1975 [Handbuch über die Löslichkeit von Salzsystemen, herausgegeben von A. D. Pel'š, Co-Autoren A. B. Zdanovskij, E. F. Solovjova, E. I. Ljachovskaja et al, VNIIG (Hrsg.), Chemie, Leningrad <russ.>, Bd. I, 1973; Bd. II, 1975].

/742/ Pel'š, A. D. & Holldorf, H. (Hrsg.) (1983): Пельш, А.Д. & Хольдорф, Х. (1983): Справочник экспериментальных данных по растворимости многокомпонентных водно-солевых систем.- Том 5, ВНИИГ (СССР) & BAF (DDR), Химия, Ленинград, 1983 [Handbuch über die Löslichkeit von Salzsystemen <russ.>, Bd. V, VNIIG (UdSSR)/BAF (DDR), Chemie, Leningrad, 1983].

/743/ Pellicer, L. (2014): Iberpotash congela la segunda fase de sus inversiones tras la sentencia del Supremo, 14. Juli 2014, Barcelona, Spain, El Pais (Online: http://ccaa.elpais.com/ccaa/2014/07/14/catalunya/1405354443_550687.html).- Abrufdatum: 15. Januar 2015.

/744/ Pendery, E. C. (1969): Distribution of Salt and Potash Deposits: Present and Potential Effect on Potash Economics and Exploration.- In: Proceedings Third Symposium on Salt, Cleveland, Ohio, April 21 -24, 1969, 85 - 95.

/745/ Peng, S. S., Mraz, D. Z. & Gendzwill, D. (1986): Evaluation of Subsidence over a Deep Saskatchewan Potash Mine. 2nd Workshop on Surface Subsidence Due to Underground Mining, Morgantown, West Virginia, June 1986, 91 - 103.

/746/ Pepper, J. & Strathdee, G. (1986): Potash in Saskatchewan.- Canadian Chemical News 38 (1986), 3, 12 - 13.

/747/ Perucca, C. F. (2003): Potash Processing in Saskatchewan - A Review of Process Technologies.- CIM Bulletin (preprinted version), 85 - 95.

/748/ Perucca, C. F. & Cormode D. A. (1999): Update on Insols Flotation at Agrium's Vanscoy Potash Plant.- Presented to the XXXIth CMP Meeting, Ottawa, 183 - 197.

/749/ Peshchenko, A. D. & Mychko, D. I. (2008): Пещенко, А. Д. & Мычко, Д. И. (2008): Ресурсы и перспективы использования каменной и калийных солей Беларуси.- Хімія: праблемы выкладання, №3, 2008 [Ressourcen und Perspektive der Nutzung von Belarus' Stein- und Kalisalz.- Chemie: Lehrprobleme, Nr. 3, 2008].

/750/ Petrichenko, I. O. (1979): Methods of study of inclusions in minerals in saline deposits.- Fluid Inclusion Research 12 (1979), 114 - 274.

/751/ Petrichenko, O. I. (1973): Methods of study of inclusions on minerals of Saline deposits. „Naukova Dumka" Pub. House, Kiev.- In: Roedder, E. (Ed.): Fluid inclusion research - Proceedings of Coffi, Ann Arbor: University of Michigan Press, 1973, 214 - 274.

/752/ Petrichenko, O. I., Panow, G. M., Peryt, T. M., Srebrodolski, B. I., Pobereżski, A. W., & Kowalewicz, W. M. (1994): Outline of geology of the Miocene evaporite formations of the Ukrainian part of the Carpathian Foredeep.- Przegląd Geologiczny, 42, 734 - 737.

/753/ Petrova, N. S., Turko, M. R., Miskev, E.M., Bakhmutskaya, L.V., Kamashev & K. K., Suyunshaliev, Z. K. (2010): Петрова, Н.С., Турко, М.Р., Миськов, Е.М., Бахмутская, Л.В., Камашев, Х.К., Суюншалиев, Ж.Х. (2010): Минералогические исследования калийных рудместорождения „Сатимола". В: Группа предприятий ЗУМК (изд.): Рудникбудущего. Научно-технический журнал, Пермь, специальныйвыпуск №4, 2010, стр. 99 - 103. [Petrova, N. S., Turko, M. R., Miokev, E.M., Bakhmutskaya, L. V., Kamashev & K. K., Suyunshaliev, Z. K. (2010): Mineralogische Untersuchungen der Kali-Salze der Satimola-Lagerstätte.- In: Unternehmensgruppe ZUMK (Hrsg.): Bergwerk der Zukunft, Perm, Spezialausgabe Nr. 4, 2010, 99 - 103.]

/754/ Peuschel, G. (1986): Weiterentwicklung der Heißlöseverfahren durch Anwendung von Lösungsgleichgewichten.- Kali und Steinsalz, 1986, 296 - 303.

/755/ Peyfuss, K. F. & Jacoby, C. H. (1965): Measurement of Salt Pillar Movement.- In: Proceedings Second Symposium on Salt, Cleveland, Ohio, May 03 - 05, 1965, 46 - 56.

/756/ Pfeifer, P. & Stude, J. (2011): Innovative Lösungen für einen Haldenstandort.- Vortrag VBGU Verband Bergbau, Geologie und Umwelt e.V., Jahrestagung Bochum, 23. September 2011.

/757/ Pforr, H. & Michalzik, A. (1966): Die Bedeutung des Versatzes für die planmäßige Senkung der Abbauverluste im Kalibergbau.- FFH Freiberger Forschungshefte, A 400, Leipzig 1966.

/758/ Pfütz, O. (1912): Das Spülversatzverfahren im In- und Ausland.- Glückauf 48 (1912), 34 - 37.

/759/ Phinney, R. & Ma, S. (2012): The Wynyard Project, Saskatchewan, Canada: The Largest Carnallitite Project in the World.- In: Abstracts & Lectures, Anniversary Symposium Potash Fertilizer Production in the 21st Century - 60 Years of Potash Engineering Made in Erfurt - 20 Years of ERCOSPLAN Group of Companies; Erfurt, 09. November 2012, 88 - 89.

/760/ Piens, R., Schulte, H-W., & Graf Vitzthum, S. (2013): Bundesberggesetz: Kommentare. 2. Auflage 2013, Kohlhammer, 1170 Seiten.

/761/ Pierce, R. A. & Anderson, L. D. (1942): Potash Company of America - Producer of Sylvite at Carlsbad.- Eng. Min. J. 143 (1942), 1, 38 - 41.

/762/ Pindyck, R. S. (2014): A Framework for the Taxation of Natural Resources in Israel. 22. September 2014, 39p.

/763/ Pinskij, V. L. & Brusilovskij, D. W. (1981): Пинский, В. Л. & Брусиловский, Д. В. (1981): Очистная выемка калийных руд в камерах.- Научно-исследовательский институт технико-экономических исследований, Москва, 1981, 79 стр. [Kammerabbau von Kalirohsalzen.- Wissenschaftliches Forschungsinstitut für technisch-ökonomische Forschung, Moskau, 1981, 79 S.]

/764/ Pinskij, V. L. & Sobol, A. W. (1972): Пинский, В. Л. & Соболь, А. В. (1972): Отраслевая методика расчёта производительности очистных и проходческих комплексов, включающих комбайн и средства самоходного транспорта (в условиях калийных рудников).- ВНИИГ, Ленинград, 1972, 36 стр. [Fachmethodik der Berechnung von Leistung der Gewinnungs- und Vortriebskomplexe einschließlich Kombine und Pendelverkehrsmittel (in Kalibergwerken).- VNIIG, Leningrad, 1972, 36 S.].

/765/ Plosz, R. E. (2004): Solution Mining of Deep Potash Deposits in the Michigan Basin.- Proceedings Fall 2004 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, Berlin, October 03 - 06, 2004, 167 - 193.

/766/ Plosz, R. E. (2005): Solution Mining of Deep Potash Deposits in the Michigan Basin.- In: Proceedings Spring 2005 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, Syracuse, New York, April 17 - 20, 2005, 27p.

/767/ PM&P (2015): Products. Miners (Online: http://pmparts.com/miners/).- Abrufdatum: 10. Februar 2015.

/768/ Podio, A. L. (1974): Salt Dissolution Studies. State of Art of Salt Dissolution.- In: Proceedings of Summer 1974 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, Toronto, Juni 1974, 25 - 45.

/769/ Podlacha, G. (1999): Rekultivierung von Rückstandshalden der Kaliindustrie - 2 – Untersuchungen zur Substratandeckung mit geringen Schichtstärken aus Bodenaushub-Wirbelschichtasche-Gemischen und ihrer Begrünung - Ökologie und Umweltsicherung 16/1999, Universität – Gesamthochschule Kassel; Fachbereich Landwirtschaft, Internationale Agrarentwicklung und Ökologische Umweltsicherung.

/770/ Pörtge, K.-H. (1999): Der Kalibergbau und seine Folgen in Thüringen und Hessen.- Petermanns Geogr. Mitt. 143 (1999), 1, 59 - 71.

/771/ Poschke, K. (1965): Praktische erfahrungen beim Betrieb der Laugenversenkanlagen im Kalikombinat Werra.- FFH Freiberger Forschungshefte, A 354, Leipzig, 1965, 7 - 21.

/772/ Potts, E. L. J. & Hedley, D. G. F. (1964): Der Einfluß zeitabhängiger Effekte auf die Dimensionierung von Grubenpfeilern.- 6. Ländertreffen des Internationalen Büros für Gebirgsmechanik, Leipzig, November 1964, 30 - 41.

/773/ Pozdeev, A. A., Zemskov, A. N. & Ibragimov, G. I. (2014): Поздеев, А. А., Земсков, А. Н., Ибрагимов, Г.И. (2014): Некоторые аспекты освоения Тюбегатанского месторождения калийных исолей. В: Группа предприятий ЗУМК(изд.): Рудникбудущего. Научно-технический журнал, Пермь, специальный выпуск №4, 2014, стр. 12 - 20. [Pozdeev, A. A., Zemskov, A. N. & Ibragimov, G. I. (2014): Einige Aspekte der Erkundung der Tyubegatanskoe-Kalilagerstätte.- In: Unternehmensgruppe ZUMK (Hrsg.): Bergwerk der Zukunft, Perm, Spezialausgabe Nr. 3 - 4 (19 - 20), 2014, 12 - 20].

/774/ PRB (2012): World Population Data Sheet 2012.- Population Reference Bureau, 2012 (Online: http://www.prb.org/Publications/Datasheets/2012/world-population-data-sheet.aspx).- Abrufdatum: 30. Dezember 2012.

/775/ Prud'homme, M. & Krukowski, S. T. (2006): Potash.- In: Kogel, J. E., Trivedi, N. C., Barker, J. M. & Krukowski, S. T. (Hrsg..): Industrial Minerals & Rocks: Commodities, Markets, and Uses. 7th Edition, Society for Mining, Metallurgy, and Explorations, Inc. (SME), Littleton, Colorado, 723 - 742.

/776/ Prugger, A. (1994). The fracture mechanism of weak seismic events in potash mines.- unpublished Ph. D. thesis, Geological Sciences, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.

/777/ Prugger, A. & Danyluk, T. (1999): Imaging the ore zone in advance of mining using the surface seismic method - an overview.- Mine Time ,99 Conference, Düsseldorf.

/778/ Prugger, A. & Gendzwill, D. (1992): Seismic monitoring in Saskatchewan potash mines.- Annual General Meeting of the CIM, Montreal.

/779/ Prugger, A. & Gendzwill, D. (1993): Fracture mechanism of microseisms in Saskatchewan potash mines.- Proceedings 3rd Symposium on Rockbursts & Seismicity in Mines, Kingston, 239 - 244.

/780/ Prugger, A. & Nemeth, B. (2001): 3D Integration of Earth Science Data at Canadian Potash mines.- 1st MINING GOCAD User's Group Workshop (Sudbury).

/781/ Prugger, A., Nemeth, B. & Danyluk, T. (2004): Detailed 3D Seismic Imaging of Phanerozoic Karst/Collapse Disturbances in Saskatchewan: Case Study from the Potash Belt.- Canadian Society of Exploration Geophysicists CSEG Conference, Calgary, Alberta, 4p.

/782/ Prugger, A., Nemeth, B., Danyluk, T. & Halabura, S. (2002): A new model for Saskatchewan collapse structures.- Geological Association of Canada/Mineralogical Association of Canada GACMAC Conference, Saskatoon.

/783/ Prugger, F. (1979a): The Flooding of the Cominco Potash Mine and its Rehabilitation.- In: Proceedings Fifth Symposium on Salt, Hamburg, 29. Mai - 01. Juni 1979, 333 - 340.

/784/ Prugger, F. (1979b): The Operation of the Cominco Potash Mine with Special Consideration of some Principles of Applied Rock Mechanics for Strata Control.- In: Proceedings Fifth Symposium on Salt, Hamburg, 29. Mai - 01. Juni 1979, 319 - 332.

/785/ Prugger, F. F. (1992): Tailings disposal in potash mines.- In: Singhal, R.K., Mehrota, A.K., Fytas, K., Collins, J.L. (Hrsg..): Environmental Issues and Waste Management in Energy and Minerals Production.- Balkema, Rotterdam, 545 - 554.

/786/ Prugger, F. F. & Jones, P. R. (1980): Underground mining in Saskatchewan potash.- SME-AIME Fall Meeting and Exhibit Mineapolis, October 22 - 24, 1980, 16p.

/787/ Prugger, F. F. & Prugger, A. F. (1991): Water problems in Saskatchewan potash mining - what can be learned from them?.- CIM Bulletin 84 (1991), 945, 58 - 66.

/788/ PSK (2014): Mosaic: potash prices and demand up, cupboards are bare #potash, posted 31 July 2014 (Online: http://prosperitysaskatchewan.wordpress.com/2014/07/31/mosaic-potash-prices-and-demand-up-cupboards-are-bare-potash).- Abrufdatum: 31. Juli 2014.

/789/ Pufahl, D. E. (1983): Properties of potash tailings for tailings pile stability analysis.- In: McKerchew, R.M. (ed.): PotashTechnology: Proceeding of the 1st lnternational Potash Technology Conference, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, October 03 - 05, 1983, Pergamon Press, Toronto, 787 - 792.

/790/ Pufahl, D. E. & Fredlund, D. G. (1988): Lateral movement and material properties of a potash tailings pile in Saskatchewan Canada.- In: Proceedings Hydraulic Fill Structures ,88, ASCE, Geotechnical Speciality Conference, CSU, Fort Collins, Colorado, August 14 - 17, 1988, 956 - 970.

/791/ Purser, B. H. (1985): Coastal evaporite systems.- In: Friedman, G. M. & W. E. Krumbein, W. E. (Hrsg.) Hypersaline Ecosystems, Springer-Verlag, Berlin, 72 - 102.

/792/ Quicker, P. (2013): Entsorgung von Kaliabwässern durch Eindampfung. Evaluierung eines alternativen Entsorgungsszenarios für Kaliabwässer der K+S KALI GmbH.- Studie für Magistrat der Stadt Witzenhausen. Qonversion, Oberhaid, Juni 2013, 36 Seiten.

/793/ Rauche, H. (1988): Deformationsanalyse bergmännisch induzierter Bruchprozesse im carnallititischen Salzgebirge.- Neue Bergbautechnik 18, (1988) 421 - 430.

/794/ Rauche, H. (1990): S-C-mylonites from the potash seam „Thüringen" (Werra Member, Zechstein): products of non-coaxial laminar flow.- Abstr. Int. Symp. „Deformation processes and structure of the lithosphere", Potsdam, May 03 - 10, 1990, 60p.

/795/ Rauche, H. (2000): Sinkhole Formation Over Flooded Potash Mines - Case Studies from the Motherland of the Potash Industry.- In: Sinkholes and unusual subsidence over solution-mined caverns and salt and potash mines.- Proceedings Fall 2000 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, San Antonio, Texas, October 15 - 18, 2000, 161 - 162.

/796/ Rauche, H. (2002a): Ersaufensszenarien und gelenkte Flutung von Kalisalzbergwerken. Forum Angewandte Geologie, Institut für Geowissenschaften der Friedrich-Schiller-Universität Jena, 02. November 2002.

/797/ Rauche, H. (2002b): Rückstandsmanagement im Kalibergbau - Geschichte - Gegenwart-Konzepte für die Zukunft. 2. Kolloquium zum Bergbau und Umweltschutz, Aachen, 21. - 22. Februar 2002.

/798/ Rauche, H. (2004): Verformungsstrukturen in salinaren Gesteinen - Abbilder der mechanischen Eigenschaften der Gesteine und der Randbedingungen von Deformationsprozessen. Wissenschaftliches Kolloquium am Insitut für Geologie und Paläontologie der Technischen Universität Clausthal, 27. Januar 2004, Clausthal-Zellerfeld, 2004.

/799/ Rauche, H. (2013a): Kurzfassung Stand der Technik bei der Gewinnung und Aufbereitung von Kalirohsalzen und natürlichen Lösungen zu Kalidüngemitteln sowie bei der Entsorgung der dabei anfallenden Rückstände.- Zusammenfassung des Gutachtens vorgestellt im Rahmen der AG-Sitzung des Runden Tisches, Haus der Kirche, Kassel, 06. Juni 2013, 2 Seiten.

/800/ Rauche, H. (2013b): Stand der Technik bei der Gewinnung und Aufbereitung von Kalirohsalzen und natürlichen Lösungen zu Kalidüngemitteln sowie bei der Entsorgung der dabei anfallenden Rückstände.- Expertengespräch über technische Verminderungspotenziale für Salzabwasser, AG-Sitzung des Runden Tisches, Haus der Kirche, Kassel, 06. Juni 2013, 24 Seiten.

/801/ Rauche, H. (2014): Kostenschätzung Hypothetische Eindampfanlage für flüssige Rückstände der Kalidüngemittelproduktion am Standtort Werra. Nach Verfahrensvorschlag K-UTEC. Vortrag Dr. Henry Rauche, 23. Sitzung des Runden Tisches, Heringen, 21. Januar 2014, 1 Seite.

/802/ Rauche, H. & Franzke, H. J. (1989): Entwicklung der Bruchtektonik und des Stressfeldes im nördlichen Teil der Süddeutschen Scholle.- In: Exkf. Ges. Geol. Wiss. DDR „Trias und Tertiär der Vorderrhön", 18 - 23.

/803/ Rauche, H. & Franzke, H. J. (1991): Stress field evolution at the northern part of the South German Block on the territory of the G.D.R. .- Gerlands Beitr. Geophys. 99 (1991), 441 - 461.

/804/ Rauche, H. & Franzke, H. J. (1992): Stress field evolution at the northern part of the South German Block .- In: Knoll, P. (ed.): Induced Seismicity.- A.A. Balkema, Rotterdam, 449 - 469.

/805/ Rauche, H. & Grüschow, N. (2000): Проблемы формирования и комплексного освоения месторождений солей (Conventional Potash Mining vs Solution Mining Geological and Technological Frame Conditions of Economic Potash Extraction).- Proceedings 6th International Salt Meeting „Problems of formation and complex development of salt deposits", October 17-20 2000, Solikamsk, 2000, 193 - 194.

/806/ Rauche, H. & Mierdel, K. (2000): Von der Festkörpersuspension zum tragfähigen Spülversatzkörper - Einflußder strukturellen Entwicklung auf die mechanischen und hydraulischen Eigenschaften von Spülversatzmaterial.- FFH Freiberger Forschungshefte, A 855, Freiberg, 2000, 53 - 68.

/807/ Rauche, H. & Schwandt, A. (1987): Zur internen Struktur von Trennflächen unter besonderer Berücksichtigung ihrer Genese.- Kali-Steinsalz-Spat 11 (1987), 249 - 257.

/808/ Rauche, H. & Schwandt, A. (1988): Zum Bewegungsnachweis im Zechsteinsalinar.- Mitt. Ges. Geol. Wiss. DDR, 16 (1988), 2/3, 33 - 34.

/809/ Rauche, H. & Sitz, P. (2001): Spülversatz im Salzbergbau.- Technische Universität Bergakademie Freiberg.- FFH Freiberger Forschungshefte, A 855, Freiberg, 2001, 160 Seiten.

/810/ Rauche, H. & Ullrich, B. (1988): Rasterelektonenmikroskopische Studien an seismogenen Bruchflächen im Carnallitit.- Mitt. Ges. Geol. Wiss. DDR, 16 (1988), 4, 16 - 18.

/811/ Rauche, H., Schwalm, V., Bodenstein, J. & Bartl, H. (2005): Der Weg durch unsere Zeit - The path through our time: 50 Jahre KALI-INGENIEURBÜRO Erfurt - Ein halbes Jahrhundert innovatives Engineering im Dienste der Mineralsalz-Industrie. Veröffentlichung im Rahmen des Festsymposiums aus Anlass des 50 jährigen Gründungsjubiläums des KALI-INGENIEURBÜRO Erfurt. ERCOSPLAN Group of Companies, Erfurt, September 2005, 54 Seiten.

/812/ Rauche, H., Bodenstein, J. & Rauche, H. (2001): Bergbaufolgelandschaft Südharz-Unstrut-Kalirevier –GIS orientierte Datenbasis zur Dokumentation von Bergbaufolgen.- In: Rauche H. (Hrsg.): Regionale und Angewandte Geologie in der Grenzregion der Süddeutschen und der Mitteldeutschen Scholle - Exkurs.f. u. Veröffentl. GGW, 214, Berlin, 2001, 49 - 51.

/813/ Rauche, H., Fulda, D. & Schwalm, V. (2001): Tailings and disposal brine reduction - Design criteria for potash production in the 21st century.- In: Proceedings Eighth International Conference on Tailings and Mine Waste '01, Fort Collins, Colorado, January 16 - 19, 2001. A. A. Balkema, Rotterdam, 2001, 85 - 91.

/814/ Rauche, H., Thoma, H. & Hartmann, O. (2001): Aspekte der Langzeitsicherheit bei der Nachnutzung und Stilllegung von Kali- und Steinsalzbergwerken.- In: Rauche, H., Thoma H. & Hartmann, O. (Hrsg.): Aspekte der Langzeitsicherheit bei der Nachnutzung und Stilllegung von Kali- und Steinsalzbergwerken - Exkurs.f. u. Veröffentl. GGW, 211, Berlin, 2001, 4-1 – 4-5.

/815/ Rauche, H., van der Klauw, S., Teichert, T., Kaufmann, J., Jockel, A., Neubert, J. & Rauche, H. (2012): Solution Mining versus Conventional Mining - What is Best for a Greenfield Potash Project?.- Proceedings Spring 2012 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, Regina, Saskatchewan, April 22 - 23, 2012, 36p.

/816/ RBKE (2008): Кодекс Республики Белару сьонедрах: 14.07. 2008, №406-3.- предоставлен http://pravo.belnovosti.by/kodeksy/3380-kodeks-o-nedrah.html [Электронныйресурс], 2015. [Kodex der Republik Belarus über das Erdinnere: 14.07.2008, Nr. 406-3.- http://pravo.belnovosti.by/kodeksy/3380-kodeks-o-nedrah.html [digital], 2015].

/817/ RBKWALD (2000): Лесной кодекс Республики Беларусь:14.07.2000, №420-3.- предоставлен http://pravo.levonevsky.org/kodeksby/lk/ [Электронныйресурс], 2015. [Waldkodex der Republik Belarus: 14.07.2000, Nr. 420-3.-http://pravo.levonevsky.org/kodeksby/lk/ [digital], 2015].

/818/ RBKWASSER (1998): Водныйкодекс Республики Беларусь: 15.07.1998, №191-3.- предоставлен http://kodeks.by/vodnyj-kodeks-respubliki-belarus/ [Электронныйресурс], 2015. [Wasserkodex der Republik Belarus: 15.07.1998, Nr. 191-3.- http://kodeks.by/vodnyj-kodeks-respubliki-belarus/ [digital], 2015].

/819/ RBRÜG (2007): Об обращении сотходами: Закон Республики Беларусь, 20.07.2007, №271-3 (ред. от08.07.2008).- предоставлен http://www.technopark.by/files/hidro/law-raw-rb.pdf [Электронныйресурс], 2015, 20 стр. [Über den Umgang mit Rückständen: Gesetz der Republik Belarus vom 20.07.2007, Nr. 271-3 (Red. vom 08.07.2008).- http://www.technopark.by/files/hidro/law-raw-rb.pdf [digital], 2015, 20 S.].

/820/ RBUG (1992): Об охранеокружающей среды: Закон Республики Беларусь, 26.11.1992, №2143-XII(ред. от17.07.2002).- предоставлен http://www.pravo.by/world_of_law/text.asp?RN=V19201982 [Электронныйресурс], 2015. [Über den Umweltschutz: Gesetz der Republik Belarus vom 26.11.1992, Nr. 2143-XII (Red. vom 17.07.2002).- http://www.pravo.by/world_of_law/text.asp?RN=V19201982 [digital], 2015].

/821/ Reed, H. E. (1962): Salt Deposits of the Williston Basin - United States Portion.- In: Bersticker, A. C. (Hrsg.): AAPG Bull 51 (1962), 10 , 1929 - 1947.

/822/ Reid, K. W. (1984): Water Use in Saskatchewan's Potash Industry and Opportunities for Water Recycling/Conservation.- Revue Canadienne des Ressources en Eau 9 (1984), 1, 21 - 26.

/823/ Reid, K. W. & Getzlaf, M. N. (2004): Decommissioning planning for Saskatchewan's potash mines.- In: Proceedings British Columbia Mine Reclamation Symposium 2004.

/824/ Reid, K. W. & Klein, M. O. (1994a): Environmental Aspects in Mining and Production of KCl.- In: Hodge, C. A. & Popovici, N. N. (Hrsg.): Pollution Control in Fertilizer Production, Marcel Dekker, New York, 20. Mai 1994, 343 - 359.

/825/ Reid, K. W. & Klein, M. O. (1994b): Long-Term Solid Waste Management and KCl Facilities Decommissioning.- In: Hodge, C. A. & Popovici, N. N. (Hrsg.): Pollution Control in Fertilizer Production, Marcel Dekker, New York, 20. Mai 1994, 361 - 366.

/826/ Reid, K. W. & Maki, G. A. (1991): Innovative waste management practices at PCS Inc., Rocanville Division.- KALI' 91: Second International Potash Technology Conference, Hamburg, 26 - 29 May 1991.

/827/ Reinshagen, K. & Voss, K. H. (1988): Errichtung und Betrieb von Blasversatzanlagen.- Glückauf-Betriebsführer, 34, Verlag Glückauf Essen, 1988.

/828/ Reitermayer, E. & Karschin, A. (2013): Die Produktion von Magnesiummetall im Kaliwerk Wintershall in Heringen (Werra) - Eine historische Betrachtung.- Kali und Steinsalz, 2013, 14 - 27.

/829/ RESCAN (2008): BHP Billiton Jansen Project Proposal.- Rescan Environmental Services Ltd., November 2008, 239p.

/830/ REUTERS (2013a): Russia fiercely rebukes Belarus for detaining potash boss, 26. August 2013 (Online: http://www.reuters.com/article/2013/08/26/us-russia-uralkali-idUSBRE97P0EB20130826?feedType=nl&feedName=usbeforethebell).- Abrufdatum: 30. Juli 2013.

/831/ REUTERS (2013b): Russia-Belarus potash dispute ignites diplomatic row, 27. August 2013 (Online: http://www.reuters.com/article/2013/08/27/us-russia-belarus-uralkali-idUSBRE97Q0AB20130827).- Abrufdatum: 17. Mai 2015.

/832/ RFAG (1995): Об акционерных обществах: ЗаконРосс. Федерации, 26.12.1995г., №208-ФЗ(ред. от29.12.2012г.).- предоставлен www.consultant.ru, [Электронныйресурс], 2012, 93 стр. [Über Aktiengesellschaften: Gesetz der Russ. Föderation vom 26.12.1995 Nr. 208-ФЗ (Red. vom 29.12.2012).- Konsultant Plus, www.consultant.ru, [digital], 2013, 93 S.].

/833/ RFKWALD (2006): Лесной кодекс Российской Федерации: 04.12.2006, № 200-ФЗ(ред. от21.07.2014, сизм. идоп., вступ. всилус01.03.2015)- предоставленКонсультантПлюс, www.consultant.ru, [Электронныйресурс], 2015. [Waldkodex der Russ. Föderation vom 04.12.2014, Nr. 200-ФЗ (Red. vom 21.07.2014).- Konsultant Plus, www.consultant.ru, [digital], 2015].

/834/ RFKWASSER (2006): ВодныйкодексРоссийскойФедерации: 03.06.2006, №74-ФЗ(ред. от31.12.2014).- предоставленКонсультантПлюс, www.consultant.ru, [Электронныйресурс], 2015. [Wasserkodex der Russ. Föderation vom 03.06.2006, Nr. 74-ФЗ (Red. vom 31.12.2014).- Konsultant Plus, www.consultant.ru, [digital], 2015].

/835/ RFRG (1995): О недрах: Закон Росс. Федерации, от 21.02.1992, № 2395-1 (ред. от 31.12.2014).- предоставлен Консультант Плюс, www.consultant.ru, [Электронный ресурс], 2015. [Über Ressourcen: Gesetz der Russ. Föderation vom 21.02.1992 Nr. 2395-1 (Red. vom 31.12.2014).- Konsultant Plus, www.consultant.ru, [digital], 2015].

/836/ RFRÜG (1998): Оботходахпроизводстваипотребления: ЗаконРосс. Федерации, 24.06.1998, №89-ФЗ(ред. от29.12.2014, сизм. идоп., вступ. всилус01.02.2015).- предоставленКонсультантПлюс, www.consultant.ru, [Электронныйресурс], 2015. [Über die Rückstände von Produktion und Konsum: Gesetz der Russ. Föderation vom 24.06.1998, Nr. 89-ФЗ (Red. vom 29.12.2014).- Konsultant Plus, www.consultant.ru, [digital], 2015].

/837/ RFUG (2002): ОБ ОХРАНЕОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ: ЗаконРосс. Федерации, 10.01.2002, №7-ФЗ(ред. от24.11.2014, сизм. от29.12.2014 сизм. идоп., вступ. всилус01.01.2015).- предоставленКонсультантПлюс, www.consultant.ru, [Электронныйресурс], 2015. [Über den Umweltschutz: Gesetz der Russ. Föderation vom 10.01.2002 Nr. 7-ФЗ (Red. vom 24.11.2014).- Konsultant Plus, www.consultant.ru, [digital], 2015].

/838/ RIANOVOSTI (2013): Interpol Denies Issuing Red Notice for Russian Billionaire Kerimov (Online: http://en.rian.ru/world/20130911/183364892/Interpol-Denies-Issuing-Red-Notice-for-Russian-Billionaire-Kerimov.html).- Abrufdatum: 30. Juli 2013.

/839/ Richter-Bernburg, G. (1953): Über salinare Sedimentation.- Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, 1953, 593 - 645.

/840/ Rieder, W. (2007): 400 Jahre Salinenort Bad Ebensee, 1607-2007. Bd. 2: 1898 bis zur Gegenwart. Verein Immaterielles Kulturerbe Salzkammergut (Hrsg.).- Bad Ischl - Gmunden 2007, 228 Seiten.

/841/ Riesche, P. (2004): Die Kaliindustrie in der Region Hannover. Versuch einer Jahrhundertbilanz.- In: Materialien zur Regionalgeschichte, Band III, Verlag für Regionalgeschichte, Bielefeld 2004, 327 Seiten.

/842/ Rieschel, H. & Zech, K. (1981): Comparison of various test methods for the quality control of potash granulate.- Phosphorus and Potassium, 1981, 33 - 39.

/843/ Roberts, D. R. (2001): Closed-Circuit Mechanized Cut-and-Fill Mining at PCS New Brunswick Division.- In: Hustrulid, W. A. & Bullock, R.L. (2001): Underground Mining Methods - Engineering Fundamentals and International Case Studies.- SME Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Littleton, Colorado, 2001, 149 - 153.

/844/ Roberts, S. M. & Spencer, R. J. (1995): Paleotemperatures preserved in fluid inclusion in halite.- Geochimica et Cosmochimica Acta 59 (1995), 19, 3929 - 3942.

/845/ Rodatz, G. (1913): Die Frage des Spülversatzes für Kaliwerke. Dissertation an der Technischen Hochschule Aachen 1913, 43 Seiten.

/846/ Roedder, E. (1984): Fluid inclusions.- Reviews in Mineralogy 1984, 12, 644p.

/847/ Roedder, E. & Skinner, B. J. (1968): Experimental evidence that fluid inclusions do not leak.- Economic Geology, 63 (1968), 715 - 730.

/848/ Rogers, J. & Schulman, J. H. (1957): Mechanism of the selective flotation of sobuble salts in saturated solutions.- In: Proceedings Second International Congress of Surface Activity, Butterworths, II, London, 1957, 330 - 338. Pneumatische Flotation Imhoflot für die Kali und Salz GmbH.- Aufbereit.-Tech., 42(1), 45.

/849/ Rohlfing, I. (1986): Versatzverfahren im deutschen Metallerzbergbau.- Erzmetall 39 (1986), 541 - 546.

/850/ Rokahr, R. B. & Staudtmeister, K. (1983): Creep Rupture Criteria for Rock Salt.- In: Proceedings Sixth Symposium on Salt, Toronto, Mai 1983, 455 - 462.

/851/ Rothenburg, L., Carvalho, A. L. P. & Dusseault, M. B. (2007): Performance of a mining panel over tachyhydrite in Taquari-Vassouras potash mine.- Conference on the mechanical behavior of salt; understanding the THMC processes in salt 6th, Conference on the mechanical behavior of salt; understanding the THMC processes in salt.- Francis, London, 305 - 314.

/852/ Roulston, B. V. (1995): Canada‘s Zero Effluent Potash Mine.- In: Proceedings 29th Forum On The Geology Of Industrial Minerals, 1995, 7p.

/853/ Roveri, M., Lugli, S., Manzi, V. & Schreiber, B. C. (2008): The Messinian Sicilian stratigraphy revisited: new insights for the Messinian salinity crisis.- Terra Nova 20 (2008), 483 - 488.

/854/ RPK (2007): Pilotprojekt Werra Salzabwasser, Endbericht, Projektdurchführung.- REGIERUNGSPRÄSIDIUM KASSEL, Dezernat 31.1, Bad Hersfeld, 126 Seiten.

/855/ RTGWW (2009): Anmerkungen der Leitung des Runden Tisches „Gewässerschutz Werra/Weser und Kaliproduktion“: zu „Der Stand der Technik in der Kali-Industrie - Auswertung der Anrainerkonferenzen in Witzenhausen, Gerstungen und Bremen“ - vorgelegt von Dr. Walter Hölzel am 08. Mai 2009.- Juli 2009, 7 Seiten.

/856/ RTGWW (2010): Empfehlungen, Gewässerschutz Werra/Weser und Kaliproduktion. Hrsg (v. S. d. P.) Leitung Runder Tisch Prof. Dr. Hans Brinckmann, Kassel, 09. Feburar 2010, 90 Seiten.

/857/ RTGWW (2012): Protokoll der 20. Sitzung des Runden Tisches. Runder Tisch „Gewässerschutz Werra/Weser und Kaliproduktion“. Leitung: Prof. Dr. Hans Brinckmann, Protokoll Dr. Christoph Ewen, Kongress Palais Kassel, 18. September 2012, 12 Seiten.

/858/ RTGWW (2013a): Protokoll der AG-Sitzung des Runden Tisches: Expertengespräch über technische Verminderungspotenziale für Salzabwasser. Runder Tisch „Gewässerschutz Werra/Weser und Kaliproduktion“. Leitung: Prof. Dr. Hans Brinckmann, Prof. Dr. Dietrich Borchardt, Protokoll Dr. Sandra Richter, Kassel, 06. Juni 2013, 21 Seiten.

/859/ RTGWW (2013b): Protokoll der 22. Sitzung des Runden Tisches. Runder Tisch „Gewässerschutz Werra/Weser und Kaliproduktion“. Leitung: Prof. Dr. Hans Brinckmann, Protokoll Dr. Christoph Ewen, Stadthalle Beverungen, 24. September 2013, 14 Seiten.

/860/ RTGWW (2014a): Protokoll der 23. Sitzung des Runden Tisches. Runder Tisch „Gewässerschutz Werra/Weser und Kaliproduktion“. Leitung: Prof. Dr. Hans Brinckmann, Protokoll Dr. Christoph Ewen, Heringen, Bürgerhalle, 21. Januar 2014, 12 Seiten.

/861/ RTGWW (2014b): Abwasserfreie Kaliproduktion - Realität oder Utopie?- Kommentare. Zusammenstellung der Kommentare, die im Rahmen des internen Internet-Forums im Februar 2014 von den Mitgliedern des Runden Tischs abgegeben wurden. Dokumente zur 24. Sitzung des Runden Tisches, Stadtpalais Kassel, 15. September 2014, 14 Seiten.

/862/ RTGWW (2014c): Protokoll der 24. Sitzung des Runden Tisches. Runder Tisch „Gewässerschutz Werra/Weser und Kaliproduktion“. Leitung: Prof. Dr. Hans Brinckmann, Protokoll Dr. Christoph Ewen, Kongress-Palais Kassel, 15. September 2014, 13 Seiten.

/863/ RUDGORMASH (2015): Bildmaterial mit freundlicher Genehmigung zur Verfügung gestellt von Mining Machinery Holding Company - MMHC RUDGORMASH, Woronesch, Russische Föderation.

/864/ Rug, H. & Kahle, K. (1990): Tailoring potash to suit the application.- Phosphorus and Potassium, 1990, 23 - 27.

/865/ Ruhmannseder, J. (1955): Senkungsbeobachtungen an Höhenfestpunkten über dem Abbaufeld des VEB Kaliwerk Karl Liebknecht in Bleicherode.- Neue Bergbautechnik 1955, 88 - 93.

/866/ Rüsberg, E. (1955): Gewinnung von Kalidüngesalzen aus Kalirohsalzen durch Flotation.- Chemie Ingenieur Technik 27 (1955), 1, 1 - 4.

/867/ Russel, A. C. (2011): Flotation Technologies Focus on Higher Efficiency, Faster Analysis.- E&MJ - Engineering and Mining Journal 2011, 48 - 50.

/868/ Ryan, K. (2012): Solution Mining with Non-halites at Moab, Utah, USA.- In: SMRI Spring 2012 Technical Class „Solution Mining in Presence of Non-Halite Salts - Basics and Case Histories“, Regina, Saskatchewan, April 22, 2012, 143 - 157.

/869/ SAABC (2015): 4. Kalimandscharo-Lauf. Sachsen-Anhalt ABC, 05. Mai 2015 (Online: http://www.sachsen-anhalt-abc.de/veranstaltungen/0/1603489/2015/06/14/4.-kalimandscharo-lauf.html).- Abrufdatum: 05. Mai 2015.

/870/ Saberian, A. (1981): Potash Dissolution.- In: Proceedings Spring 1981 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, March 1981, 96p.

/871/ Saberian, A. (2003): Simulation of Potash Production by Selective Leaching of a Flooded Mine.- In: Proceedings Spring 2003 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, April 2003, 7p.

/872/ Salzer, K. (1991): Fortschritte bei der Gasgehaltsbestimmung im Anstehenden und beim CO2 - Nachweis in der Grubenatmosphäre.- Neue Bergbautechnik 21 (1991), 5, 188 - 192.

/873/ Salzer, K., Konietzky, H. & Günther, R.-M. (1999): A new Creep Law to describe the transient and secondary Creep Phase.- In: Proceedings 4th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering NUMGE98, Udine, 14 - 16 October 1998. Springer-Verlag, Wien, 1999, 788p.

/874/ Savich, I. N. (1983): Савич, И. Н. (1983): Разработка технологии закладки выработанного пространства соляными породами при эксплуатации калийных и боросолевых месторождений.- Автореферат дис. канд. тех. наук, ИПКОН РАН, Москва, 1983. [Erarbeitung der Versatztechnologie der abgebauten Hohlräume der Kali- und Bor-Salzlagerstätten durch Rohsalz.- Autorreferat der Kandidatur-Dissertation, Institut der Probleme der komplexen Forschung des Erdinneren der russ. Akademie der Wissenschaften, Moskau, 1983].

/875/ Scharf, H. J. (1990): Environmental Aspects of K-Fertilizers in Production, Handling and Application.- Development of K-Fertilizer Recommendations.- In: Proceedings 22nd Colloquium of the International Potash Institute held at Soligorsk USSR 1990, International Potash Institute, Worblaufen-Bern 1990, 395 - 402.

/876/ Scheer, T. (2000): Untersuchungen zur Nutzbarkeit aufbereiteter Salzschlacke der Sekundäraluminium-Industrie als Rekultivierungsmaterial einer Kali-Rückstandshalde.- Dissertation an der Universität Gesamthochschule Kassel, Fachgebiet Landschaftsökologie und Naturschutz am Fachbereich Landwirtschaft, Internationale Agrarentwicklung und Ökologische Umweltsicherung, Kassel, 14. November 2000, 185 Seiten.

/877/ Scheer, T. (2001): Rekultivierung von Rückstandshalden der Kaliindustrie - 4 –Untersuchungen zur Nutzbarkeit aufbereiteter Salzschlacke der Sekundäraluminium-Industrie als Rekultivierungsmaterial einer Kali-Rückstandshalde.- Ökologie und Umweltsicherung 20/2001, Universität – Gesamthochschule Kassel; Fachbereich Landwirtschaft, Internationale Agrarentwicklung und Ökologische Umweltsicherung.

/878/ Schernewski, G. & Anders, S. (2014): Der Weltkalimarkt.- Kali und Steinsalz, 2014, 6 - 11.

/879/ Scherzberg, H. (2003): Fünf Jahrzehnte Kaliforschung in Sondershausen.- In: Bartl, H.; Döring, G., Hartung, K., Schilder, C. & Slotta, R. (Hrsg.): Kali im Südharz-Unstrut-Revier.- Band 1, Selbstverlag des Deutschen Bergbau-Museums Bochum, Sondershausen, 2003, 315 - 331.

/880/ Schilder, C. (2003): Die Entwicklung der Grubenbetriebe.- In: Bartl, H., Döring, G., Hartung, K., Schilder, C. & Slotta, R. (Hrsg.): Kali im Südharz-Unstrut-Revier.- Band 1, Selbstverlag des Deutschen Bergbau-Museums Bochum, Sondershausen, 2003, 131 - 218.

/881/ Schink, A. & Versteyl, A. (2012): KrWG - Kommentare zum Kreislaufwirtschaftsgesetz. Lexxion Verlagsgesellschaft mbH Berlin, 2012, 1157 Seiten.

/882/ Schlotzhauer, M. & Jacob, T. (2005): Spülversatz im Grubenbetrieb Unterbreizbach des Werkes Werra der K+S KALI GmbH.- Kali und Steinsalz, 2005, 34 - 38.

/883/ Schmeisky, H. (1997): Möglichkeiten zur Rekultivierung von Rückstandshalden der Kali-Industrie.- In: Arndt, U., Böcker R. & Kohler, A. (Hrsg.): Abbau von Bodenschätzen und Wiederherstellung der Landschaft, Verlag G. Heimbach, Hohenheim, 1997, 119 – 131.

/884/ Schmeisky, H. & Hofmann, H. (2000): Rekultivierung von Rückstandshalden der Kaliindustrie - 3 – Untersuchung zum Salzaustrag, zur Sukzession sowie Maßnahmen und Erkenntnisse zur Begrünung.- Ökologie und Umweltsicherung 19/2000, Universität – Gesamthochschule Kassel; Fachbereich Landwirtschaft, Internationale Agrarentwicklung und Ökologische Umweltsicherung.

/885/ Schmeisky, H. & Lenz, O. (1998): Zur Begrünung von Rückstandshalden der Kaliindustrie - Ergebnisse einer 25jährigen Forschungsarbeit.- Glückauf mit Kali und Steinsalz, 1993, 501 - 515.

/886/ Schmeisky, H., Kunick, M. & Lenz, O. (1993): Zur Begrünung von Rückstandshalden der Kaliindustrie.- Kali und Steinsalz, 1993, 132 - 152.

/887/ Schmid, M. (1951): Technologie der Steinsalzaufbereitung und Siedesalzerzeugung.- 1. Auflage, Verlag von Wilhelm Knapp Verlag. Berg- und Aufbereitungstechnik, Band II, Abschnitt IV 6, Halle (Saale), 1951, 216 Seiten, 169 Abbildungen.

/888/ Schmidt, H.-J. (2003): Die territoriale und soziale Bedeutung des Kalibergbaus von 1890 bis 1990.- In: Bartl, H.; Döring, G., Hartung, K., Schilder, C. & Slotta, R. (Hrsg.): Kali im Südharz-Unstrut-Revier.- Band 1, Selbstverlag des Deutschen Bergbau-Museums Bochum, Sondershausen, 2003, 377 – 338.

/889/ Schmidt, J. H. & Hirsch, K. (2012): How Can We Save Energy in MVR Processes?.- In: Abstracts & Lectures, Anniversary Symposium Potash Fertilizer Production in the 21st Century - 60 Years of Potash Engineering Made in Erfurt - 20 Years of ERCOSPLAN Group of Companies; Erfurt, 09. November 2012, 44 - 47.

/890/ Schmidt, W. (1944): Zur Versatzfrage im Kalibergbau.- Kali, verwandte Salze und Erdöl 38 (1944), 8, 135 - 138.

/891/ Schönrock, E. (2009): Aus Salzberg wird Naturberg. Heimatspiegel. Heimatbund Niedersachsen e.V., 07. Mai 2009, 4 Seiten.

/892/ Schrader, O. (1919): Abbauversuchen. Zum Rückbbau von Gebirgsfesten.– Preußische Zeitschrift für das Berg-, Hütten- u. Salinenwesen 67 (1919), Seite 297.

/893/ Schreiber, B. C. & Hsü, K. J. (1980): Evaporites.- In: Hobson, G. D. (Hrsg.): Developments in Petroleum Geology 2 (1980), 87 - 138.

/894/ Schreiber, H. (1997): Behandlung der früher aufgehaldeten Salzrückstände der MDPA, Vermeidung der Grundwasserversalzung.- Interner Bericht.- MDPA, Unternehmensleitung, Mulhouse, 1997, 12 Seiten.

/895/ Schröder, M., Rest, T. & Stahl, I. (2002): Online-RFA zur Produktionsüberwachung.- Kali und Steinsalz, 2002, 6 - 9.

/896/ Schroth, H. E. (1973a): Waste disposal in the German potash industry.- Phosphorus and Potassium, 1973, 38 - 46.

/897/ Schroth, H. E. (1973b): Die Beseitigung der Abfallstoffe der Kaliindustrie in der BRD.- Kali und Steinsalz, 1973, 157 - 164.

/898/ Schroth, H. E. (1990): Die Errichtung einer Großhalde unter umweltschützenden Bedingungen.-Kali und Steinsalz, 1990, 147 - 154.

/899/ Schubert, H. (1964): Vergleich des Flotationsverhaltens von Sylvin, Steinsalz und Quarz mit n-Alkylaminen.- FFH Freiberger Forschungshefte, A 326, Leipzig 1964, 77 - 90.

/900/ Schubert, H. (1974): Entwicklungstendenzen auf dem Gebiete der Salzflotationstechnik - Teil II: Verbesserung und Weiterentwicklung der Flotationsapparate.- Neue Bergbautechnik, 1974, 223 - 228.

/901/ Schubert, H. (1986): Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe.- 3 Bände, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1986.

/902/ Schubert, H. (2008): On the optimization of hydrodynamics in fine particle flotation.- Minerals Engineering 21 (2008), 930 - 936

/903/ Schultz, H., Bauer, G., Hagedorn, F. & Schmittinger P. (2003): Potassium Compounds.- In: Ullmanns Encyclopedia of Industrial Chemistry, Sixth Edition, Electronic Release, Wiley-VCH, Weinheim, 2003.

/904/ Schultz, H., Bauer, G., Schachl, E., Hagedorn, F. & Schmittinger, P. (2000): Potassium Compounds.- In: Ullmann‘s Encyclopedia of Industrial Chemistry.- Wiley-VCH Verlag GmbH.

/905/ Schuster, C., Bellstedt, R. & Schmidt, K. (2010): Flora, Fauna und Entwicklung der Binnensalzstellen im Wartburgkreis.- Schriftenreihe Naturschutz im Wartburgkreis, 16. Landratsamt Wartburgkreis, 2010, 96 Seiten.

/906/ Schütze, S. (2000): Der Spülversatz Unterbreizbach - Nutzung von Kuppenhohlräumen für Fabrikrückstände.- Kali und Steinsalz, 2000, 443 - 448.

/907/ Schwalm, V. (2003): Die Kalihalden im Südharz-Unstrut-Revier.- In: Bartl, H., Döring, G., Hartung, K., Schilder, C. & Slotta, R. (Hrsg.): Kali im Südharz-Unstrut-Revier. Band 2.- Selbstverlag des Deutschen Bergbau-Museums Bochum, Bochum, 2003, 885 - 901.

/908/ Schwandt, A. (1978): Zusammenhänge zwischen Geologie und Zuflüssen von Salzlösungen und Wässern in Kali- und Steinsalzgrubenfeldern des Saale- Unstrut- und Nordharz-Kaligebietes.- Jb. Geologie 9/10 (1978), 175 - 260.

/909/ Schwandt, A. (1993): Salzlösungs- und Wasservorkommen im Salz- und Kupferschieferbergbau am Bernburger Hauptsattel und im Sangershäuser Revier.- GSF-Forschungszentrum f. Umwelt und Gesundheit, Neuherberg, Oberschleißheim, 1993, 232 Seiten.

/910/ Schwandt, A. & Seifert, G. (1999): Natürliche und gelenkte Flutung von Salzbergwerken in Mitteldeutschland.- Exkurs. f. Veröfftl. GGW, 205, Berlin, 61 - 72.

/911/ Schwandt, A., Schilder, C., Rauche, H. & Franzke, H. J. (1991): Hauptanhydritszenario am Beispiel der NE-Flanke des Staßfurter Sattels.- Forschungsbericht 22/91 des GSF-Institutes für Umwelt und Gesundheit, Institut für Tieflagerung, Braunschweig, 1991, 104 Seiten.

/912/ SEAA (1980) Saskatchewan Environmental Assessment Act, being Chapter E-10.1 of the Statutes of Saskatchewan 1979-80 (effective August 25, 1980) as amended by the Statutes of Saskatchewan, 1983 c.77; 1988-89 c.42 and c.55; 1996 c.F-19.1; 2002, c.C-11.1; 2010, c.11; and 2013, c.27.

/913/ SEC (2012): Form 10-K, Commission File Number 1-10351, United States Securities and Exchange Commission.

/914/ Seifert, F. (1953): Werdegang und Bedeutung der Kaliabwässerkommission für das Gebiet der Werra und Fulda.- Kali und Steinsalz, 1953, 5 - 12

/915/ SEMPA (2002) Saskatchewan Environmental Management and Protection Act, being Chapter E-10.21 of the Statutes of Saskatchewan, 2002 (effective October 1, 2002) as amended by the Statutes of Saskatchewan, 2003, c.29; 2004, c.L-16.1; 2005, c.S-35.03; 2007, c.13; 2013, c.27 and c.32; and 2014, c.E-13.1.

/916/ Serata, S. (1965): Continuum Theory and Model of Rock Salt Structures.- in: Proceedings Second Symposium on Salt, Cleveland, Ohio, May 03 - 05, 1965, 1 - 17.

/917/ Serata, S. (1967): Application of Continuum Mechanics to Design of Deep Potash Mines in Canada.- International Journal of Rock Mechanics and Mining Science 5 (1967), 293 - 314.

/918/ Serata, S. (1969): Prerequisites for Application of Finite Element- Method to Solution Cavities and Conventional Mines.- In: Proceedings Third Symposium on Salt, Cleveland, Ohio, April 21 -24, 1969, 249 - 279.

/919/ Serata, S. (1971): The Applications of Fracturing Technology to Potash; the Influence of Rock Mechanics on the Prediction and Prevention of Subsidence.- In: Proceedings Fall 1971 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, Atlanta, Georhia, December 1971, 24 - 27.

/920/ Serata, S. (1982): Long-term deterioration of overburden formations above solution caverns and mine openings.- In: Proceedings Fall Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, October 1982, Albuquerque, New Mexico, 28p.

/921/ Serata, S. & Schultz, W. G. (1972): Application of Stress Control in Deep Potash Mines.- Mining Congress Journal 58 (1972), 11, 36 - 42.

/922/ Serowy, F. (1952): Verarbeitungsmethoden der Kalirohsalze. Einführung und Überblick. 1. Auflage, Verlag Wilhelm Knapp, Halle (Saale), 1952, 61 Abbildungen.

/923/ Sethuram, C. G. (2012): Marine chemicals from brine at Rann of Kutch in India. (Die Gewinnung meerwassertypischer Salze aus Sole im „Rann of Kutch"in Indien).- In: K-UTEC (Hrsg.): 20 Jahre K-UTEC - Festkolloquium „Neue Kaliressourcen - eine Herausforderung". Sondershausen, 2012.

/924/ Sevastiyanov, O. M. & Zakharov, E. E. (2011) Севастьянов, О. М. & Захарова, Е. Е. (2011): подземное захоронение жидких производственных отходов нефтегазовой отрасли России.- Нефтегазовая геология_10. Т.6.- No.1, Оренбург, 2011. [Sevastiyanov, O.M. & Zakharov, E.E. (2011): Subsurface Disposal Of Liquid Industrial Wastes Of The Oil And Gas Industry Of Russia.- Oil and gaz geology. Theory and practice.- T.6.- N 1, Orenburg, 2011.].

/925/ Shea, F. S. (1969): Salt Basins in Nova Scotia.- In: Salt Symposium Collection of SMRI Solution Mining Research Institute, Spring Symposium, Cleveland, Ohio, April 1969, 306 - 316.

/926/ Sheldrick, W. F. (1985): World Potassium Reserves.- In: Mundson, R. D. (ed.) Potassium in Agriculture, Proceedings of an international symposium Atlanta, Georgia, 07. - 10. Juli 1985, 29 - 48.

/927/ Shock, D. A. & Davis, J. G. (1969): Solution Mining Test Site-Carlsbad Basin, New Mexico.- In: Salt Symposium Collection of SMRI Solution Mining Research Institute, Spring Symposium, Cleveland, Ohio, April 1969, 433 - 438.

/928/ SHSWR (1989) Saskatchewan Hazardous Substances and Waste Dangerous Goods Regulations, being Chapter E-10.2 Reg 3 (effective April 1, 1989) as amended by Saskatchewan Regulations 25/92, 107/92, 28/94, 3/95 and 63/2000.

/929/ Shuai, K. (1992): Characteristics of the Potash Deposits in Western Yunnan, China.- In: Salt Symposium Collection of SMRI Solution Mining Research Institute, Proceedings Seventh Symposium on Salt, Kyoto, April 1992, 205 - 210.

/930/ Siefert, B., Büchel, G. & Lebküchner-Neugebauer, J. (2006): Kalirückstandshalde Sollstedt (Thüringen): Untersuchungen zur Ausbreitung der Haldenlösung im Rötkarst.- Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie 11 (2006), 2, 99 - 110.

/931/ Siemann, M. G. & Ellendorff, B. (2001): The composition of gases in fluid inclusions of late Permian (Zechstein) marine evaporites in Northern Germany.- Chemical Geology 173 (2001), 31 - 44.

/932/ Sievers, J. (1972): Senkung der Abbauverluste im Werrakalibergbau durch Einführung neuer Abbauverfahren aufgrund der Untersuchungen der gebirgsmechanischen Einflussfaktoren. Anl.-Bd., TextBd. (1973).- Bergakademie Freiberg, 19. Juli 1972, 92/165 Seiten.

/933/ Singewald, A. (1980a): Elektrostatik - neue umweltfreundliche Aufbereitung von Kalium- und Magnesiumrohstoffen.- Erzmetall 33 (1980), 1, 19 - 27.

/934/ Singewald, A. (1980b): Umweltfreundliche Aufbereitung von Kalium- und Magnesiumsalzen.- Kali und Steinsalz, 1980, 2 - 8.

/935/ Singewald, A. (1983): Die Weser und die Aufbereitung von Salzmineralen.- Die Weser 57 (1983), 5/6, 130 - 137.

/936/ Singewald, A. (1990a): Die Weser und die Aufbereitung von Salzmineralen.- Die Weser 64 (1990), 1, 37 - 44.

/937/ Singewald, A. (1990b): Sortieren von Mineralsalzen nach spezifischen Eigenschaften.- Chemie Ingenieur Technik 62 (1990), 3, 191 - 196.

/938/ Singewald, A. (1991): Kalisalze und deren Aufbereitung.- Glückauf 127 (1991), 388 - 388.

/939/ Singewald, A. & Fricke, G. (1966): Patentschrift DE Pat. 1 249 783.- Wintershall Aktiengesellschaft, 1966.

/940/ Singewald, A. & Fricke, G. (1967): Patentschrift DE Pat. 1 667 814.- Wintershall Aktiengesellschaft, 1968.

/941/ Singewald, A. & Fricke, G. (1968): Patentschrift DE Pat. 1 792 120.- Kali und Salz Aktiengesellschaft, 1968.

/942/ Singewald, A. & Fricke, G. (1969): Patentschrift DE Pat. 1 953 534.- Kali und Salz Aktiengesellschaft, 1969.

/943/ Singewald, A. & Fricke, G. (1981): Minerale im Hochspannungsfeld.- Umschau 81(1981), 272 - 275.

/944/ Singewald, A. & Fricke, G. (1983): Die elektrostatische Aufbereitung von Kali-Rohsalzen.- Chemie Ingenieur Technik 55 (1983), 1, 39 - 45.

/945/ Sitz, P. & Rauche, H. (2003): Erfahrungen und Fortschritte bei der Stilllegung von Salzbergwerken - Nutzbar für die Endlagerung? - Unveröff. Vortrag anläßlich des Clausthaler Kolloquiums zur Endlagerung 2003, Clausthal, 2003.

/946/ Sivokon', E. P. (1966): Сивоконь, Е. П. (1966): Исследование влияния закладки на устойчивость междукамерных целиков на калийных рудниках.- Дис. канд. тех. наук, ЛГИ, Ленинград, 1966. 184 стр. [Untersuchung der Einwirkung des Versatzes auf die Stabilität der Zwischenpfeiler in den Kalibergwerken.- Kandidatur-Dissertation, Leningrader Bergbauinstitut, Leningrad, 1980, 184 S.].

/947/ Sivokon', E. P. & Garkushin, P. K. (1970): Сивоконь, Е. П. & Гаркушин, П. К. (1970): Снижение потерь при добыче калийных солей системами с твердеющей закладкой.- Серия „Развитие калийной промышленности", Вып.1, ВНИИГ, Ленинград, 1970, 46 стр. [Senkung der Verluste beim Abbau mit härtendem Versatz.- Reihe „Entwicklung der Kaliindustrie", Ausgabe 1, VNIIG, Leningrag, 1970, 46 S.].

/948/ Sjaardema, G. D. & Krieg, R. D. (1987): A Constitutive Model for the Consolidation of Crushed Salt and Its Use in Analyses of Backfilled Shaft and Drift Configurations.- SAND87-1977, prepared by Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, 1987, 72 pages.

/949/ Skowronek, F., Fritsche, J., Aragon, U. & Rambow, D. (1999): Die Versenkung und Ausbreitung von Salzabwasser im Untergrund des Werra-Kaligebietes.- Geologische Abhandlungen Hessen, 105, 83 Seiten.

/950/ Skvirski, L. I., Chistyakov, A. A. & Kozel, Z. L. (1991): Production of non-dusting and non-caking potash fertilizers.- Proceedings Kali '91 - Second International Potash Technology Conference. Hamburg, 26 - 29 May 1991.

/951/ Slotta, R. (1980): Die Kali- und Steinsalzindustrie.- In: Deutsches Bergbaumuseum Bochum (Hrsg.): Technische Denkmäler in der Bundesrepublik Deutschland.- Deutsches Bergbaumuseum Bochum, Veröffentlichung Nr. 17, 1980, 780 Seiten.

/952/ Slotta, R. (2003): Die Werksanlagen des Reviers im Überblick.- In: Bartl, H.; Döring, G., Hartung, K., Schilder, C. & Slotta, R. (Hrsg.): Kali im Südharz-Unstrut-Revier.- Band 2, Selbstverlag des Deutschen Bergbau-Museums Bochum, Sondershausen, 2003, 769 - 819.

/953/ SMA (2015): SASKATCHEWAN MINING ASSOCIATION, Interactive Map about the mining industry in Saskatchewan (Online: http://www.saskmining.ca/map/Map/map.html#top).- Abrufdatum: 21. Januar 2015.

/954/ SMIEPR (1996) Saskatchewan Mineral Industry Environmental Protection Regulations, repealed by chapter 10.2 Reg 7 (effective March 6, 1996, formerly chapter E-10.2 Reg 5.

/955/ SMIEPR (1996): Saskatchewan Mineral Industry Environmental Protection Regulations, being Chapter E-10.2 Reg 7 (effective March 6, 1996).

/956/ SMRMR (1986) Saskatchewan Municipal Refuse Management Regulations, being chapter E-10.2 Reg 4 (effective June 26, 1986).

/957/ Sommer, T. & Hartung, W.-D. (2012): Geogene und anthropogene Salzeinträge in Flüsse Nordthüringens (Südharz). Anthropogene Ursachen und Möglichkeiten der Minderung des Eintrages.- Vortrag, Jahrestagung DGL, Session S 17, 27. September 2012, Koblenz, 22 Seiten.

/958/ Sönksen, H. (1990): Einsatzerfahrungen und Entwicklungsrichtungen bei Fahrladern im Kalibergbau der flachen Lagerung.- Kali und Steinsalz, 1990, 299 - 308.

/959/ Sonnenfeld, P. (1984): Brines and Evaporites.- Geoscience Canada 6 (1990), 2, 83 - 90.

/960/ Sonnenfeld, P. (1991): Evaporite Basin Analysis.- In: Force, E. R., Eidel, J. J., Maynard, J. B., & Society of Economic Geologists USA (Hrsg..): Sedimentary and diagenetic mineral deposits: A basin analysis approach to exploration.- Chelsea, MI, Society of Economic Geologists, 1991, 159 - 169.

/961/ Sonnenfeld, P. (1992): Primary Marine Evaporite Fades.- In: Proceedings Seventh Symposium on Salt, Kyoto, 06. - 09. April 1992, 211 - 218.

/962/ Sonnenfeld, P. (2000): The evolution of marine evaporite deposition.- In: Proceedings Eight Symposium on Salt, The Hague, The Netherlands, May 07 - 11, 2000.

/963/ Spachtholz, F. X. (2011): Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz im Kali- und Steinsalzbergbau.- Kali und Steinsalz, 2011, 15 - 21.

/964/ Spackeler, G. (1927): Vom Wesen des Abbaus und des Versatzes.- Glückauf 17 (1927), 593 - 603.

/965/ Spackeler, G. (1950): Lehrbuch des Kali- und Steinsalzbergbaues.- Berg- und Aufbereitungstechnik, Band II, Abschnitt 9 B, Halle (Saale), 1950, 448 Seiten, 172 Abbildungen.

/966/ Spackeler, G. (1957): Lehrbuch des Kali- und Steinsalzbergbaues.- Berg- und Aufbereitungstechnik, Band II, Abschnitt 9 B. 2. Auflage (Originalausgabe 1950), Wilhelm Knapp Verlag, Halle (Saale), 1957, 598 Seiten.

/967/ SQM (2011): Annual Report 2011.- Sociedad Quimica y Minera, Santiago de Chile, 2011.

/968/ SRK (2011): A Mineral's Expert Report on the Mineral Resource and Ore Reserves of Sylvinit's Mining Assets.- SRK Consulting: Armitage, M., Fox, N., Miles, J. Gilchrist, Ch., McKelvey & P. Watt, Cardiff, March 2011, 99p.

/969/ SRU (2008): Umweltgutachten 2008 – Umweltschutz im Zeichen des Klimawandels, 56, Berlin, 2008, 596 Seiten.

/970/ STADT SONDERSHAUSEN (2015): Die Geschichte der Gewerkschaft "Glück auf" Sondershausen (1893 bis 1926) (Online: http://www.sondershausen.de/de/wirtschaftsgeschichte.html).- Abrufdatum: 15.06.2015.

/971/ Städtler, G. (2001): Hydraulische Verfahren zur untertägigen Verwertung bergbaufremder Abfälle im Salzbergbau.- Kali und Steinsalz, 2001, 443 - 447.

/972/ Stahl, I. (1996): 75 Jahre Kaliforschung.- Kali und Steinsalz, 1996, 1, 4 - 17.

/973/ Stahl, I., Beer, W. B., Wambach-Sommerhoff, K.-R. & Keidel, R. (2005): Produkte der Kaliindustrie.- In: : Winnacker/ Küchler (Hrsg.): Chemische Technik - Prozesse und Produkte, Band 8 - Ernährung, Gesundheit, Konsumgüter, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KG, 2005, Weinheim, 117 Seiten.

/974/ Stäubert, A. (1990): Spannungssondierungen mittels Hydraulic facturing zur geomechanischen Überwachung des Kaliberbaus im Südharz-Kaligebiet der DDR.- Neue Bergbautechnik 20 (1990), 9, 335 - 339.

/975/ Stäubert, A. (1997): Geotechnische insitu-Messungen und Untersuchungen zur Wirksamkeit von Spülversatz aus Fabrikrückstand, GVV mbH, Bergwerk Sollstedt –Totaler Pfeilerrückbau Strecke 70. Kali-Umwelttechnik GmbH, Sondershausen, 09. November 1997.

/976/ Stead, D., Eberhardt, E. & Szczepanik, Z. (2000): Brittle rock fracture and progressive damage in potash.- In: Proceedings Eight Symposium on Salt, The Hague, The Netherlands, May 07 - 11, 2000, 337 - 342.

/977/ Steiner, N. (2014): Nutzung heimischer Rohstoffe: Anforderungen an zukünftige Rahmenbedingungen.- Kali und Steinsalz, 2014, 14 - 23.

/978/ Stenvold, J. (2012): Yara Goes into Potash: Properties, Projects and Production Targets.- In: Abstracts & Lectures, Anniversary Symposium Potash Fertilizer Production in the 21st Century - 60 Years of Potash Engineering Made in Erfurt - 20 Years of ERCOSPLAN Group of Companies; Erfurt, 09 November 2012, 34 - 35.

/979/ Sternberg, A. (1904): Das Spülversatzverfahren nach dem Stande der gegenwärtigen Technik.- in drei Teilen.- Glückauf, Jahrgang 40, Nr. 41, 1300 - 1305; Nr. 42, 1321 - 1331; Nr. 43, 1349 - 1355.

/980/ Stöcke, K. (1943): Grundbegriffe zur Beurteilung der Festigkeitsfragen von Gebirgsschichten.- Kali, verwandte Salze und Erdöl - Zeitschrift für Kali-, Steinsalz- und Erdölindustrie sowie Salinenwesen, Ausgabe 3, 41 - 46.

/981/ Stolle, E. (1958): Zum Problem der Laugenversenkung in der Kaliindustrie.- Neue Hütte 3 (1958), 2, 72 - 78.

/982/ Stolle, E. (1961): Zur Faziesdifferenzierung im Südharz-Kalirevier.- Berichte der Geologischen Gesellschaft, 1961, 266 - 287.

/983/ Storck, U. (1968): First Use of the Double Steel and Concrete Sandwich Lining for Keeping High-Pressure Water out of a Potash Shaft.- CIM Bulletin 61 (1968), 679, 1305 - 1312.

/984/ Storrar, J. (1965): Corrosion in Potash Solutions.- In: Proceedings Second Symposium on Salt, Cleveland, Ohio, May 03 - 05, 1965, 397 - 405.

/985/ Strathdee, G. G. (1989): Backstowing of Salt Tailings as a potash mine site decommissioning option.- Presented at the Saskatchewan Mining Association Potash Section Environmental Workshop, May 29 - 31,1989, 29p.

/986/ Strathdee, G. G. (1992): Waste management practice in Saskatchewan.- Phosphorus and Potassium 1992), 27 - 35.

/987/ Strathdee, G. G. (1994): Potash production in Saskatchewan.-Phosphorus and Potassium 1994, 19 - 25.

/988/ Strathdee, G. G., Haryett, C. R., Douglas, C. A., Senior, M. V. & Mitchell, J. (1982): The Processing of Potash Ore by PCS.- Presented to the XIVth International Mineral Processing Congress, Toronto, October 17 - 23, 1982, 21p.

/989/ Streckdenfinger, M. (1992): Französischer Kalisalzbergbau und Umweltprobleme - Lösungsansätze zu ihrer Bewältigung.- Neue Bergbautechnik 22 (1992), 456 - 460.

/990/ Strube, M. (1993): Die Verringerung der thüringischen Salzbelastung.- Mitteilungen des DVWK Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., 24, „Salz in Werra und Weser“, Hennef, 1993, 144 - 154.

/991/ Strube, M. (2000): Maßnahmen zum Ausgleich der Salzlast - Salzlaststeuerung.- In: ARGE Weser Fachtagung Salz in Werra und Weser Maßnahmen, Folgen, Zukunft. Kassel, 2000, 30 - 37.

/992/ Sun, D. & Lock, D. E. (1990): Origins of Potash Deposits in the Qaidam Basin.- Science in China, Ser. B 33 (1990), 2, 198 - 210.

/993/ Sveinson, S. (1999): Characterisation of Tailings for Paste Backfill System Design.- Master thesis in applied science, Department of Mining and Mineral Process Engineering, University of British Columbia, 234p.

/994/ Swanson & Boler (1995): The Magnitude 5.3 Seismic Event and Collapse of the Solvay Trona Mine: Analysis of Pillar/Floor Failure Stability.- U.S. Department of the Interior Bureau of Mines, 1995.

/995/ SWR (2002) Saskatchewan Water Regulations, being chapter E-10.21 reg 1 (effective December 5, 2002) as amended by Saskatchewan Regulations 15/2007.

/996/ SYMONDS (2001): A Study on the Costs of improving the Management of Mining Waste, Report to DG Environment, European Commission. Symonds Group Ltd., East Grinstead, West Sussex, October 2001, 57p.

/997/ Tallin, J. E., Pufahl, D. E. (1983): Waste Management Schemes of Potash Mines in Saskatchewan.- In: McKerchew, R.M. (ed.): PotashTechnology: Proceeding 1st lnternational Potash Technology Conference, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, October 03 - 05, 1983, Pergamon Press, Toronto, 755 - 760

/998/ Tallin, J. E., Pufahl, D. E. & Barbour, S. L. (1990): Waste management schemes of potash mines in Saskatchewan.- Canadian Journal of Civil Engineering 17 (1990), 4, 528 - 542.

/999/ Tang, W., Liu, G. & Gu, Z. (1998): The current situation and outlook for the production of phosphate rock, pyrite and potash.- Autumn Meeting International Fertilizer Industry Association Production and International Trade Committee, Amman, Jordanien, 18. - 19. Oktober, 1998.

/1000/ Tarasov, B. G., Garkushin, P. K. & Globa, V. M. (1987): Тарасов, Б. Г., Гаркушин, П. К. & Глоба, В. М. (1987): Комплексное освоение калийных месторождений Предкарпатья.- Вища школа, Львов, 1987, 128 стр. [Komplexe Erschließung der Kalilagerstätten der Vorkarpaten.- Verlag Hochschule, Lvov, 1987, 128 S.].

/1001/ Taylor, N., Merriam, J., Gendzwill, D. & Prugger, A. (2001): The mining machine as a seismic source for in-seam seismic reflection mapping.- In: Proceedings 71st Annual Meeting Society of Exploration Geophysicists - SEG, San Antonio, Texas, 4p.

/1002/ TCA (2006): The Companies Act - Annual Returns Regulations.- (Online: http://www.legislation.gov.uk/uksi/2011/1487/contents/made).- Abrufdatum: 10. April 2015.

/1003/ TCBC (2010): Saskatchewan in the Spotlight: Acquisition of Potash Corporation of Saskatchewan Inc.- Risks and Opportunities.- Final Report presented to Government of Saskatchewan.- THE CONFERENCE BOARD OF CANADA, October 01, 2010, 77p.

/1004/ Theile, K. (1996): Entwicklung der Salzlaststeuerung als Folge der Oberflächenversalzung durch Abwässer aus dem Kali- und Kupferschieferbergbau.- In: Meinicke, K. P. & Ebersbbach, W. (Hrsg.): Umweltgeschichte in Mitteldeutschland.- Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 1996, 125 - 137.

/1005/ Thiele, J. C. (2014): Ausbildung mittels virtueller Realität bei K+S.- Kali und Steinsalz, 2014, 24 - 37.

/1006/ Thoma, H., Seifert, G. & Kühn, F. (2000): Examples of the development of sinkholes above flooding or flooded salt mines in central Germany and ways of remote detection of areas with a potential risk of fall.- In: Proceedings Fall 2000 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, San Antonio, Texas, October 15 - 18, 2000, 163 - 184.

/1007/ Thoma, K. & Knoll, P. (1980): Neue Erkenntnisse bei der Beherrschung der Gebirgsschlaggefahr im Bergbau der DDR.- Neue Bergbautechnik 10 (1980), 1, 195 - 203.

/1008/ Thuro, K. & Pillinger, R. (1998): Geologisch-geotechnische Grenzfälle beim Einsatz von Teilschnittmaschinen.- Felsbau 16 (1998), 5, 358 - 366.

/1009/ TIFAC (2002): Recovery of Potassium Fertiliser Salts from Sea Bittern. Technology Information, Forecasting and Assessment Council (Online: http://tifac.org.in/index.php?option=com_content&view=article&id=733&Itemid=205).- Abrufdatum 23. Januar 2015.

/1010/ Timofeeff, M. N., Blackburn, W. H. & Lowenstein, T. K. (2000): ESEM-EDS: An improved technique for major element chemical analysis of fluid inclusions.- Chemical Geology 164 (2000), 3, 171 - 182.

/1011/ Timofeeff, M. N., Lowenstein, T. K., Brennan, S. T., Demicco, R. V., Zimmermann, H., Horita, J. & Borstel, L.E. V. (2001): Evaluating seawater chemistry from fluid inclusions in halite: Examples from modern marine and nonmarine environments.- Geochimica et Cosmochimica Acta 65 (2001), 14, 2293 - 2300.

/1012/ Tippin, R. B. (1977): Potash flotation method handles variable feed.- Chem. Eng. (N. Y.) 184 (1977), 15-1, 73 - 75.

/1013/ Titkov, S. (2004): Flotation of water-soluble mineral resources.- Int. J. Miner. Process. 74 (2004), 107 - 113.

/1014/ Titkov, S. N., Sabirov, R. H., Panteleeva, N. N. & Kololeev, N. V. (1997): Production of carnallite by flotation.- XX International Mineral Processing Congress, Aachen, September 1997.

/1015/ Titkov, S. N., Solov'ev, E. I. & Mamedov, A. L. (1982): Титков, С.Н., Мамедов А.И. & Соловьев Е.И. (1982): Обогащение калийных руд.- Издательство Недра, Москва, 1982 [Concentration of Potash Ores.- Nedra, Moscow, 1982].

/1016/ TJP (2014): Israel Chemicals to close magnesium factory, fire 550 workers, 28. August 2015, The Jerusalem Post (Online: http://www.jpost.com/landedpages/printarticle.aspx?id=372652).- Abrufdatum: 17. Mai 2015.

/1017/ TLUG (2006): Fachstandpunkte der TLUG. Grundwasserüberwachung in Thüringen.- In: Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (Hrsg.): Fachstandpunkte der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, 9, 2006, Jena, März 2006, 15 Seiten.

/1018/ TLUG (2009): Umweltbilanz Thüringen 1989 – 2009.- Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, Jena 2009, 167 Seiten.

/1019/ TLUG (2013): Handlungsempfehlung - Anforderungen an die bei der Profilierung und Rekultivierung Thüringer Kalihalden zum Einsatz kommenden Abfälle (Stand: 08.01.2013 bzw. Stand: 17.05.2013), Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, Jena, 08. Januar 2013, 16 Seiten.

/1020/ TMLNU (2002): Richtlinie für die Abdeckung und Begrünung von Kalihalden im Freistaat Thüringen – Kali-Haldenrichtlinie – vom 18. April 2002. Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt - Thüringen (TMLNU). Veröffentlicht im Thüringer Staatsanzeiger Nr. 19/2002, S. 1539 ff.

/1021/ TMLNU (2005a): Modellkopplung. „Erstellung eines Management-Tools zur Wasserbewirtschaftung unter den Bedingungen bergbaubedingter salinarer Einträge der oberen und mittleren Unstrut". BMBF-Projekt „Flussgebietsmanagement Unstrut".- Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt, Erfurt, 22. November 2005, 18 Seiten.

/1022/ TMLNU (2005b): Simulation des Durchflusses und des Stofftransportes in Wipper und Unstrut bei Berücksichtigung salinarer Einträge und anthropogener Steuerungen. Ergebnisse im Teilprojekt 2. BMBF-Projekt „Flussgebietsmanagement Unstrut".- Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt, Erfurt, 22. November 2005, 25 Seiten.

/1023/ TMLNU (2008): Abfallbilanz 2008.- Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt, Erfurt 2008, 100 Seiten.

/1024/ Torokhtin, M. D., Chonka, Y. V. & Lemko, I. S. (1998): Торохтин, М.Д., Чонка, Я.В. & Лемко, И.С. (1998) Спелеотерапия заболеваний органов дыхания в условиях микроклимата соляных шахт.- Ужгород, 1998, 287 стр. [Speläotherepie der Erkrankungen der Atmungsorgane in den Bedingungen des Mikroklimats der Salzgruben.- Uzhgorod, 1998, 287 S.].

/1025/ Trautvetter, D. & Kottmeyer, J. (2001): Rekultivierung von Kalihalden zur Gefahrenabwehr.- Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall 48 (2001), 10, 1457 - 1461.

/1026/ TRIDENT S.A. (2015): Trident S.A. Index (Online: http://tridentsa.co.za/index.html).- Abrufdatum: 10. Februar 2015.

/1027/ TUG (2004): Transparenzrichtlinie-Umsetzungsgesetz. Richtlinie 2004/109/EG zur Harmonisierung der Transparenzanforderungen in Bezug auf Informationen über Emittenten, deren Wertpapiere zum Handel auf einem geregelten Markt zugelassen sind, und zur Änderung der Richtlinie 2001/34/EG, 15. Dezember 2004, Amtsblatt der Europäischen Union, L 390/38 vom 31. Dezember 2004.

/1028/ Turko, M. R., Shakhnazarov, A. A., Vishnyak, A. A. & Miskov, E. M. (2010): Турко, М.Р., Шахназаров, А. А., Вишняк, Б. А., Миськов, Е. М. (2010): Основные тенденции создания технологических схем переработки сильвинитовых руд на современном вэтапе. В: Группа предприятий ЗУМК(изд.): Рудник будущего. Научно-технический журнал, Пермь, специальныйвыпуск№4, 2010, стр. 90 - 98. [Turko, M. R., Shakhnazarov, A. A., Vishnyak, A. A. & Miskov, E. M. (2010): Moderne Grundtendenzen der Entwicklung von Verfahrensschemata für Sylvinit.- In: Unternehmensgruppe ZUMK (Hrsg.): Bergwerk der Zukunft, Perm, Spezialausgabe Nr. 4, 2010, 90 - 98].

/1029/ Turko, M. R., Vishnyak, B. A., Rogov, Y. V. & Sivtsov, K. V. (2010): Турко, М. Р., Вишняк, Б. А., Рогов, Ю.В., Сивцов, К.В. (2010): Исследования обогатимости калийных руд месторождения „Сатимола“ иразработк апредварительнойтехнологическойсхемыихобогащения. В: Группа предприятий ЗУМК (изд.): Рудник будущего. Научно-технический журнал, Пермь, специальный выпуск №4, 2010, стр. 104 - 112. [Turko, M. R., Vishnyak, B. A., Regov, Y. V. & Sivtsov, K. V. (2010): Untersuchungen der Aufbereitungseigenschaften von Kalisalzen der Satimola-Lagerstätte und Erarbeitung eines vorläufigen Verfahrensschemas.- In: Unternehmensgruppe ZUMK (Hrsg.): Bergwerk der Zukunft, Perm, Spezialausgabe Nr. 4, 2010, 104 - 112].

/1030/ Turrentine, J. W. (1943): Potash in North America, Reinhold Publishing Corporation, New York, 1943.

/1031/ UAG (2002): Umweltauditgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 4. September 2002 (BGBl. I S. 3490), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 43 des Gesetzes vom 7. August 2013 (BGBl. I S. 3154) geändert worden ist.

/1032/ UBA (2014): Versalzung von Werra und Weser. Beseitigung der Abwässer aus der Kaliproduktion mittels „Eindampfungslösung“. Stellungnahme Oktober 2014, Dessau-Roßlau, 2014, 9 Seiten.

/1033/ Uhlenbecker, F. W. (1968): Verformungsmessungen in der Grube und ergänzende Laboruntersuchungen auf dem Kaliwerk Hattorf (Werra-Revier) im Hinblick auf eine optimale Festlegung des Abbauverlustes bei größtmöglicher Sicherheit der Grubenbaue.- Dissertation, Technische Hochschule Clausthal, 1968, 180 Seiten.

/1034/ Uhlenbecker, F. W. (1969): Markscheiderische Verformungsmessungen in der Grube des Kaliwerkes Hattorf zur Überwachung der Standfestigkeit der Grubenbaue.- 11. Ländertreffen des Internationalen Büros für Gebirgsmechanik, Leipzig, November 1969, 149 - 162.

/1035/ Uhlenbecker, F. W. (1971): Gebirgsmechanische Untersuchungen auf dem Kaliwerk Hattorf (Werra- Revier).- Kali und Steinsalz, 1971, 345 - 359.

/1036/ Uhlenbecker, F. W. (1978): Neue Forschungsergebnisse in der Gebirgsmechanik im Hinblick auf den Abbau von carnallitischen Kaliflözen.- In: Proceedings Fifth International Symposium on Salt, Hamburg, 29. Mai - 01. Juni 1978, 413 - 422.

/1037/ Uhlenbecker, F. W. (1980): Neuere Forschungsergebnisse in der Gebirgsmechanik im Hinblick auf den Abbau von carnallitischen Kaliflözen.- In: Proceedings 5th Symposium on Salt, Vol. I, 1980, 413 - 422.

/1038/ Ullrich, B., Rauche, H. & Strausz, C. (1988): Einsatzmöglichkeiten der TESLA-Rasterelektronenmikroskope für geowissenschaftliche Fragen.- Mitt. Ges. Geol. Wiss. DDR, 16 (1988), 2/3, 65 - 66.

/1039/ UN (1987): UNITED NATIONS - Our Common Future - The Brundtland Report.- Report to the United Nations World Commission on Environment and Development.- Forty-second session General Assembly, 04. August 1987.

/1040/ UN (2011): UNITED NATIONS - Part I, National Sustainable Development Policy, Barbados, June 08, 2011, 25p.

/1041/ UN (2012): UNITED NATIONS - The future we want, 66/288, Resolution adopted by the General Assembly, Rio+20, Sixty-sixth Session, Agenda item 19, September 11, 2012, 53p.

/1042/ UNEP & IFA (2001): Environmental Aspects of Phosphate and Potash Mining.- Joint Report: United Nations Environment Programme and International Fertilizer Industry Association, Paris 2001, 89p.

/1043/ UNIDO (1998): Potash Fertilizers.- In: United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) and International Fertilizer Development Center (IFDC) (1998): Fertilizer Manual.- Kluwer Academic Publishers, Muscle Shoals, Alabama, 1998, 416 - 431.

/1044/ URALKALI (2009): Verfahren zur Beseitigung der Halden der Kaliwerke.- Patentschrift RF Nr. 2355887, 20.05.2009, Autoren: Krainev, B.A., Dyakov, S.P., Shumakher, A.I. & Belkin, V.V., Antragsteller OAO URALKALI, 2009. [OAO „Уралкалий" (2009): Способ ликвидации солеотвалов на калийных рудниках : патент РФ2355887, 20.05.2009, авторы Крайнев, Б.А., Дьяков, С.П., Шумахер, А.И. & Белкин, В.В, заявитель ОАО „Уралкалий", 2009].

/1045/ URALKALI (2011a): Application for Admission to Listing on the Official List and to Trading on the London Stock Exchange of Global Depositary Receipts.- Berezniki, 16. Juni 2011, 599p.

/1046/ URALKALI (2011b): Nourishing the world. Sustainability: Our Agenda. Sustainable Development Report 2011, URALKALI, Berezniki, 2011, 64p.

/1047/ URALKALI (2011c): URALKALI (Online: http://www.uralkali.com/development/gri/cos/#tab4575).- Abrufdatum: 15. Oktober 2011.

/1048/ URALKALI (2013a): Uralkali Board Meeting Decisions. News 30.07.2013 (Online: http://www.uralkali.com/press_center/company_news/item300713/).- Abrufdatum: 30. Juli 2013.

/1049/ URALKALI (2013b): Uralkali concludes option agreement within 2013 contract deliveries to China. News 30.07.2013 (Online: http://www.uralkali.com/press_center/company_news/item3007 131/).- Abrufdatum: 30. Juli 2013.

/1050/ URALKALI (2013c): History (Online: http://www.uralkali.com/about/history/).- Abrufdatum: 18. August 2013.

/1051/ URALKALI (2014): Uralkali Announcement, 18.11.2014, News (Online: http://www.uralkali.com/press_center/company_news/item19755/).- Abrufdatum: 18. November 2014.

/1052/ Usdowski, E. & Dietzel, M. (1998): Atlas and Data of Solid-Solution Equilibria of Marine Evaporites. Springer-Verlag, Berlin, 1998.

/1053/ USGS (2011): 2009 Minerals Yearbook. Canada. U.S. Geological Survey, September 2011, 21p.

/1054/ USGS (2015): Mineral Commodity Summaries 2015. Reston, Virginia, 2015, 199p

/1055/ UVP-V Bergbau (2010): Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben vom 13. Juli 1990 (BGBI. I S. 1420), die zuletzt durch Artikel 8 der Verordnung vom 3. September 2010 (BGBI. I S. 1261) geändert worden ist.

/1056/ Valjashko, M. G. (1961): Валяшко, М. Г. (1961): Геохимия галогенеза.- В кн.: Тр. ученых геол.фак. МГУ, Москва, 1961, стр. 211 - 223. [Geochemie der Halokinese.- Sb. Tr. Geol. Fakut. Moskau, Verlag der Moskauer Universität (russ), Moskau, 1961, S. 211 - 223].

/1057/ Valjashko, M. G. (1962): Валяшко, М. Г. (1962): Геохимические закономерности формирования месторождений калийных солей.- МГУ, Москва,1962, 397 стр. [Geochemische Gesetzmäßigkeiten der Entstehung der Kalisalzlagerstätten.- Verlag der Moskauer Universität (russ.), Moskau, 1962, 397 S.].

/1058/ Van der Klauw, S. & Grüschow, N. (2007): Carnallitite Solution Mining Proposed for MagMi-nerals' Kouilou Potash Project in the Republic of Congo.- In: Proceedings Fall 2007 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, Halifax, Nova Scotia, October 08 - 09, 2007, 139 - 153.

/1059/ Van Sambeek, L. L. (1992): Testing and modeling of backfill used in salt and potash mines.- In: Kaiser, P. K. & McCreath, D. R. (Hrsg..): Rock Support in Mining and Underground Construction. Balkema, Rotterdam, 1992, 583 - 589.

/1060/ Van Sambeek, L. L. (1993): The IMC K2 mine flooding.- In: Proceedings Fall 1993 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, Lafayette, Louisiana, October 25 - 26, 1993, 21p.

/1061/ Van Sambeek, L. L. (1995): Surface Subsidence over the IMC K2 Mine.- In: Proceedings Spring 1995 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, New Orleans, Louisiana, May 1995, 8p.

/1062/ Van Sambeek, L. L. (2000): An introduction to subsidence over salt and potash mining facilities.- In: Proceedings Fall 2000 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, San Antonio, Texas, October 15 - 18, 2000, 10p.

/1063/ van Sambeek, L. L., Gowan, S. W. & Payment, K. A. (2000): Loss of the Retsof rock salt mine: Engineering Analysis.- In: Proceedings Eight Symposium on Salt, The Hague, The Netherlands, May 07 - 11, 2000, 411 – 416.

/1064/ VEDOMOSTI (2013): Diversification makes no sense - Vladislav Baumgertner, CEO of Uralkali.- Interview Alexandra Terentyeva / Ведомости, aufgerufen aus dem URALKALI Publications Archive (Online: http://www.uralkali.com/press_center/archive/item4036/).- Abrufdatum: 12. Mai 2015.

/1065/ VEDOMOSTI (2013): This is market recovery – Vladislav Baumgertner, Uralkali CEO.- Interview Alexandra Terentyeva / Ведомости, aufgerufen aus dem URALKALI Publications Archive (Online: http://www.uralkali.com/press_center/archive/item050813/).- Abrufdatum: 12. Mai 2015.

/1066/ Veit, H. (2000): Klima- und Landschaftswandel in der Atacama. Geographische Rundschau 9/2000, 4 - 9.

/1067/ Versteyl, L.-A., Mann, T. & Schomerus, T. (2012): KrWG: Kreislaufwirtschaftsgesetz: Kommentare. 3. Auflage 2012, C. H. Beck, 628 Seiten.

/1068/ Vishnyak, B. A., Polyakov, A. E., Moloshtanova, N. E. & Isayeva, G. A. (2014): Вишняк, Б.А., Поляков, А.Е., Молоштанова, Н.Е., Исаева, Г.А. (2014): Сравнительнаяпородно-технологическаяоценкаобогатимости рудразличныхкалийныхместорождений. В: ГруппапредприятийЗУМК(изд.): Рудникбудущего. Научно-технический журнал, Пермь, специальныйвыпуск№4, 2014, стр. 12 - 20. [Vishnyak, B. A., Polyakov, A. E., Moloshtanova, N. E. & Isayeva, G. A. (2014): Vergleichende Bewertung von gesteinstechnologischen Aufbereitungseigenschaften der Rohsalze verschiedener Kalilagerstäten.- In: Unternehmensgruppe ZUMK (Hrsg.): Bergwerk der Zukunft, Perm, Spezialausgabe Nr. 3 - 4 (19 - 20), 2014, 127 - 140].

/1069/ Vishnyak, B. A., Pozdeev, A. A. & Turko, M. R. (2011): Б.А. Вишняк, А.А. Поздеев, М.Р. Турко(2011): ТехнологияобогащенияиавтоматизацияпроцессовкалийныхФлотационныхФабрик. Издательствоиздательствопермскогонационального исследовательскогополитехническогоуниверситета, стр. 240.[Vishnyak, B. A.; Pozdeev, A. A. & Turko, M. R. (2011): Verfahrenstechnologie und Prozessautomatisierung der Kaliflotationsfabriken. Polytechnische Nationaluniversität Perm, 240 Seiten, 2011].

/1070/ VNIIG (1960): Указания по охране сооружений от вредного влияния подземных горных выработок Верхнекамского калийного месторождения и по охране калийных рудников от затопления.– ВНИИГ, Пермь, 1960, 15 стр. [VNIIG (1960): Instructions for Protection of Surface Construction against damaging Effect of Subsurface Mining in the Upper Kama Potash Deposit and for Protection of Potash Mines against Flooding.– VNIIG, Perm, 1960, 15 p.].

/1071/ VNIIG (1972): Указания по охране сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок Верхнекамского калийного месторождения и по охране калийных рудников от затопления.– ВНИИГ, Москва, 1972, 40 стр. [VNIIG (1972): Instructions for Protection of Surface Construction and Nature against damaging Effect of Subsurface Mining in the Upper Kama Potash Deposit and for Protection of Pot-ash Mines against Flooding.- VNIIG, Moscow, 1972, 40 p.].

/1072/ VNIIG & AGROCHIM (1990): Указания по защите рудников от затопления в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей.- ВНИИГ, Государственная ассоциация «Агрохим», книга 1, г. Ленинград, 1990 [Instructions for Protection of Mines against Flooding at the Upper Kama.- VNIIG, Russian Association "Agrochim", 1 book, Leningrad, 1990].

/1073/ VNIIG, GALURGY, MINING INSTITUTE, URALKALI & SILVINIT (1994): Инструкция по защите рудников от затопления и охране объектов на земной поверхности от вредного влияния подземных горных разработок в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей.- ВНИИГ, Галургия, Горный институт УрО РАН, ПО «Уралкалий», ПО «Сильвинит», г. Санкт-Петербург, книга 1, 1994 г. [Order on Protection of Mines against Flooding and on Protection of Surface Objects against damaging Effect of Subsurface Mining under the Conditions of the Upper Kama Potash Deposit.- VNIIG, Gallurgy, Mining Institute UB of RAS, PO Uralkali, PO Silvinit, Sankt-Petersburg, 1 book, 1994].

/1074/ VNIIG, MINING INSTITUTE, URALKALI & SILVINIT (2004): Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей. (Технологический регламент). – ОАО «ВНИИГ», Горный институт УрО РАН, ОАО «Уралкалий» ОАО «Сильвинит», книга 1, г. Санкт-Петербург, 2004 [Instructions for Protection of Mines against Flooding and for Protection of undermined Surface Objects under the Conditions of the Upper Kama Potash Deposit (Technical Regulations).- OAO VNIIG, Mining Institute UB of RAS, OAO Uralkali, OAO Silvinit, 1 book, Sankt-Petersburg, 2004].

/1075/ VNIIG, MINING INSTITUTE, URALKALI & SILVINIT (2008): Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей. (Технологический регламент). – ОАО «ВНИИГ», Горный институт УрО РАН, ОАО «Уралкалий» ОАО «Сильвинит», книга 1, г. Санкт-Петербург, 2008 [Instructions for Protection of Mines against Flooding and for Protection of undermined Surface Objects under the Conditions of the Upper Kama Potash Deposit (Technical Regulations).- OAO VNIIG, Mining Institute UB of RAS, OAO Uralkali, OAO Silvinit, 1 book, Sankt-Petersburg, 2008].

/1076/ VNIIG, MINISTRY OF MINERAL FERTILIZER PRODUCTION & SOJUSKALI (1984): Указания по охране зданий, сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок и по охране рудников от затопления в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей.- ВНИИГ, Министерство по производству минеральных удобрений, Всесоюзное объединение Союзкалий, книга 1, г. Ленинград, 1984 [Instructions for Protection of Surface Construction and Nature against damaging Effect of Subsurface Mining and for Protection of Mines against Flooding under the Conditions of the Upper Kama Potash Deposit.- VNIIG, Ministry of Mineral Fertilizer Production, Russian Association „Sojuskali“, 1 book, Leningrad, 1984].

/1077/ VOLKSSTIMME (2014a): Lena Wendt und Alina Gladow verkörpern Kater „Karamba“ im neuen Märchenspiel, Volksstimme, 28. Februar 2015 (Online: http://www.volksstimme.de/nachrichten/lokal/wolmirstedt/1234702_Lena-Wendt-und-Alina-Gladow-verkoerpern-Kater-Karamba-im-neuen-Maerchenspiel.html).- Abrufdatum: 05. Mai 2015.

/1078/ VOLKSSTIMME (2014b): Fast 170 Läufer überqueren Zielitzer Kalimandscharo. Volksstimme, 23. Juni 2014 (Online: http://www.volksstimme.de/nachrichten/lokal/wolmirstedt/1298148_Fast-170-Laeufer-ueberqueren-Zielitzer-Kalimandscharo.html).- Abrufdatum: 05. Mai 2015.

/1079/ Vonhof, J. A. (1971): Waste disposal problems near potash mines in Saskatchewan, Canada.- Lecture at General Assembly of International Association of Hydrological Sciences, Symposium Groundwater Pollution, Moscow, August 1971, 191 - 215.

/1080/ Voß, F. (2004): Geogene und anthropogene Gewässerbelastungen im nördlichen Einzugsgebiet der Unstrut: Modellkonzepte zur Salzslaststeuerung - Aspekte der Stofftransportmodellierung im Gerinne -. BMBF - Forschungsprojekt: „Flusseinzugsgebietsmanagement Unstrut“, PIK Potsdam, 2004, 32 Seiten.

/1081/ Voß, F. (2005): Integrierte Modellierung von Durchflussdynamik und salinarer Stofftransportprozesse unter Berücksichtigung anthropogener Steuerungen am Beispiel der Unstrut.- Dissertation an der Universität Potsdam an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät. Potsdam, September 2005, 231 Seiten.

/1082/ Vostretsov, S. P. (2009): Verfahren zum Entwässern an Fundamenten der Rückständensammelstellen.- Patentschrift RF Nr, 2368729, 27.09.2009. Autor Vostretsov, S. P., Antragsteller OAO „Galurgia", 2009 [Вострецов С.П. Способ создания дренажа в основании накопителей отходов : патент РФ № 2368729, 27.09.2009, автор Вострецов, С.П, заявитель АОА „Галургия"].

/1083/ Votjakov, M. V. (2008): Вотяков, М. В. (2008): Повышение эффективности разработки калийных месторождений на основе применения систем разработки с твердеющей закладкой.- Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых, Издательство ИПКОН РАН, Москва, 2008, стр.177 - 178. [Erhöhung der Effizienz der Gewinnung von Kalilagerstätten auf Grundlage der Anwendung der Abbausysteme mit härtendem Versatz.- Probleme der Forschung des Erdinneren aus dem Blickwinkel der Jugend, Verlag vom Institut der Probleme der komplexen Forschung des Erdinneren der russ. Akademie der Wissenschaften, Moskau, 2008, S. 177 - 178].

/1084/ VwVwS (2005): Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Änderung der Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe. 27. Juli 2005.- Bundesanzeiger 57 (2005), 142 a, 40.

/1085/ Wachter, S. (2009): Dreidimensionale, zeitvariante stoffliche Modellierung von granularem Steinsalz.- Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt 2009, 246 Seiten.

/1086/ Wachter, S. & Katzenbach, R. (2009): CAPCREEP - Ein benutzerdefiniertes Stoffmodell zur Untersuchung von Rückstandshalden.- Bauingenieur 84 (2009), 9, 368 - 373.

/1087/ Wachter, S., Katzenbach, R. & Leppla, S. (2010): A visco-plastic constitutive equation for the modelling of tailings heaps consisting of rock salt.- 4th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, Cape Town, September 06 - 08, 2010, 4p.

/1088/ Waldmann, L. & Eichholtz, M. (2014): Plausibilitätsprüfung der Projektidee „Eindampfen von 6,8 Mio. m^3 Salzabwässern / Produktion von Kaliumsulfat".- Vortrag Dr. Ludger Waldmann, Dr. Martin Eichholtz, K+S KALI GMBH, 23. Sitzung des Runden Tisches, Heringen, 21. Januar 2014, 19 Seiten.

/1089/ Walter, H.-H. (2006): Der salzige Jungbrunnen: Geschichte der deutschen Soleheilbäder. Drei Birken Verlag, Freiberg, 324 Seiten, 333 Abbildungen, 1 Landkarte.

/1090/ Walterspiel, O. (1989): Zur Lage der Kaliindustrie.- Kali und Steinsalz, 1989, 168 - 174.

/1091/ Wardlaw, N. C. & Hartzell, W. G. (1963): Geothermometry of halite from the Middle Devonian Prairie evaporite formation, Saskatchewan.- Canadian Mining and Metallurgical Bulletin 56 (1963), 610, Seite 155.

/1092/ Warner, E. M.(1976): A History of American Continuous Miners.- In: Proceedings International Conference on Mining Machinery, Brisbane, 02. - 06. Juli 1976.

/1093/ Warren, J. K. (1999): Evaporites: Their Evolution and Economics.- Blackwell Science Ltd., Oxford, October 1999, 438p.

/1094/ Warren, J. K. (2000): Geological Controls on the Quality of Potash.- In: Proceedings Eight Symposium on Salt, The Hague, The Netherlands, May 07 - 11, 2000, 173 - 180.

/1095/ Warren, J. K. (2009): Evaporites through time: Tectonic, climatic and eustatic controls in marine and nonmarine deposits.- Earth-Science Reviews 98 (2010), 217 - 268.

/1096/ Warren, J. K. (2015): Evaporites: A compendium. Berlin, Springer (ISBN 978-3-319-13511-3), August, 2015, 1600p.

/1097/ Wassmann, T. H. (1978): Mining Subsidence in the East Netherlands.- In: Proceedings Fifth International Symposium on Salt, Hamburg, May 29 - June 01, 1978, 463 - 475.

/1098/ Waugh, D. C. E. & Urquhart, B. R. (1983): The Geology of Denison-Potacan's New Brunswick Potash Deposit.- Proceedings Sixth International Symposium on Salt, Mai 1983, Vol. I, 85 - 98.

/1099/ WBCSD (2000): Eco efficiency, creating more value with less impact. World Business Council for Sustainable Development (Online: http://www.wbcsd.org/web/publications/eco_effiency_creating_more_value.pdf).- Abrufdatum: 15. Oktober 2013.

/1100/ WDDB (2004): Der aktuelle Begriff: Nachhaltigkeit.- Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages, Nr. 06/2004, 06. April 2004.

/1101/ Webb, T. C. (2009): New Brunswick Potash: A review of Developments and Potential Exploration Alternatives.- New Brunswick Department of Natural Resources; Minerals, Policy and Planning Division, Information Circular 2008-4 (CD-ROM); 21p.

/1102/ Webb, T. C. (2010): Geology and economic development of Early Carboniferous marine evaporties, southeastern New Brunswick.- New Brunswick Department of Natural Resources; Lands, Minerals and Petroleum Division, Field Guide No. 6, 71p.

/1103/ Webb, T. C. & Barnett, D. C. (1986): New Brunswick potash: Discovery to production.- CIM Fifth District Meeting, New Brunswick Department of Natural Resources and Energy, Mineral Development Branch, Halifax, Nova Scotia, 47p.

/1104/ Webb, T. C. & Smith, E. A. (2009): Potash. New Brunswick Department of Natural Resources; Minerals, Policy and Planning Division, Mineral Commodity Profile No. 4, 2009, 8p.

/1105/ Weigert, D. (2007): Gewinnungs- und Verwahrungstätigkeiten in ausgewählten Gruben des Werkes Werra der K+S KALI GmbH.- VBGU-Jahreskolloquium „Rohstofferkundung und Versorgungssicherheit in Deutschland", 21. September 2007, 21 Seiten.

/1106/ Weischet, W. (1966): Zur Klimatologie der Nordchilenischen Wüste.- Meteorologische Rundschau, 1966, 1 - 7.

/1107/ Weissenberger, R. (1985): Chronique des mines de potasse d'Alsace.- Association pour la création de la Maison du mineur et de la potasse (Hrsg.), Wittelsheim, 1991, 288p.

/1108/ WELT (2008): Ohne Salz würde der Mensch nicht überleben.- Welt 15. Februar 2008 (Online: http://www.welt.de/wissenschaft/article1677815/Ohne-Salz-wuerde-der-Mensch-nicht-ueberleben.html).- Abrufdatum: 17- Mai 2015.

/1109/ WELT (2011): Wirkung von Sole und Salz wird wiederentdeckt.- Welt 24. Juni 2011(Online: http://www.welt.de/gesundheit/article13443938/Wirkung-von-Sole-und-Salz-wird-wiederentdeckt.html).- Abrufdatum: 17. Mai 2015.

/1110/ WELT (2013): Russischer Kali-Krieg bedroht deutschen Konzern.- Welt 07.08.2013 (Online: http://www.welt.de/wirtschaft/article118759192/Russischer-Kali-Krieg-bedroht-deutschen-Konzern.html).- Abrufdatum: 07. August 2013.

/1111/ Weps, E. (1981): Radiometrische Kaliumbestimmung.- Kali und Steinsalz, 1981, 177 - 183.

/1112/ Werdelmann, J. (2004): Pneumatische Flotation im Bereich der Salzaufbereitung bei K+S.- Kali und Steinsalz, 2004, 16 - 23.

/1113/ Werdelmann, J., Hopf, H., Geisen, T., Symes, A. & Ramey, M. (2012): K+S Legacy Potash Project, The first new potash solution mine in Saskatchewan with an investigative approach for a sustainable future performance optimization.- In: Proceedings Spring 2012 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, Regina, Saskatchewan, April 22 - 23, 2012, 5 - 11.

/1114/ WESER (1979): Ein Beitrag zur Diskussion: Das Projekt einer Salzwasserpipeline Werra / Weser.- Die Weser 53 (1979), 6, 131 - 135.

/1115/ WESER (1988): Signale zum Erfolge - 14 Millionen Tonnen Salz in Werra und Weser - Fortschritte in deutsch-deutschen Verhandlungen.- Die Weser 62 (1988), 7 - 8.

/1116/ WESER (1990): Zehn Jahre Verhandlungen und keine Ergebnisse - eine Chronik.- Die Weser, 64, 1, 4 - 5 [deutsch-deutsche Verhandlungen zur Reduzierung der Salzeinleitung im Hessisch-Thüringischen Werra-Kalirevier].

/1117/ WHG (2009): Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 15. November 2014 (BGBl. I S. 1724) geändert worden ist.

/1118/ Whyatt, J. K. & Varley, F. D. (2008): Catastrophic failure of underground evaporite mines.- In: 27th International Conference on Ground Control in Mining, July 28 - 31, 2008, 10p.

/1119/ Wilkins, M. J., Gilchrist, C., Fehrsen, M. & Cooke, R. (2004): Boulby Mine Backfill System: Design, Commissioning and Operation.- 16th Int. Conf. on Slurry Handling and Pipeline Transport, Hydrotransport, Chile, April 2004, 14p.

/1120/ Wilson, W. P. (1969): Potassium Chloride Crystallization.- In: Third Symposium on Salt, Cleveland, Ohio, April 21 -24, 1969, 20 - 29.

/1121/ Wilson, W. P. (1970): Potassium Chloride Crystallization.- In: Rau, J. L. (Hrsg.): Proceedings Third Symposium on Salt, Vol. II, Cleveland, Ohio, April 22 - 24, 1969. The Northern Ohio Geological Society, Cleveland, Ohio, 1970.

/1122/ Wilson, W. P. & McKee, A. G. (1973): Leaching Potash Ores.- In: Proceedings Fourth Symposium on Salt, Houston, Texas, April 08 - 12, 1973, The Northern Ohio Geological Society, 517 - 525.

/1123/ WINTERSHALL (1953): Fotokatalog des geologischen Sachstandsberichts zum Gebirgsschlag Heringen am 22.2.1953 in der Grube Wintershall“ der Wintershall AG K+S.- Heringen, 1953.

/1124/ WIWO (2013a): K+S kassiert Prognose für 2013, 06.08.2013 (Online: http://www.wiwo.de/unternehmen/industrie/preisverfallbei-kali-ks-kassiert-prognose-fuer-2013/8601694.html).- Abrufdatum: 06. August 2013.

/1125/ WIWO (2013b): BaFin untersucht Kursrutsch bei K+S, 10.08.2013 (Online: http://www.wiwo.de/unternehmen/industrie/verdacht-auf-insiderhandel-bafin-untersucht-kursrutsch-beiks/8618762.html).- Abrufdatum: 10. August 2013.

/1126/ Wöhler, V. (1999): Aufbereitete Aluminium-Salzschlacke als Rekultivierungsmaterial. Untersuchungen zum Stoff- und Wasserhaushalt eines salzhaltigen Rekultivierungsmaterials im Labor und Freiland.- Dissertation an der Universität Gesamthochschule Kassel, Fachgebiet Bodenkunde am Fachbereich Landwirtschaft, Internationale Agrarentwicklung und Ökologische Umweltsicherung, 17. September 1999, 165 Seiten.

/1127/ Wolf, J. H. (1983): Modern Potash Crystallization Technology.- In: McKercher, R. M. (ed.): Proceedings Potash ‘83 - First International Potash Technology Conference, Saskatoon, Sasketchewan, Canada, October 03 - 05, 1983, Canada, Pergamon Press, Toronto.

/1128/ Wolperding, T. (1993): Neuere Entwicklungen von Bohr- und Beraubewagen in den Grubenbetrieb der Kali und Salz AG.- Kali und Steinsalz, 1993, 153 - 160.

/1129/ Wong, D. K. H. (1985): A study of brine flow through saturated-unsaturated potash.- A Thesis submitted to the College of Graduate Studies and Research in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Master of Science in the Department of Civil Engineering University of Saskatchewan, Saskatoon, Dezember 1985, 392p.

/1130/ Wong, D. K. H., Barbour, S. L. & Fredlund, D. G. (1988): Modelling of flow through potash tailings piles.- Can. Geotechn. J. 25 (1988), 292 - 306.

/1131/ WORLD BANK (2013): Red Sea - Dead Sea Water Conveyance Study Program: Chemical Industry Analysis Study: Final Report.- Prepared by Vladimir Zbranek, March 2013, 25p, 2 Enclosures.

/1132/ Wotruba, H. (2004): Kleinbergbau und seine Umweltauswirkungen- von traditionellen Methoden zu angepaßter Technologie.- Geoökologisches Kolloquium, Bayreuther Zentrum für Ökologie und Umweltforschung an der Universität Bayreuth, 25. November 2004.

/1133/ Wroz, W. (1982): Die Salzbelastung von Werra, Weser und Rhein - ein Umweltproblem.- In: Beck, H. (Hrsg.): Umweltschutz im Unterricht, 8, 75 Seiten.

/1134/ Wroz, W. (1983): Die Werra - ein toter Fluß?- In: Hildebrand, E. (Hrsg.): Land an Werra und Meißner - Ein Heimatbuch.- 3. überarb. Auflage, 207 - 210.

/1135/ WRRL (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik.- Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, Brüssel, 22. Dezember 2000.

/1136/ WSJ (2010): Taking a Mound of Salt for What Ails you.- The Wall Street Journal, 11 May 2010, (Online: http://www.wsj.com/articles/SB10001424052748703880304575236282972152968).- Abrufdatum: 17. Mai 2015.

/1137/ WTN (2014): Heringen (Werra)-Widdershausen: Der Berg ruft ... (wieder) - Kaliwerk Werra lädt zum Haldenfest. Werratal-News, 06. Juni 2014 (Online: http://www.werratal-news.de/der_berg_ruft_wieder_kaliwerk_werra_laedt_zum.html).- Abrufdatum: 05. Mai 2015.

/1138/ WTO (1994a): General Agreement on Tariffs and Trade (GATT 1994), Uruguay Round Ag-reement.- World Trade Organization, 1994, 2p.

/1139/ WTO (1994b): Rio Declaration, Principle 12, Uruguay Round Agreement.- World Trade Organization, 1994.

/1140/ WTO (2005): Environment-Related Issues In The Negotiations On WTO Rules, 05-4452, Update by the Rules Division, World Trade Organization, 05. Oktober 2005.

/1141/ WWA (2007): Ergebnisse der Anrainerkonferenz in Witzenhausen. Vortrag 2. Anrainerkonferenz in Gerstungen, 29. November 2007, 10 Seiten.

/1142/ WWA (2009): Der Stand der Technik in der Kali-Industrie. Auswertung der Anrainerkonferenzen in Witzenhausen, Gerstungen und Bremen. Werra-Weser-Anrainerkonferenz e.V., 08. Mai 2009, 35 Seiten.

/1143/ WWA (2010): Das Medienereignis um die K+S Gutachten zur ökologischen Situation der Werra und Weser. Presseecho, Werra-Weser-Anrainerkonferenz e.V., 18. Oktober 2010, 12 Seiten.

/1144/ WWA (2014a): 5. Werra-Weser-Anrainerkonferenz Wilhelmshaven 20. Juni 2014 Werra-Weser-Anrainerkonferenz e.V., 20. Juni 2014, 48 Seiten.

/1145/ WWA (2014b): Rohstoffgewinnung ist sinnvoller als der "Salzpipelinebau" zur Nordsee.- Stellungnahme 16/2311, Stellungnahme der Werra-Weser-Anrainerkonferenz e.V. Landtag Nordrhein-Westfalen 16. Wahlperiode. Antrag der Fraktion der CDU, Drucksache 16/6135 Öffentliche Anhörung des Ausschusses für Klimaschutz, Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 19. November 2014.

/1146/ Yang, C., Jensen, G., & Berenyi, J. (2009): The stratigraphic framework of the potash-rich members of the Middle Devonian upper Prairie Evaporite Formation, Saskatchewan. In: Summary of Investigations 2009, Volume 1, Saskatchewan Geological Survey, Sask. Ministry of Energy and Resources, Misc. Rep. 2009-4.1, CD-ROM, Paper A-4, 28 Seiten.

/1147/ Yang, W. B., Spence, R. J. & Krouse, H. R. (1995): Stable isotopes of lake and fluid inclusion brines, Dabusun Lake, Qaidam Basin, western China: Hydrology and paleoclimatology in arid environments.- In: Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 117 (1995), 279 - 290.

/1148/ Yechieli, Y., Abelson, M., Bein, A., Crouvi, O. & Shtivelman, V. (2006): Sinkhole "swarms" along the Dead Sea coast: reflection of disturbance of lake and adjacent groundwater systems.- In: Geol Soc Am Bull 118 (2006), 1075 - 1087.

/1149/ Young, R. P. (1990): Mining with Salt Backfill at Denison-Potacan: Numerical Modelling, Placement, Testing and Monitoring - A Technology Transfer.- In: Proceedings of Speciality Conference: Stresses in Underground Structures, Venture Inn, Ottawa, 02. - 03. Oktober 1990, 207 - 229.

/1150/ Zahary, G. & Hedley, D. (1981): Review of Rock Mechanics Reserach Needs in Potash Mining. Report MRP/MRL 81-42 for Canada Centre for Mineral and Energy Technology (CANMET), Juli 1981, 31 Seiten.

/1151/ Zandon, V. A. (1985): in Weiss, N. L. (Hrsg.): SME Mineral Processing Handbook, Society of Mining Engineers, New York 1985, Kapitel 22.

/1152/ Zänker, G. (1974): Beziehung zwischen stofflicher und struktureller Entwicklung im Salinargebirge des Südharz-Kalireviers.- In: Z. Geol. Wiss. 1974, 1157 - 1175.

/1153/ Zapp, J., Wittenberg, D. & Wüllenweber, A. (2005): Entwicklungen und Einführung der Ultraschallprüftechnik für eingebaute Spreizhülsenanker im Kali- und Steinsalzbergbau.- Kali und Steinsalz, 2005, 26 - 33.

/1154/ Zhang F., Gen W. & Wang Z. (2001): Studying of salt mineral fluid inclusion at salt evaporite deposits in Lanpin-Simao basin.- In: Mineral Resources and Geology, 2001, 15, 2, 113-115. [张芳,耿文辉,王滋平.兰坪——思茅盆地石盐矿床盐矿物包裹体特征.矿产与地质, 2001, 15, 2, 113-115.]

/1155/ Zhong, C. 鐘長永 (1998): 論宋代卓筒井的卓越成就 (On the Outstanding Achievement of Bamboo-Cable Wells in the Song Dynasty. 鹽業史研究 [Journal of Salt Industry History Research] 1998(3): 3 - 9.

/1156/ Zhong, C. 鐘長永 & Huang, J. 黃健 (1997a): 四川鹽業與三峽庫區的鹽業遺址 (Salt Production in Eastern Sichuan and Salt Production Sites in the Three Gorges Dam Area) 四川文物 [Sichuan Cultural Relics] 1997(2): 3 - 6.

/1157/ Zhong, C. 鐘長永 & Huang, J. 黃健 (1997b): 中國古代鑽井，採氣技術 (Ancient Chinese Drilled Wells and Natural Gas Technology). Zigong, China, Shell Companies.

/1158/ Ziqiang, Q. & Zhiqiang, X. (1983): Borate Minerals in Salt Lake Deposits at Chaidamu Basin, China.- In: Salt Symposium Collection of SMRI Solution Mining Research Institute, Sixth International Symposium on Salt, Toronto, May 1983, 185 - 192.

/1159/ Zwartendyk, J. (1971) Economic aspects of surface subsidence resulting from underground mineral exploitation. PhD thesis, University Park, Pennsylvania, Pennsylvania State University.

BILDNACHWEIS

Soweit im Folgenden nicht anders vermerkt, stammen die im vorliegenden Buch veröffentlichten Fotos vom Autor, respektive aus den Archiven der ERCOSPLAN Unternehmensgruppe. Darüber hinaus wurden auch Fotos Dritter mit deren freundlicher Genehmigung zur Verfügung gestellt, wofür Verlag und Autor namentlich folgenden Unternehmen und Personen herzlich danken:

Airbus Defence and Space, München, Deutschland	Seite 330, 351, 376,
Allgaier Process Technology GmbH, Uhingen, Deutschland	Seite 187
ANDRITZ SEPARATION GmbH, Köln, Deutschland	Seite 157
Deseret News, Fotograf Ravell Call, Salt Lake City, USA	Seite 465 (oben und unten)
Ebner GmbH & Co. KG, Eiterfeld, Deutschland	Seite 163
Flavio de Lima Faria, Belo Horizonte, Brasilien	Seite 459
Fotograf Martin Mraz, Prag, Tschechische Republik	Seite 70a, 113 (a und b)
Fotograf William Keddell, Miami, Florida, USA	Seite 452 (unten)
Fotografin Sue Hutton, Loughborough, Grossbritannien	Seite 427 (oben)
Hartmut Kießling, Gera, Deutschland	Seite 248
Intrepid Potash, Inc., Denver, Colorado, USA	Seite 449, 446, 449
Josef Carrach (ehemaliger Geologe bei Dead Sea Works, Be'er Sheva, Israel)	Seite 143 (b und c), 410 (oben und unten)
K+S KALI GmbH, Kassel, Deutschland	Seite 70d, 125 (a bis f), 223 (3 Bilder), 245, 249, 250, 266b, 280, 393 (3 Bilder), 397 (2 Bilder), 400 (2 Bilder), 403 (2 Bilder)
KSB Aktiengesellschaft, Frankenthal, Deutschland	Seite 169
Maschinenfabrik Köppern GmbH & Co. KG, Hattingen, Deutschland	Seite 192
Rotex Europe Ltd., Köln, Deutschland	Seite 188

Sandvik Mining and Construction Central Europe GmbH, Essen, Deutschland	Seite 114b
Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg, Deutschland	Seite 30
TerraServer.com/Digital Globe, Raleigh, North Carolina, USA	Seite 202, 260 (unten), 304, 307, 310, 313, 315, 318, 324, 327, 333, 336, 339, 346, 347, 354, 357, 359, 364, 367, 370, 373, 379, 390, 391, 392, 396, 399, 402, 408, 409, 412, 413, 414, 415, 419, 426, 432, 438, 444, 445, 448, 451, 452 (oben), 458, 468, 473
PAO URALKALI, Berezniki, Russische Föderation	Seite 70b, 78, 83, 114a, 158 (a und b), 165 (a und b), 193 (a und b), 308 (oben und unten), 316 (oben)
USGS/NASA Landsat Program, Reston, Virginia, USA	Seite 147, 198, 464
ГП ЗУМК [GP ZUMK], A. N. Zemskov, Perm, Russische Föderation	Seite 469 (oben und unten)
ЗАО „Управляющая горная машиностроительная компания РУДГОРМАШ“ [Mining Machinery Holding Company - RUDGORMASH,] Voronezh, Russische Föderation	Seite 121, 122