

Kalibergbau und Aluminium-Recycling in der Region Hannover

Eine Studie über Missstände und Verbesserungspotentiale

Im Auftrag des Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, Kreisverband Hannover



**Gefördert durch
Erträge der
Umweltlotterie**



März 2004

Dr.habil. Ralf E. Krupp
Flachsfeld 5
31303 Burgdorf
(ralf.krupp@freenet.de)

Zusammenfassung

Der Kalibergbau blickt in Deutschland auf eine über 100-jährige Geschichte zurück, in der er nicht nur Wohlstand geschaffen, sondern auch Altlasten und Schäden an der Umwelt hinterlassen hat. Auf Werk Sigmundshall bei Wunstorf-Bokeloh, nordwestlich von Hannover, begann die Kaliförderung im Jahr 1904 und hat heute einen Umfang von rund 3 Millionen Jahrestonnen Rohsalz erreicht. Das Kaliwerk ist schon von weitem an seiner markanten Kalihalde zu erkennen. Seit einigen Jahren wird auf Sigmundshall neben dem Sylvinit des Ronnenbergflözes auch das Hartsalz des Stassfurtflözes gewonnen, hauptsächlich wegen seines hohen Gehaltes an dem Magnesiumsulfat Kieserit. Auch Kalisalze bestehen überwiegend aus Natriumchlorid („Steinsalz“), welches bei der Herstellung von Düngemitteln abgetrennt werden muss. Die anfallenden Rückstände werden bislang zu riesigen Halden aufgetürmt. Von der mittlerweile auf ca. 30 Millionen Tonnen angewachsenen Kalihalde Sigmundshall gehen erhebliche Umweltbelastungen aus, hauptsächlich in Form einer Versalzung des Grundwassers und der Oberflächengewässer, besonders der Leine.

Seit einigen Jahren werden auf Sigmundshall auch Salzschlacken aus dem Aluminiumrecycling nach dem REKAL-Verfahren aufgearbeitet. Dabei wird lediglich das wertvollere Kaliumchlorid extrahiert und anfallendes Ammoniakgas zu Ammoniumsulfat verarbeitet. Die dabei anfallenden Rückstände, die mehr als 80 % ausmachen, bestehen aus Salz (NaCl) und Aluminiumoxiden und sind mit Schwermetallen und möglicherweise auch mit Dioxinen, Furanen und PCBs belastet. Diese Rückstände werden nach Vermischung mit Kraftwerksaschen und Rauchgasreinigungsrückständen über die eigentliche Kalihalde geschüttet um diese „abzudecken“. Während diese Maßnahme offiziell als Verwertung der REKAL-Rückstände und als Schritt zur Wiedernutzbarmachung der Haldenfläche

dargestellt wird, sehen Umweltverbände darin eine verkappte Billigdeponie für Sondermüll, bei der abfallrechtliche Bestimmungen unterlaufen werden. Bei anderen Salzschlackeaufbereitern werden Salzschlacken vollständig stofflich verwertet, indem die zurück gewonnenen Schmelzsalze wieder als solche verwendet werden und die salzfreien Aluminiumoxide (das sogenannte „Oxiton“) hauptsächlich als Korrekturstoff in der Zementindustrie eingesetzt werden.

Als Ergebnis der vorliegenden Studie hat sich gezeigt, dass die Höhe der Schadstoffgehalte in den REKAL-Rückständen wie auch in den Kraftwerksaschen und Rauchgasreinigungsrückständen einen Einbau auf der Rückstandshalde im Sinne einer Verwertung eindeutig verbietet. Die Schwermetallgehalte in den Feststoffen wie auch in den Eluaten überschreiten fast sämtliche Grenzwerte der relevanten Regelwerke zum Teil um Größenordnungen. Die pH-Werte der Eluate können von extrem basisch (12) bis extrem sauer (0,25) reichen.

Analysen von Dioxin-, Furan-, und PCB-Gehalten sind zumindest öffentlich nicht verfügbar, jedoch ist bekannt, dass die Sekundäraluminiumschmelzen, aus denen die Salzschlacken stammen, zu den wichtigsten punktförmigen Dioxin-Emittenten zählen, und dass zumindest die Filterstäube dieser Betriebe hoch dioxinhaltig sind. Über Dioxingehalte von Salzschlacken liegen offiziellen Berichten der Regierungen und der Europäischen Union zufolge praktisch keine Informationen vor. Hinzu kommen große Unsicherheiten in der Beurteilung von Dioxin-Analysen, weil von den vielen tausend möglichen Kongeneren standardmäßig immer nur etwa 17 analytisch bestimmt werden, und dies nur anhand von Stichproben im Abstand eines Jahres.

Ein weiteres Problem besteht in der Freisetzung erheblicher Mengen teilweise hochgiftiger und explosibler Gase aus den

Salzschlacken und REKAL-Rückständen, insbesondere Ammoniak, Methan, Wasserstoff, Phosphin, Arsin und Cyanwasserstoff.

Trotz der bekannten Schwermetallbelastungen und der praktisch unbekanntem Dioxinbelastungen der verarbeiteten Salzschlacken werden die erzeugten Produkte (Kaliumchlorid, Ammoniumsulfat, Restlösungen) auf Sigmundshall zur Herstellung von Düngemitteln verwendet. Dadurch können Schadstoffe auch in die Nahrungskette gelangen.

Aufgrund der nachgewiesenen Schwermetallbelastungen und der möglichen Dioxin-, Furan- und PCB-Belastungen sowie der freigesetzten Gase muss ein umgehendes Verbot der Ablagerung von REKAL-Rückständen gefordert werden. Statt der umweltgefährdenden Deponierung sollte eine vollständige stoffliche Verwertung der Salzschlacken vorgenommen werden, wie sie Stand der Technik ist und von anderen Firmen mit wirtschaftlichem Gewinn betrieben wird.

Für die Recyclingprodukte aus Salzschlacke, insbesondere die Aluminiumoxide (Oxiton), müssen weitere Einsatzgebiete erschlossen werden, weil die ständig wachsenden Mengen allein von der Zementindustrie nicht mehr abgenommen werden können. Am sinnvollsten erscheint eine Verwendung bei der Herstellung von Hüttenaluminium (Primäraluminium), wodurch der Bergbau auf Bauxit und der hohe Energieverbrauch und Anfall von Rot-schlamm im Bayer-Prozess vermeidbar wären. Grundsätzlich sollte der Einsatz von Aluminium auf langlebige Produkte beschränkt werden, um die Häufigkeit des

mit Verlusten und Abfällen verbundenen Recyclings zu verringern.

Abgesehen von der Schadstoffproblematik ist aber auch die Haldenabdeckung *per se* wenig sinnvoll, weil sie ohne ökologischen Nutzen ist. Dem bergrechtlichen Gebot der Wiedernutzbarmachung von Haldenflächen kann durch eine Abdeckung und Begrünung nicht ernsthaft nachgekommen werden, da auf den sehr steilen, instabilen und schadstoffbelasteten Haldenflächen keinerlei hochwertige Folgenutzung möglich sein wird. Aufgrund der steilen Böschungen und der fehlenden Drainageschicht wird die abgedeckte Haldenoberfläche vermutlich schon nach wenigen Jahren durch Erosion, Salzauflösung und mechanisches Versagen zerstört werden und einer ständigen Nachsorge bedürfen. Daher wird die Kalihalde Sigmundshall weiter die Gewässer versalzen und immer größere Grundwasserkommen für Jahrtausende unbrauchbar machen.

Eine deutlich bessere Lösung wäre die stoffliche Verwertung der Rückstandssalze aus der Kalisalzverarbeitung, wodurch die Kalihalde praktisch vollständig beseitigt werden könnten. Es gibt mittlerweile Verfahren, die eine Verwertung der Rückstandssalze zu Industriesalz zu wirtschaftlich konkurrenzfähigen Kosten bei gleichwertiger Qualität ermöglichen. Es ist daher nicht zu akzeptieren, dass von ein und derselben Firma Industriesalz (Siedesalz) weiter aus Primärlagerstätten produziert wird, wodurch neue Umweltschäden entstehen, und andernorts gleichzeitig gigantische Altlasten in Form von verwertbaren Kalihalde in die Landschaft gesetzt werden.

1. Einführung

- 1.1. Kalibergbau in Deutschland und in Niedersachsen
- 1.2. Werk Sigmundshall
 - Entwicklung des Bergbaus
 - REKAL-Anlage
 - Entstehung und Erweiterung der Rückstandshalde
- 1.3. Sekundäraluminium-Industrie und Salzschlacke-Recycling

2. Produktionsabläufe, Stoffströme und Abfallströme

- 2.1. Förderung von Kali-Rohsalz und hergestellte Produkte
- 2.2. Aluminiummetallurgie und Salzschlacke-Recycling
 - Aluminiumhütten zur Primärerzeugung von Aluminium
 - Sekundäraluminium
 - Salzschlacke-Recycling
 - Beispiel ALSA
 - Beispiel K+S (REKAL-Verfahren)
 - Hergestellte Produkte

3. Abfälle und Umweltauswirkungen

- 3.1. Schutzgut Wasser
 - Belastungen der Gewässer durch Salzeinträge
 - Zusätzliche Gewässerbelastungen durch REKAL-Rückstände
- 3.2. Schutzgut Boden
 - Schwermetalle
 - Dioxine, Furane, PCBs und die Problematik ihres Nachweises
- 3.3. Luft
 - Toxische Gase aus Salzschlacken
 - Schwebstaub
- 3.4. Landschaft und Flächenverbrauch

4. Vermeidungs- und Verwertungspotentiale

- 4.1. Vollständiges Salzschlacke-Recycling
- 4.2. Vollständiges Kalihalden-Recycling

5. Schlußbemerkungen

Quellen

1. Einführung

Der Bergbau auf Kalisalz blickt in Niedersachsen und in einigen anderen Bundesländern auf eine über 100-jährige Geschichte zurück. Im Laufe der Zeit sind zu der reinen Gewinnung von Kali- und Steinsalz auch andere industrielle Aktivitäten hinzugekommen. Dieses ist zum Beispiel die Nutzung von Abbauhohlräumen unter Tage als Deponieraum für Sondermüll. Auch über Tage werden die Rückstandshalden der Kaliwerke zunehmend als Deponien für bergbaufremde Abfälle weiterbetrieben, auch wenn die offizielle

Darstellung diese Aktivitäten als Recycling- und Sanierungsmaßnahmen bezeichnet. Auf Werk Sigmundshall (Abbildung 1) ist seit einigen Jahren eine Anlage zur Verwertung von Salzschlacken aus der Sekundäraluminiumschmelze hinzugekommen, deren Abfälle ebenfalls auf der Kalihalde deponiert werden. All diese bergbaufremden Maßnahmen werden aber nicht durch die üblicherweise zuständigen Abfallbehörden, sondern durch die Bergbehörden im Rahmen von Betriebsplänen genehmigt. Abfallrechtliche Bestimmungen werden so unterlaufen.



Abbildung 1 –Werk Sigmundshall bei Wunstorf-Bokeloh. Rückstandshalden der Kaliwerke bestehen überwiegend aus recycelbarem Steinsalz.

Diese Studie wurde unter anderem deshalb initiiert, weil seit einigen Jahren auf der Kalihalde des Werkes Sigmundshall in größeren Mengen schadstoffhaltige Salzschlackenereste aus der Sekundäraluminiumschmelze aufgebracht werden, was aus Sicht der Umweltverbände nicht hinnehmbar ist. Zweck dieser Studie ist daher die Untersuchung der Stoffkreisläufe und der Abfallprodukte der beiden Industriezweige (Kalibergbau und Aluminium-Recycling) mit Blick auf eine Technikfolgen-Abschätzung, sowie die Entwicklung von konkreten Verbesserungsvorschlägen, insbesondere hinsichtlich eines schonenden Umgangs mit Rohstoffen, einer Vermeidung von Bergbau-Folgeschäden und einer

Entlastung der Umwelt von unnötigen Schadstoffen und Salzfrachten. Viele Beobachtungen und Schlussfolgerungen sind über den konkreten Fall Sigmundshall hinaus auch auf andere Betriebe übertragbar.

1.1 Kalibergbau in Deutschland und in Niedersachsen

Das erste Kalisalz wurde 1856 in Stassfurt (Sachsen-Anhalt) zutage gefördert. In Niedersachsen begann der Bergbau auf Kali- und Steinsalz Ende des 19. Jahrhunderts mit dem Abteufen zahlreicher Schächte (in Deutschland insgesamt ca. 280 !). Abbildung 2 vermittelt einen Überblick über die deutschen Kali- und Steinsalzbergwerke.

Von den vielen einzelnen Unternehmensgründungen („Gewerkschaften“) sind im Laufe der Zeit die meisten durch Pleiten oder Übernahmen verschwunden. Ein Konzentrationsprozess setzte ein, aus dem größere Gesellschaften wie die Kali-Chemie, Salzdettfurth AG, Wintershall AG, Preussag AG und die Burbach-Kaliwerke, als neue Eigentümer hervorgingen. 1970 fusionierten einige dieser Gesellschaften zur Kali und Salz AG, die nach mehrfacher Umstrukturierung als einziger deutscher Konzern heute noch Kalibergbau betreibt.

Die letzte große Änderung der Besitzverhältnisse fand nach der deutschen Wiedervereinigung statt. 1993 entstand aus dem Zusammenschluss der Kali und Salz Beteiligungs AG (51%) mit der Mitteldeutschen Kali Aktiengesellschaft (49%), die seit 1990 der BvS-Vorgängerin Treuhandanstalt gehörte, das Gemeinschaftsunternehmen Kali und Salz GmbH. Damit der Vertrag zustande kam, zahlte damals die Bundesrepublik Deutschland zusätzlich zu den eingebrachten Sachwerten in Form der ostdeutschen Kalibergwerke (aufgeschlossene Lagerstätten, Reserven, Infrastruktur) rund 1 Milliarde DM Bundesmittel in das gemeinsame Unternehmen ein (Phosphorus & Potassium, 1995). Im Zeitraum 1993 bis 1997 wurden durch das neue, nun halbstaatliche Unternehmen in den gesamten Umstrukturierungsprozess 1,261 Milliarden DM, und davon rund 800 Millionen in den neuen Bundesländern investiert (RWI 1998). Mit Wirkung zum 01.01.1998 (Grimmig, 1998) verkaufte dann der Bund seine zuvor für 1 Milliarde DM erworbenen 49% Anteile an die Kali und Salz GmbH, für 250 Millionen DM (deren Wert vom Finanzhaus Goldman Sachs auf 400 Millionen DM geschätzt wurde). Damit war die „Privatisierung“ der ostdeutschen Kaliindustrie plus der 750 Mill. DM Steuergelder vollzogen. Somit sind heute alle Kalibergwerke in der Hand der K+S Aktiengesellschaft mit Sitz in Kassel. Hauptaktionär ist der Chemie-Multi BASF, der über die Guano Werke GmbH 49,5 % der Aktien hält; der Rest ist Streubesitz.

Der großen Marktberreinigung nach der Wende fielen neben den meisten ostdeutschen Betrieben auch die niedersächsischen Bergwerke Niedersachsen-Riedel in Wathlingen/Hänigsen (1997) und Bergmannsseggen-Hugo in Lehrte/Sehnde (1994) zum Opfer, weil die neu hinzugekommenen Lagerstätten in den neuen Bundesländern (insbesondere Zielitz in Sachsen-Anhalt und Unterbreizbach in Thüringen) aufgrund der sehr bedeutenden Vorräte, guter Gehalte und der flachen Lagerung, die eine leichtere Gewinnung zulässt, wesentlich attraktiver sind und es seinerzeit große Überkapazitäten in der Kaliproduktion gab. Die meisten Bergwerke wurden also nicht wegen Erschöpfung der Vorräte aufgegeben, aber die darin verbliebenen Rohstoffreserven sind durch den aus volkswirtschaftlicher Sicht völlig planlosen Raubbau wohl für immer verloren. Das Werk Sigmundshall in Wunstorf-Bokeloh ist als einziges Kalibergwerk der Region Hannover und Niedersachsens noch in Betrieb.

Als Rechtsnachfolgerin der übernommenen Betriebe hat K+S auch, mit wenigen Ausnahmen, die Verantwortung für die Hinterlassenschaften des früheren Kalibergbaus übernommen (Rechtslage in neuen Bundesländern z.T. unklar). Zu diesem Zweck wurde bei K+S eigens eine Abteilung eingerichtet, die sich mit der ordnungsgemäßen Schließung der aufgegebenen Bergwerke befasst. Ordnungsgemäß bedeutet hier, dass die Maßnahmen im Einklang mit den gesetzlichen Bestimmungen erfolgen und einer bergbehördlichen Genehmigung eines Abschluß-Betriebsplanes bedürfen. Dazu gehört in der Regel die Flutung der untertägigen Hohlräume und die Verfüllung und Sicherung der Schächte. Eine Beseitigung der Rückstandshalden der Kaliwerke („Kalihalden“) wurde bislang in keinem Fall angeordnet, obwohl diese Salzhalden mit ihren Haldenabwässern enorme Umweltbelastungen darstellen und neben der Versalzung der Flüsse als das ökologische Hauptproblem des Kalibergbaus gelten dürfen. Das Bestreben der Ka-

liindustrie geht dahin, über die Genehmigung von Abschlussbetriebsplänen die stillgelegten Bergwerke samt Kalihalden aus der Bergaufsicht zu entlassen, in der Hoffnung dann um Sanierungsarbeiten

herum zu kommen. Langfristig bedeutet dies, dass Folgekosten von der Öffentlichen Hand oder von betroffenen Dritten aufzubringen sind.

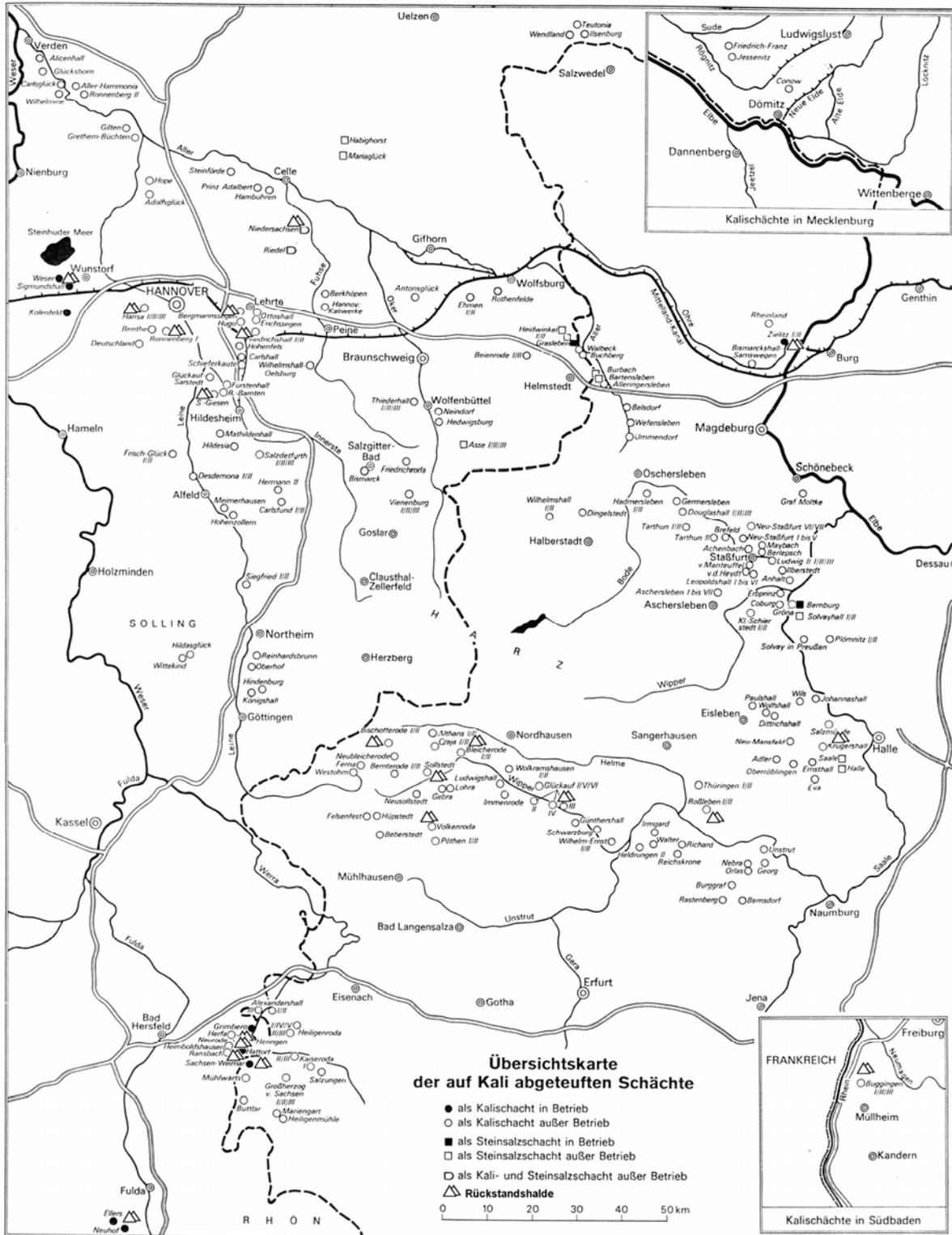


Abbildung 2 – Übersicht aller in Deutschland abgeteufte Kalischächte (mit Änderungen, nach Hofmann, 1972)

1.2 Werk Sigmundshall

Entwicklung des Bergbaus

Das Kalibergwerk Sigmundshall der K+S Kali GmbH liegt beim Ort Bokeloh westlich der Stadt Wunstorf. Die Lagerstätte der ca. 250 Millionen Jahre alten Zechstein-Salze ist durch die drei Schächte (von NW nach SE) Weser, Sigmundshall und Kolenfeld erschlossen. Das Werk nahm 1904 die Produktion von Kalisalz auf und fördert heute jährlich ca. 3 Millionen Tonnen Kalirohsalz und Kieserit (Siehe Tabelle 1) zu Tage. Der Betrieb hat ca. 800 Beschäftigte, wovon etwa 410 im Grubenbetrieb tätig sind. (EMC, 2003; Sessler und Holländer, 2002).

Bis 2001 wurde auf Sigmundshall nur der Sylvinit des Flözes Ronnenberg abgebaut, der im Mittel ca. 17 % K_2O (entspricht 25 % KCl) enthält. Seit 2001 wird nun auch das Hartsalz des Flözes Stassfurt gewonnen, welches zwar einen geringeren K_2O -Gehalt von 11,6 % aufweist und auch schwieriger zu verarbeiten ist, aber zusätzlich 32,7 % des Magnesiumsulfates Kieserit enthält (Gerland, 2000; Sessler und Hol-

länder, 2002). Im Jahr 2000 waren 38 Millionen Tonnen Hartsalz-Vorräte nachgewiesen. Durch die Mitgewinnung des Kieserits wird der Bergbau auf Sigmundshall für weitere 20 Jahre ermöglicht.

Die Entscheidung den Bergbau auf das kieseritreiche Hartsalz des Flözes Stassfurt auszuweiten kam angeblich nur zustande, weil durch einen Beschluss des Niedersächsischen Landtags vom 5. Mai 1999 die Verpflichtung zur Entrichtung des Förderzinses aufgehoben wurde, wodurch der Landeskasse 15 Millionen DM Einnahmeverluste entstehen (Niedersächsischer Landtag, 1999; HAZ, 1999). Demgegenüber verkündete Dr. Ralf Bethke, Vorsitzender des Vorstands der K+S Aktiengesellschaft: „*Positiv bewerten wir auch die Marktchancen für unseren ESTA-Kieserit. Der zunehmende Bedarf an Schwefel als Pflanzennährstoff in der Landwirtschaft eröffnet auch in Europa gute Nachfragechancen für diesen Spezialdünger. Durch den Bau unserer neuen Produktionsanlage am Standort Sigmundshall haben wir uns auf diese Entwicklung rechtzeitig und kostengünstig vorbereitet*“ (K+S, 2001).

Halit	NaCl
Sylvin	KCl
Kieserit	$MgSO_4 \cdot H_2O$
Anhydrit	$CaSO_4$
Gips	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
Steinsalz	Gestein aus Halit
Sylvinit	Gestein aus Sylvin + Halit
Kieseritisches Hartsalz	Gestein aus Sylvin + Halit + Kieserit

REKAL-Anlage

Im Jahr 1995 ging auf Werk Sigmundshall eine Anlage zur Aufbereitung von Salzschlacke aus der Sekundäraluminium-Produktion, die sogenannte REKAL-Anlage, in Betrieb. (REKAL ist ein Acronym für Rezyklierung von Kalium und Al-

uminium). Diese Anlage hat eine Verarbeitungskapazität für 100 000 Tonnen Salzschlacke pro Jahr und ist von Anfang an praktisch ausgelastet. Mit Beginn des Salzschlacke-Recyclings wurde auch mit der Ablagerung der REKAL-Rückstände auf der Kali-Rückstandshalde Sigmundshall begonnen, die zunächst von der Berg-

behörde nur für einen Versuchszeitraum von 5 Jahren genehmigt worden war. Diese eigentlich völlig bergbaufremde Tätigkeit wird in Niedersachsen durch die Bergbehörden nach Bergrecht und nicht durch die Abfallbehörden nach Abfallrecht genehmigt.

Entstehung und Erweiterung der Rückstandshalde

Die Rückstandshalde des Kaliwerkes wurde mit dem Beginn der Rohsalzverarbeitung angelegt, also Anfang des 20. Jahrhunderts und ist seit dem zu ihrer heutigen Größe angewachsen (ca. 15 Mill. m³, 135 m Endhöhe über Terrain, derzeit etwa 0,36 km² Basisfläche). Die Halde besteht aus den Rückständen der Kalisalzverarbeitung, also im Wesentlichen aus Steinsalz, das nach verschiedenen Verfahren von dem Kaliummineral Sylvin abgetrennt wird. Da nur ein Teil der anfallenden Rückstände als Versatz in die ausgebeuteten Kaliabbau zurück gebracht werden kann, wird der Rest bisher auf Halde gelegt. Dies geschieht über Bandförderanlagen, die bis zum Haldenplateau hinaufreichen. Da die genehmigte Haldenfläche in wenigen Jahren zugeschüttet sein wird, läuft zurzeit ein Genehmigungsverfahren zur Haldenerweiterung um weitere 3,8 Millionen m³.

Von der Halde werden Salzpartikel in die Umgebung verweht, wo sie zu Korrosionsschäden an Metallgegenständen (Dachrinnen, Autos, etc.) und Schäden an der Vegetation führen. Durch Niederschlag entstehen konzentrierte salzhaltige Haldenabwässer, die teilweise versickern und das Grundwasser versalzen und teilweise zusammen mit Produktionsabwässern in die Leine eingeleitet werden.

Mit der Begründung, die Versickerungsrate von Niederschlag auf der Halde vermindern zu wollen und die Haldenfläche wieder nutzbar zu machen, verfolgt K+S verschiedene Projekte zur Abdeckung und Begrünung der Halde. Diesem Zweck soll

auch die Aufbringung einer Deckschicht aus REKAL-Rückstand dienen, der mit Rauchgasreinigungsrückständen und Kraftwerksaschen vermischt wird, um eine Verfestigung durch zementähnliche Abbindereaktionen zu erzielen. Aus Sicht der Umweltschutzverbände hat der als „gefährlicher Abfall“ eingestufte, schwermetallhaltige und möglicherweise dioxinbelastete REKAL-Rückstand auf der Kalihalde nichts verloren.

1.3 Sekundäraluminium-Industrie und Salzschlacke-Recycling

Zwischen der Sekundäraluminium-Industrie und dem Werk Sigmundshall bestehen Verbindungen, indem das im Aluminium-Recycling eingesetzte Schmelzsatz von K+S unter den Markennamen *Montanal* und *Alasal* hergestellt und geliefert wird. Das verbrauchte Schmelzsatz, also die Salzschlacke, wird von K+S zur teilweisen Verwertung zurückgenommen, wofür die Firma in ihren Broschüren auch bei ausländischen Kunden ausdrücklich wirbt („Systemanbieter“). Durch die Deponierung der REKAL-Rückstände auf der eigenen Kalihalde (*de facto* Sondermüll-Deponie) hat K+S einen Wettbewerbsvorteil gegenüber anderen Salzschlackeaufbereitern, die sich um eine vollständige stoffliche Verwertung bemühen (Schneider und Wolf, 1998).

2. Produktionsabläufe, Stoffströme und Abfallströme

2.1 Förderung von Kali-Rohsalz und hergestellte Produkte

Abgebaut wird das Sylvinitlager (Flöz Ronnenberg) mit 2 bis 30 Meter Mächtigkeit und durchschnittlichen K₂O-Gehalten um 17 %, und seit 2001 das Hartsalzlager

(Flöz Stassfurt) mit 11,6 % K_2O und 32,7% Kieserit. Die Tagesproduktion liegt heute bei 12 000 t Rohsalz. Die Förderung erfolgt über Schacht Sigmundshall (Schachtkapazität 650 t/h) aus Tiefen zwischen 350 und 1400 Meter, wobei Gebirgstemperaturen von über 65 °C auftreten können. Für die Grubenbewetterung sorgt ein Grubenlüfter mit einer installierten Leistung von 1,2 Megawatt, der eine Wettermenge von 27 000 m³/min durch das Grubengebäude befördert. Das entspricht einer Menge von 36 000 t Luft / Tag (also der 3-fachen Rohsalzförderung!), die außer zur Wärmeabfuhr auch deshalb erforderlich ist, weil zahlreiche Dieselfahrzeuge im Einsatz sind und weil die Explosionschwaden aus den Abbauen entfernt werden müssen (TU Berlin, 1999).

Hartsalz und Sylvinit werden getrennt und alternierend gefördert und verarbeitet. Das sylvinitische Rohsalz wird in einem Heißlösebetrieb und in einer Flotationsanlage verarbeitet. Für das kieseritische Hartsalz wurde 2001 eine elektrostatische Aufbereitungsanlage (ESTA-Anlage) in Betrieb genommen.

Die Förderung sylvinitischer Rohsalze lag 1999 (vor Beginn der Hartsalzförderung) bei 2,9 Mill. t/a (NLfB, 2000), 2000 bei ca. 2,8 Mill. t/a (Gerland, 2000), so dass sich bei einem Sylvingehalt von 27 % jährlich etwa 2,0 Mill. Tonnen Rückstand ergeben, der aber nicht vollständig auf der Rückstandshalde deponiert wird, sondern zum Teil auch in den Versatz geht. Ab 2001 besteht die Förderung jeweils zur Hälfte aus Hartsalz und aus Sylvinit (Gerland, 2000). Der Anfall von Rückständen aus der Sylvinitverarbeitung beläuft sich somit auf ca. 1,0 Mill. Tonnen pro Jahr. Beim Hartsalz mit Kieseritgehalten von 32,7 % und Sylvinitanteilen von 18,3 % ergibt sich ein Rückstandsanteil von 49 %, also rund 700 000 t/a. Der spezifische Anfall von Rückständen ist also bei Hartsalz deutlich geringer als bei sylvinitischen Rohsalzen. Die Produktionsumstellung ab 2001 führt

daher auch zu einer Reduktion des jährlichen Haldenbedarfs.

Für den deutschen Kalibergbau insgesamt wird angegeben, dass von dem geförderten Kali-Rohsalz 22 % zu einem verkaufsfähigen Produkt veredelt werden, 65 % als feste Rückstände und 13 % als flüssige Abfälle (Endlaugen) anfallen. Von den festen Rückständen werden 89 % auf Kalihalden abgelagert und 11 % als Versatz eingebracht. Von den Salzlaugen werden ca. 62 % im geologischen Untergrund verpresst (wovon ca. 10 % aber wieder aufsteigen) und 38 % direkt in Flüsse eingeleitet. Es wird geschätzt, dass die spezifischen Entsorgungskosten pro Tonne vermarkteten Kalidüngers sich folgendermaßen darstellen (Symonds and COWI, 2001):

- Ca. 0,25 – 0,30 € für Einleitung in Gewässer
- Ca. 1,00 – 1,20 € für Verpressung in geologischen Formationen
- Ca. 1,00 – 1,20 € für Ablagerung auf Kalihalden
- Ca. 3,25 – 3,90 € für Versatz bei steiler Lagerung (Sigmundshall)
- Ca. 6,25 – 7,50 € für Versatz bei flacher Lagerung

Die Gesamtförderung an Rohsalz betrug bis 2001 ca. 90 Mill. Tonnen (Sessler und Holländer, 2002). In dieser Zeit sind ca. 30 Mill. Tonnen Rückstände aufgehaldet worden (Sussebach, 2002), so dass von einem bisherigen Verhältnis von Förderung zu Aufhaldung von 3:1 ausgegangen werden kann. Wie aus einem Genehmigungsantrag auf Haldenerweiterung hervorgeht, wird für einen Zeitraum von 15 Jahren ein zusätzlicher Haldenbedarf für 3 800 000 m³ veranschlagt, also etwa 250 000 m³/a oder rund 500 000 t/a. In diesem zusätzlichen Haldenvolumen sind die Ablagerungen von konditionierten REKAL Rückständen, die mit ca. 52 000 t/a (Wöhler, 1999) angegeben werden, offenbar bereits enthalten. Das beantragte Deponievolumen scheint plausibel, wenn man einen etwas

höheren Versetzungsgrad als in der Vergangenheit annimmt.

Aus den bergmännisch gewonnenen Rohsalzen werden in der nachgeschalteten Kalifabrik Kalidünger verschiedener Qualitäten (KCl 99%, KCl 97%, 60er fein) mit einer K₂O Menge von 330 000 t/a erzeugt. In der neuen ESTA-Anlage wird ein Kieserit-Produkt hergestellt, das als Magnesiumsulfatdünger vermarktet wird (300 000 t/a). Außerdem werden die Schmelzsalze Montanal und Alasal hergestellt, bei denen es sich um sylvinitisches Kalirohsalz handelt, das mit Flussspat und evtl. zusätzlich etwas KCl vermahlen wird. Die Produktion beträgt ca. 120 000 t/a (Gerland, 2000). In der REKAL-Anlage werden jährlich ca. 90 000 t Salzschlacke verarbeitet. Dabei fallen neben dem rückgewonnenen Kaliumchlorid auch Ammoniumsulfat, sowie phosphat- und sulfathaltige Lösungen an, die in der Düngemittelherstellung (!) verwendet werden (Wöhler, 1999).

2.2 Aluminiummetallurgie und Salzschlacke-Recycling

Bei der Metallurgie des Aluminiums muss man zwischen der Primärerzeugung von Aluminium aus Bauxit durch Schmelz-

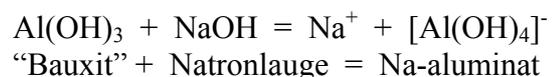
fluss-Elektrolyse und der Aluminium-Sekundärschmelze zum Recycling von Aluminiumschrotten unterscheiden. Während Primäraluminium sich durch eine große Reinheit auszeichnet und daher universell verwendbar ist, ist bei Sekundäraluminium ein mehr oder weniger großer Anteil an „Verunreinigungen“ in Form früherer Legierungsbestandteile enthalten. Diese können zwar weitgehend entfernt werden, was aber mit weiterem Einsatz von Energie und Rohstoffen und mit Verlusten, sowie mit Abfällen und Emissionen verbunden ist. Primäraluminium wird bevorzugt für Knetlegierungen für Walzwerke und Strangpressen verwendet, während Sekundäraluminium für Gießereiprodukte zum Einsatz kommt (besonders Autoindustrie).

Aluminiumhütten zur Primärerzeugung von Aluminium

Aluminiummetall wird primär durch Schmelzelektrolyse von Aluminiumoxid erzeugt. Um eine Tonne (1000 kg) Primäraluminium (synonym: Hüttenaluminium) herzustellen werden etwa 2 Tonnen Aluminiumoxid benötigt, die aus ca. 4 Tonnen Bauxit (Siehe Tabelle 2) gewonnen werden.

Tabelle 2 - Einige wichtige Aluminiumphasen	
Böhmit	$\gamma\text{-AlOOH}$
Diaspor	$\alpha\text{-AlOOH}$
Gibbsit (Hydrargillit)	Al(OH)_3
Korund	Al_2O_3
Magnesiumspinell	MgAl_2O_4
Kryolit	Na_3AlF_6
Bauxit	Gemenge aus verschiedenen Mineralen

Das Aluminiumerz Bauxit (Beauxit; nach dem Ort *Les Beaux*) wird nach Feinmahlung im Bayer-Prozess mit Hilfe von Natronlauge in Autoklaven bei ca. 143°C etwa 30 Minuten lang aufgeschlossen:



Die Aluminiumträger (Gibbsit, Böhmit, Diaspor) werden dabei aus dem Bauxit heraus gelöst, während Silikate nur teilweise zersetzt werden und Eisenoxide

praktisch ungelöst bleiben. Der unlösliche Rückstand (Rotschlamm) wird deponiert (Abbildung 3). Das als Natriumaluminat gelöste Metall wird durch Abkühlung als reines Aluminiumhydroxid wieder ausgefällt, abfiltriert und bei 1200 bis 1300 °C zu Oxid kalziniert (Energiebedarf ca. 3300 kJ/kg Al_2O_3 im Wirbelschichtofen (Ullmann, 1976)). Wegen der Bildung von Natrium-Aluminium-Silikaten als unerwünschten Nebenprodukten die im Rot-

schlamm verbleiben, treten Alkaliverluste auf, die ersetzt werden müssen.

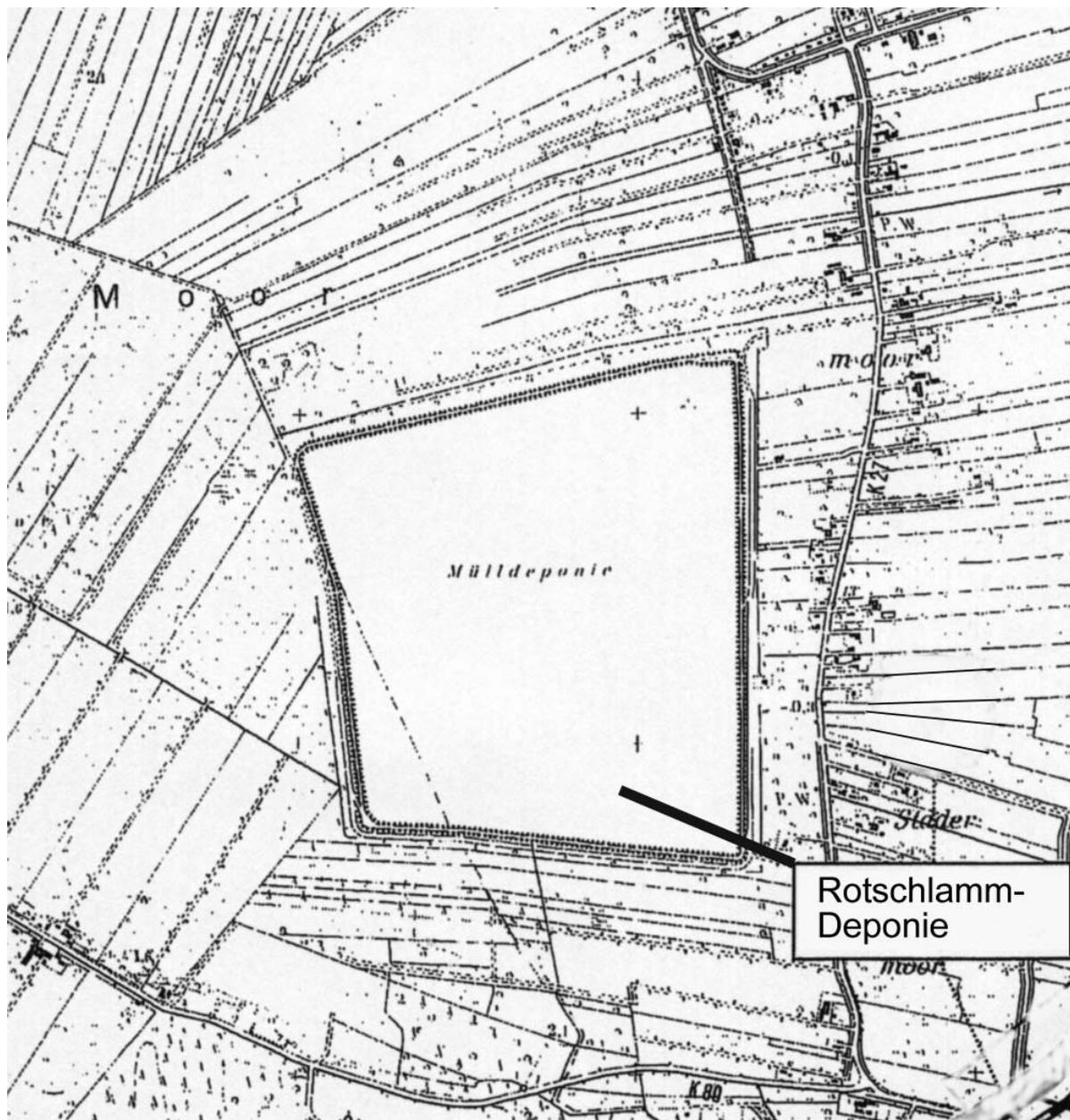


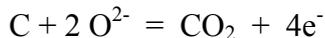
Abbildung 3 – Rotschlammdeponie der Vereinigten Aluminiumwerke, bei Stade. Größe mehr als 1 km² !

Folgende Verbrauchszahlen für Rohstoffe und Energie zur Herstellung von 1 t Al₂O₃ werden genannt (Tabelle 3):

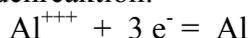
Tabelle 3 - Verbrauchszahlen zur Herstellung von 1 t Al₂O₃ *	
Parameter	Typische Werte, kg/t Al₂O₃
Bauxit	1970 - 2250
NaOH (50%)	33 - 160
CaO	35 - 110
Wasser	1000 - 6000
Energie GJ/t	8.0 - 13.5
*) EU (2000)	

Der nächste Schritt ist die Schmelzfluss-Elektrolyse zur Herstellung des Metalls. Dabei wird das Aluminiumoxid in einer Kryolit-Schmelze bei 900°C gelöst und zwischen einer Anode aus Petrolkoks und Pech und einer Kathode aus Graphit bzw. Stahl (Stahlwanne) auf elektrochemischem Weg reduziert (Hall-Héroult Prozess):

Anodenreaktion:



Kathodenreaktion:



Wie man an der Anodenreaktion sieht, entsteht hierbei CO₂ und die Anode wird verbraucht. (Bezüglich der Klimarelevanz

Tabelle 4 - Atmosphärische Schadstoffemissionen pro Tonne Primäraluminium	
CO ₂	> 1 500 kg
NO _x , SO ₂ , CO, VOC	173 kg
Fluor-Verbindungen	1,5 kg

Insgesamt betragen die atmosphärischen Schadstoffemissionen (ohne CO₂) der Aluminium-Primärerzeugung etwa 204 kg/t Aluminium, wovon 85% aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe für die Tonerdeherstellung (Prozessenergien) und zur Elektrolyse (Kohleverstromung) stammen und vor allem aus Schwefel- und Stickoxiden, Staub, Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffen bestehen (Schucht, 1999). Eine sehr detaillierte Untersuchung

der Aluminiumgewinnung muss dieses CO₂ zu dem CO₂ aus der Stromerzeugung hinzu addiert werden.) Bei der elektrolytischen Gewinnung von Primäraluminium aus dem kalzinierten Aluminiumoxid werden pro Tonne Metall durchschnittlich etwa 15 700 kWh elektrische Energie (14 000 kWh bei modernsten Anlagen) benötigt und 1,5 Tonnen Kohlendioxid emittiert. Der kumulierte Primärenergiebedarf der Primäraluminiumgewinnung aus Bauxit liegt jedoch wesentlich höher und betrug 1990 in der BRD 163.730 MJ je t unlegiertes Primäraluminium (Schucht, 1999).

Problematisch sind aber auch Emissionen von flüchtigen Fluor-Verbindungen (1,1 kg Fluorid pro Tonne Aluminium; 0,5 kg bei modernen Anlagen), darunter auch die Treibhausgase CF₄ und C₂F₆, mit Treibhaus-Potentialen von 6500 bzw. 9200 bezogen auf CO₂. Ca. 60 Prozent der anthropogen verursachten Fluorkohlenstoff-Emissionen wurden 1995 der Primäraluminium-Industrie zugeschrieben. Der Anteil von CF₄ und C₂F₆ am anthropogenen Treibhauseffekt liegt insgesamt bei ca. 0,2 Prozent (GDA, 2003). Weitere Emissionen sind SO₂ und PAKs bei der Herstellung der Anoden. (Tabelle 4)

der Stoffströme und der Schadstoffproduktion kann einer Life Cycle Studie des International Aluminium Institute (2003) entnommen werden, auf die hier verwiesen wird.

Auf der anderen Seite tragen Aluminiumteile in Kraftfahrzeugen wegen der Gewichtersparnis auch zu geringerem Treibstoffverbrauch und damit zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen bei. Allerdings muss ein PKW (nach Angaben der Aluminium-Industrie) erst einmal 60 000 km fahren, bis sich der erhöhte Energieinput zur Aluminiumherstellung (Primäraluminium) ökologisch amortisiert hat (GDA, 2002). Außerdem besteht bei den KFZ-Herstellern die Tendenz, Einsparungen im

Verbrauch gleich wieder zunichte zu machen, z.B. durch breite Reifen oder serienmäßige Klimaanlage, so dass von einem

ökologischen Nutzen durch Leichtmetallteile unterm Strich nicht gesprochen werden kann.

Tabelle 5 - Primär- und Sekundär-Aluminium Produktion in Deutschland *				
Jahr	1991	2000	2001	2002
Hüttenaluminium (t)	690.000	644.000	652.000	653.000
Sekundäraluminium (t)	542.000	572.000	623.000	666.000
*) Quelle: Wirtschafts-Vereinigung Metalle: Metallstatistik 2001, 2002				

Tabelle 6 - Primär- und Sekundär-Aluminium Produktion in Europa* (in Tausend Tonnen)					
	1997	1998	1999	2000	2001
Recyceltes Aluminium	1907,0	2149,6	2198,7	2362,3	2523,1
Hüttenaluminium	3042,7	3229,5	3338,3	3413,0	3482,5
*) Quelle : OEA (http://www.oea-alurecycling.org/d/eckdaten.html)					

Sekundäraluminium

Durch Einschmelzen von Aluminiumschrotten, aluminiumhaltiger Aufbereitungsprodukte (z.B. Grüner Punkt) und Aluminium-Krätzen wird "Sekundäraluminium" hergestellt. Mittlerweile wird in Deutschland bereits mehr Sekundäraluminium als Hüttenaluminium erzeugt, während in der EU insgesamt noch der Primäraluminiumanteil überwiegt (Tabelle 5 und 6). Insgesamt gingen im Jahre 1995 in der Bundesrepublik Deutschland ca. 2.142.800 t Aluminium in die unterschiedlichen Anwendungsfelder (Hoberg, 1997), wodurch Deutschland zum Nettoimporteur für Aluminium wird. (Durch den Import von Primäraluminium fallen die mit seiner

Herstellung verbundenen hohen CO₂-Emissionen (Kyoto-Protokoll!) nicht zu Lasten der Bundesrepublik, sondern der Herstellerländer.)

In Deutschland gibt es derzeit ein gutes Dutzend Betriebe, die Sekundäraluminium aus Alu-Schrotten herstellen (Tabelle 7). Durch Übernahmen und Umfirmierungen ist das Bild unübersichtlich. Ein weiteres Problem besteht in der nicht immer möglichen scharfen Trennung zwischen Umschmelzwerken (remelters), die sortenreine Produktionsabfälle oft firmenintern umschmelzen, und Recyclingbetrieben (refiners), die gemischte Schrotte der Abfallwirtschaft (z.B. Grüner Punkt) stofflich verwerten.

Tabelle 7 - Sekundäraluminium-Betriebe in Deutschland		
Firma	Standort(e)	Sekundäraluminium-Kapazität (t / a) *
Aluminium Rheinfelden GmbH	Rheinfelden	> 25 000
Aluminiumschmelzwerk Oetinger	Weißenhorn, Berlin	130 000
BAGR GmbH	Berlin	
Gottschol Aluminium GmbH	Ennepetal	
Honsel GmbH + Co. KG	Meschede	
Karl Konzelmann GmbH	Hannover, Neu-Ulm	120 000 (zusammen) BAS (2001): 59 000
Metallwerke Bender GmbH	Krefeld	
Metallhüttenwerke Bruch GmbH	Dortmund	
Metallwarenfabrik Stockach	Stockach	
Trimet AG	Essen, Harzgerode, Sömmerda	70 000
VAW-IMCO Guß und Recycling	Grevenbroich, Töging	
Wuppermetall GmbH	Wuppertal	
*) Kapazitätsangaben sind nur in Einzelfällen veröffentlicht		

Dass es sich bei Aluminiumschrotten um wertvolle Sekundärrohstoffe handelt, macht ein Blick auf die Marktpreise deutlich. Für Reinaluminiumdraht wurde im April 1997 bis zu 2.700 DM/Tonne bezahlt. Selbst schlechter einzuordnende Schrotte wie Späne oder Gußschrott mit Verunreinigungen an Eisen erzielen noch Marktpreise zwischen 1.400 und 1.650 DM/Tonne. Gleichzeitig lag der Preis für Aluminium High Grade an der London Metal Exchange im Durchschnitt bei etwa 2.740 DM/Tonne (Hoberg, 1997).

Im Vergleich zur Primärherstellung ist der Energieeinsatz für Sekundäraluminium deutlich geringer. Eine australische Abfallbehörde versucht dies so deutlich zu machen:

Did you know ? By recycling one aluminium can you are saving enough energy to run your television for three hours (www.wastewise.wa.gov.au).

Nach Angaben der Industrie (EU, 2000) ist der Energieaufwand für Sekundäraluminium nur 5% des Energieaufwands zur Herstellung der gleichen Menge Primär-Aluminium; es werden also 95 % Energie eingespart. Allerdings ist in diesem häufig zitierten Wert noch nicht der

Energiebedarf für das Salzschlacke-Recycling enthalten, so dass im Vergleich zu Primäraluminium der Energieverbrauch eher bei 12 % liegt (Schneider und Wolf, 1998). Weiter muss hier berücksichtigt werden, dass ca. 20 % des Aluminiummetalls beim Recycling hauptsächlich in Form von Aluminiumoxid „verloren“ gehen, die durch Primäraluminium wieder ergänzt werden müssen. Wenn also der Energiebedarf pro Tonne Primäraluminium mit 100 Einheiten angesetzt wird, der für Sekundäraluminium mit 12 Einheiten, dann sind für eine gleich bleibende Aluminiummenge von einer Tonne $0,8 \text{ t} \cdot 12$ Energieeinheiten plus $0,2 \text{ t} \cdot 100$ Energieeinheiten = 29,6 Energieeinheiten aufzuwenden. Die tatsächliche Energieeinsparung relativiert sich also von 95 % auf maximal 70 %.

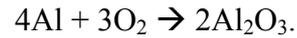
Bei der Sekundäraluminiumerzeugung werden 19.505 MJ Primärenergie pro t unlegiertes Sekundäraluminium verbraucht, wovon ca. 47% auf den Einschmelzvorgang im Trommelofen entfallen und 11% auf die Schmelzreinigung und das Vergießen. Weitere 18% werden für die Schrottverarbeitung und Krätzeaufbereitung benötigt und nochmals 18 % für die Salzschlackeaufarbeitung. Auf den Transport entfallen knapp 6% des Energieverbrauchs (Schucht, 1999).

Bevor Aluminiumschrott eingeschmolzen werden kann, werden zunächst organische Verunreinigungen so weit wie möglich abgetrennt. Dies geschieht in der Regel durch einen vorgeschalteten Pyrolyseprozess und anschließendes Blankglühen.

Das Einschmelzen von gemischten und verunreinigten Aluminiumschrotten erfolgt praktisch ausschließlich in Drehtrommelöfen mit Salzbad. Nachdem das „Schmelzsalz“ geschmolzen ist, wird der Aluminiumschrott nach und nach zugegeben und eingerührt. Die Salzschnmelze schwimmt als Schlackeschicht auf dem geschmolzenen Metall und ist mehrere Dezimeter dick.

Die eingesetzten Schmelzsalze sind Mischungen aus etwa 70 % NaCl, 28 % KCl und 2 % (0 - 6%) CaF₂ die unter Bezeichnungen wie RESAL, ALASAL und MONTANAL im Handel sind. Sie binden die Oxide und andere Verunreinigungen zu einer Salzschlacke mit einem Restanteil von etwa 10 % Aluminium-Metall. Der Salzschlackenanfall pro Tonne produzierten Sekundäraluminiums liegt nach Feige und Merker (2001) je nach Einsatzmaterial zwischen 200 und 400 Kilogramm, kann aber auch bis zu 700 Kilogramm erreichen. Nach Schneider und Wolf (1998) sind es 400 bis 700 kg/Tonne Sekundäraluminium. Diese Angaben decken sich mit Angaben zum Bedarf an Schmelzsalz von ca. 300 bis 500 kg pro Tonne Sekundäraluminium (K+S, 2003; Umweltbundesamt Wien, 1999). Die verunreinigte Salzschnmelze wird vom erschmolzenen Aluminium getrennt abgezogen und in großen Blöcken zu Salzschlacke erstarren lassen. (Die dabei verloren gehende Wärmeenergie kann abgeschätzt werden zu ca. 1,08 MJ/t.)

Aluminium kann durch Oxidation verhältnismäßig leicht wieder zu Aluminiumoxid zurückverwandelt werden gemäß:



Beim Schmelzen und Gießen von Aluminium an Luft bei Temperaturen von etwa 800°C erfolgt die Metalloxidation noch sehr viel schneller. Die dann entstehende "Krätze" (ein Gemisch von feinkörnigen Oxidpartikeln und Metall) kann die Oberfläche der Schmelze cm-dick bedecken. Der Metallgehalt von Krätzen kann im Bereich zwischen < 20 bis 78 % liegen.

Zur Rückgewinnung von Aluminium werden Schrotte und Krätzen, teilweise auch dioxinhaltige aluminiumreiche Flugaschen der Sekundärschmelzbetriebe, in Drehtrommelöfen unter einer Abdeckung aus Schmelzsalz eingeschmolzen, um die Oxidation des Metalls möglichst gering zu halten. Gleichzeitig fungiert die Salzschnmelze als Flussmittel, das die Trennung der metallischen Schmelzphase von anhaftenden Verunreinigungen erleichtert. Schließlich nimmt die Salzschnmelze Verunreinigungen auf, z.B. oxidierte Legierungsbestandteile wie Mg, Ca, Li, Cu, Zn, As, oder Verbrennungsrückstände von organischen Anteilen (Farb- und Lackreste, Kunststoffbeschichtungen, Schneidöl, etc.) die in den Schrotten enthalten sind.

Häufig ist auch eine Reinigung des geschmolzenen Sekundär-Aluminiums von Magnesium („De-Magging“) und anderen Legierungsmetallen erforderlich. Dazu wird in den meisten Fällen Chlorgas in die Schmelze eingeleitet, wodurch die Legierungsmetalle in die Chloride überführt werden und sich mit der Salzschlacke vereinigen. Auch hierbei treten „verborgene“ Energieverluste auf (Herstellung von Chlorgas und von Magnesiummetall, etc.).

Zum Abfallaufkommen vergleiche Tabelle 8.

Tabelle 8 - Abfälle der Sekundäraluminiumerzeugung ***				
Abfall bzw. Reststoff	Anfall	Menge kg/t Al	Behandlung	Anmerkung zur Behandlung
Salzschlacke	Schmelzen im Drehtrommelofen	300-500	Aufarbeiten mit Löse-/ Kristallisationsverfahren, Gewinnung der Wertstoffe Al-Granulat, Mischsalz, NMP**)	Deponieverbot
Filterstaub	Abgasreinigung	10-35 0,1-10 *)	Deponie mit vorgelagerter Behandlung oder Untertagedeponie, teilw. gemeinsam mit Salzschlacke aufgearbeitet, oder Einsatz in Stahlindustrie	keine obertägige Deponierung, thermische Behandlung möglich
Ofenausbruch	Schmelzofen	ca. 2	teilweise gemeinsam mit Krätze aufgearbeitet, sonst Laugung + Deponie	keine obertägige Deponierung, Herstellung von Ofenspritzmassen
*) bei Einsatz des Closed Well Ofens **) Nicht metallische Produkte (Oxiton) ***) Quelle: Umweltbundesamt Wien (1999)				

Beispiel: Aluminiumwerke im Brinker Hafen, Hannover

Im Brinker Hafen in Hannover ist die Fa. Karl Konzelmann GmbH Metallschmelzwerke (früher BAS) angesiedelt, die auch ein Schwesterunternehmen in Neu-Ulm betreibt und heute zu 100 % zur B.U.S. Berzelius Umwelt AG gehört. Die beiden Konzelmann-Werke in Hannover und Neu-Ulm haben je eine Kapazität von 70.000 Tonnen Aluminiummetall pro Jahr und beschäftigen 270 Angestellte (EMC, 2003). Die Produktion der beiden Werke zusammen beträgt ca. 120.000 t Al/a (ca. 1/4 Marktanteil der deutschen Sekundäraluminium-Erzeugung) und begründete in 2001 einen Umsatz von ca. 175 Mill. € (B.U.S., 2001).

Ebenfalls im Brinker Hafen befindet sich die zur B.U.S. Berzelius Umwelt AG gehörende ALSA Aluminium-Salzschlacke Aufbereitungs GmbH (ehemals Hansa) mit 110 Beschäftigten. In diesem Werk wird ähnlich wie bei K+S auf Sigmundshall Salzschlacke recycelt, um daraus Reste von Aluminiummetall, Aluminiumoxid (Oxiton; Serox) und Schmelzsalze zurück zu gewinnen. Zusammen mit dem ALSA Schwesterbetrieb in Lünen (ehemals SEGL) produziert ALSA rund 170.000 Tonnen Oxiton pro Jahr (hazworld.com, 2003) und hat damit beim Recycling von Salzschlacke einen Marktanteil von 44% in Europa. Die Kapazität der ALSA-Anlagen beträgt zusammen 250.000 Tonnen Salzschlacke pro Jahr (EMC, 2003) und ist voll

ausgelastet: 1999 249.000 Tonnen Durchsatz (B.U.S. 1999).

Salzschlacke-Recycling

Typische Salzschlacken (Tabelle 9) enthalten um 10% eingeschlossene Aluminium-

reste, die mit Ausnahme der feinsten Partikel im Salzschlacke-Recycling zurück gewonnen werden können. Hierzu werden die erstarrten Blöcke aus Salzschlacke zunächst gebrochen und abgeseiht um Aluminium-Granalien abzutrennen.

Tabelle 9 - Typische Zusammensetzung von Salzschlacke *		
Inhaltsstoff	Typischer Gehalt (%)	Schwankungsbereich (%)
Metallisches Aluminium	8	5-20
Wasserlösliche Salze	37	20-40
Unlösliche Bestandteile	55	45-75
PCDD/F	5 ng/kg ITEQ (***)	<10 ng/kg ITEQ (***)
*) EU (2000) Non-ferrous metal BREF		
**) Siehe Erläuterungen im Text zur Problematik der Dioxine		

Die verbleibende Salzschlacke, die etwa zur Hälfte aus unreinen Aluminiumoxiden und zur Hälfte aus Salzen besteht, wird nun fein gemahlen und durch Lösungsbehandlung weiter verarbeitet.

Je nach technischem Niveau der Anlagen werden die in der Schlacke enthaltenen Stoffe in unterschiedlichem Maße zurück gewonnen, das Schmelzsatz kann praktisch vollständig, das metallische Aluminium zu mehr als 80 % recycelt werden. Der unlös-

liche Rest, der als Oxiton bezeichnet wird, besteht zu einem hohen Anteil aus Aluminiumoxid. Zurückgewonnenes Metall und Salz (oder Anteile davon) werden in Schmelzwerken wieder zum Erschmelzen von Aluminium eingesetzt. Die Produktionsmenge an Oxiton, die mittlerweile in Deutschland die Größenordnung von 150.000 Tonnen pro Jahr überschritten hat, wird wegen des wachsenden Aluminiumverbrauchs und der steigenden Recyclingrate weiter zunehmen (Vgl. Tabelle 10).

Tabelle 10 - Salzschlacke-Recyclingbetriebe					
Firma/ Kapazität	Eingesetzter Abfall	Input (t/a)	Produkte	Output (t/a)	Quellen
ALSA Werk Hannover (früher HAN-SE) + Werk Lünen (früher SEGL)	Salzschlacke Filterstäube Krätzen Kugelmühlenstaub Tiegel- auskleidungen + Filterkuchen Gasreinigung + Schlämme Metallfällung	~280 000 t	„Serox“ (Oxiton) Ammoniumsulfat Schmelzsalze Aluminium- Granulat	170 000 > 7000	(1-3)
K+S Sigmundshall 100 000 t/a	Salzschlacke	90 000	KCl Montanal Alasal Al-Granulat Ammoniumsulfat Oxiton REKAL-Rückstand	11 800 120 000* 6 000* 3 600 2 600 --- 74 000	(5)
Ur-Chemie Bad Säckingen, Asperg, Dort- mund 60 000 t/a	Salzschlacke (1999) Filterstäube	28 000 ?	Salze Al-Granulat „Oxidur“	18 011 6 155 9 608	(2)
Deutschland insgesamt:	Salzschlacke	380 000			(4)
*) aus primärer Produktion (1) hazworld.com (2) Landesumweltamt NRW (2001) (3) Feige & Merker (2001) (4) VDS (2000) (5) Wöhler (1999)					

Zu den in Deutschland selbst anfallenden Aluminium-Salzschlacken kommen Salzschlackeimporte (Tabelle 11) aus anderen Ländern wie Österreich, Dänemark und sogar USA (Pfaderer, 2002; STENA Aluminium A/S, 2002; Welbourne, 2001) hinzu, die in Deutschland verwertet werden (sollen). Eine vermutlich einmalige Ausnahmesituation war der Import von 33 000 Tonnen schwermetall- und dioxinhaltiger Salzschlacke aus Setubal in Portugal, die dort illegal von der Schweizer Firma Refonda deponiert worden war und auf Betreiben der portugiesischen Regierung auf Kosten (ca. 18 Mill. DM) Portugals und der Schweiz ordnungsgemäß entsorgt

werden musste (Eidgenössisches Departement des Innern, 1997; Ständerat, 1997; The News, 1997). Diese Entsorgung erfolgte über die Firma SEGL (jetzt ALSA) in Lünen, indem das Oxiton dort zum größten Teil auf einer firmeneigenen Deponie auf Waltröper Stadtgebiet endgelagert wurde.

Unter Bezug auf eine Quelle aus 1994 geben Krone und Rombach (1995) die europäischen Salzschlackeaufbereitungskapazitäten mit 640 000 t/a an, während die anfallenden Salzschlacken im gleichen Jahr ca. 500 000 t/a ausmachten.

Ursprung	Al-Kapazität (t/a)	Salzschlacke-Exporte	Quelle
AMAG-ASA (AT)	35 000	20 000 t/a zur Salzschlackeaufbereitung in Deutschland und Norwegen	Pfaderer (2002) Hübner et al. (2000)
STENA Aluminium Kolding (DK)	35 000	9819 t/a Salzschlacke nach Deutschland und Norwegen	STENA Aluminium A/S (2002)
ALCOA Pittsburg (USA)	?	Abreagierte Salzschlacke über Kanada an ALSA	Welbourne (2001)

Beispiel ALSA:

Die ALSA Aluminium-Salzschlacke Aufbereitungs GmbH betreibt zwei zentrale Anlagen, eine in Lünen (NRW) und die andere in Hannover. Der Stoffinhalt der Salzschlacken wird dabei nach Aussage der Industrie komplett verwertet. Als Produkte entstehen:

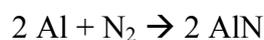
- Salzprodukt (RESAL-Schmelzsalz)
- Aluminium-Metallprodukt
- Oxidprodukt (Oxiton; „SEROX“)
- Ammoniumsulfat.

Das ALSA-Verfahren erfolgt in folgenden Schritten:

- mechanische Zerkleinerung
- Metallabtrennung durch Klassierung
- Auswaschen der Salzkomponenten mit Wasser
- Prozessgasreinigung und Gewinnung von Ammoniumsulfat
- Abfiltrieren der wasserunlöslichen Oxide (SEROX) und
- Auskristallisieren des gelösten Schmelzsalzes RESAL.

Salzschlacken enthalten Verunreinigungen aus Oxiden, Carbiden, Nitriden, Sulfiden, Phosphiden und Arseniden des Aluminiums und evtl. anderer Metalle. Das Aluminiumnitrid beispielsweise stammt daher, dass Aluminium beim Schmelzen an Luft nicht nur mit dem Luft-Sauerstoff reagiert,

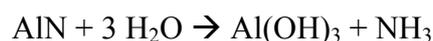
sondern zu einem geringeren Anteil sich auch mit dem Luft-Stickstoff verbindet:



Diese Verbindungen sind bei Kontakt mit Feuchtigkeit instabil und können unter Freisetzung von brennbaren und giftigen Gasen reagieren (Tabelle 12). Außerdem kommt durch die Nassaufbereitung das mechanisch nicht abgetrennte, feinkörnige Rest-Aluminium mit Wasser in Kontakt und reagiert dabei in dem stark korrosiven Milieu zu einem erheblichen Teil zu Aluminiumhydroxid und Wasserstoff:



Das in größeren Mengen freigesetzte Ammoniak entsteht bei der Reaktion von Aluminiumnitrid und Wasser, wobei sich ebenfalls Aluminiumhydroxid bildet. Bei der intensiven Nassaufbereitung des RESAL Prozesses (ALSA) wird das Aluminiumnitrid weitestgehend abreagiert.



Das Ammoniak wird in einer Gasreinigung aufgefangen und zu Ammoniumsulfat-Düngemittel umgewandelt. Ein Restanteil an Ammoniak verbleibt allerdings im Prozesswasser-Kreislauf gelöst. Das filterfeuchte Produkt, allgemein als "Oxiton" bekannt, weist noch einen deutlichen Geruch nach Ammoniak auf. Bei einer Feuchte von 30 - 35 % hat das Oxidprodukt eine

schlammige Konsistenz, mit einer schlechten Förder- und Dosierbarkeit. Zur Verbesserung der Produktqualität wird bei ALSA eine Nachbehandlung durchgeführt, in deren Ergebnis sich die Restfeuchte auf < 25 % verringert. Dieses verbesserte Produkt, "SEROX" genannt, hat eine krümelige, rieselfähige Konsistenz, mit nur noch geringem Geruch nach Ammoniak. Wird SEROX vollständig getrocknet, verflüchtigt sich der Ammoniak und damit verschwindet auch der Geruch. Weitere Gase, die aus Carbiden (Al_4C_3), Phosphiden (AlP), Arseniden (AlAs) und Sulfiden (Al_2S_3) des Aluminiums entstehen, sind Methan (CH_4) und Phosphin (PH_3), untergeordnet auch Arsenwasserstoff (AsH_3) und Schwefelwasserstoff (H_2S). Es gibt

Hinweise, dass außer den oben genannten Gasen auch Cyanwasserstoff in geringen Anteilen enthalten ist (Wöhler, 1999).

Pro Tonne Salzschlacke entstehen ca. 10 m³ (3,6 kg) dieser Gase (Tabelle 12), hauptsächlich Wasserstoff, Methan und Ammoniak, die durch Absaugung in einem Volumenstrom von 5000 m³/h Abluft auf Konzentrationen unterhalb der Explosionsgrenze verdünnt und ins Freie abgeleitet werden. Lediglich der Ammoniak wird durch Wäsche mit Schwefelsäure (0,3 m³/Tonne Salzschlacke) in Form von Ammoniumsulfat gewonnen, das als Düngemittel (!!) verwertet wird. Die toxischen Spurengase werden durch Aktivkohlefilter zurück gehalten.

Tabelle 12 - Zusammensetzung und Heizwert der entstehenden Gase, nach Krone und Rombach (1995)

Gas	Volumenanteil (Liter/m ³)	spez. Heizwert (kJ/Liter)	Heizwert (MJ)
H ₂	400	10,8	4,32
CH ₄	240	35,8	8,59
NH ₃	320		
H ₂ S	40		
PH ₃	3		
AsH ₃	?		
HCN	?		

Der Energieinhalt der Gase, die bei einer Tonne Salzschlacke anfallen, beträgt also 10·(4,32+8,59) MJ, also rund 129 Mega-Joule pro Tonne Salzschlacke.

Zur Auflösung der Salzschlacke werden 12 bis 14 m³ Wasser benötigt, das allerdings bei der Salzurückgewinnung in einem 5-stufigen Vakuumverdampfer wieder zurück in den Kreislauf geführt wird. Somit müssen im Wesentlichen nur Wasserverluste, die durch Restfeuchtigkeit in den Produkten ausgetragen werden, ergänzt werden. Theoretisch ist somit eine praktisch 100-prozentige Verwertung der Salzschlacke sichergestellt.

Nach Krone und Rombach (1995) (unter Berufung auf die Brinker Aluminiumschmelzwerke, BAS) stellte sich 1994 die wirtschaftliche Situation der Salzschlackeaufbereitung folgendermaßen dar:

- Die Aufbereitungskosten lagen bei 165 DM/t
- Das zurück gewonnene Aluminium kann von den Salzschlackeerzeugern abgenommen werden (Anm.d.Verf.: Bei 8% Al-Metall und ca. 2000 DM/t Al erbringt dies ca. 160 DM/t)
- Das wieder gewonnene Schmelzsatz wird ebenfalls für 135 DM/t an die Sekundärhütten verkauft.

Beispiel K+S (REKAL-Verfahren):

Das REKAL-Verfahren (Wöhler, 1999; Diekmann, 2002) wurde von K+S in Anlehnung an das Heißlöseverfahren zur Kalisalz-Aufbereitung entwickelt. Die mechanische Zerkleinerung der Salzschlacke und die Abtrennung der Aluminiummetall-Reste ist hingegen praktisch identisch mit dem Verfahren bei ALSA. Der Unterschied besteht also im nasschemischen Teil und im Abfallaufkommen.

Beim REKAL-Verfahren der K+S wird der lösliche Salzanteil der Salzschlacke nicht in Wasser komplett aufgelöst, sondern in gesättigter, heißer Salzsole (NaCl-Lösung) extrahiert. Durch Verwendung einer gesättigten NaCl-Lösung wird das in der Salzschlacke enthaltene NaCl nicht aufgelöst, sondern nur das wertvollere KCl, das durch anschließende Abkühlung der Salzlösung in reiner Form auskristallisiert und abgetrennt werden kann. Mehr als 80 % der ursprünglichen Salzschlacke verbleiben so als Rückstand (Gemisch aus verunreinigten Aluminiumoxiden und NaCl), der in dieser Form nicht in den technischen Stoffkreislauf rückführbar ist. Bei K+S wird dieser Abfall nicht weiter stofflich getrennt, sondern als „Abdeckmaterial“ auf der Kalihalde von Sigmundshall abgelagert. Nach Auffassung von K+S ist dies keine Beseitigung sondern eine Verwertungsmaßnahme.

Die bei der nassen Salzschlackebehandlung im REKAL-Prozess anfallenden Gase werden gereinigt und in Ammoniumsulfat, Natriumphosphat (und Natriumarsenat ?) und Natriumsulfat umgewandelt (Schneider und Wolf, 1998). Vermutlich wird dazu Natriumhypochlorit als Oxidationsmit-

tel für Phosphin, Arsin und Schwefelwasserstoff eingesetzt. Der verbleibende Anteil besteht dann noch aus Wasserstoff und Methan, die bei K+S zur Strom- und Dampferzeugung eingesetzt werden. Da nur der KCl-Anteil aus der Salzschlacke extrahiert wird, verbleibt ein großer Teil der gasbildenden Verbindungen im REKAL-Rückstand. Da das Material auch nach Durchlaufen des REKAL-Verfahrens noch hochreaktiv und chemisch instabil ist, findet eine vollständige Abreaktion unter Freisetzung der Gase erst auf der Kalihalde statt (Wöhler, 1999).

Die bei der Gasreinigung anfallende phosphat-, (arsenat- ?) und sulfathaltige Lösung, sowie das Ammoniumsulfat, werden zur Herstellung von Düngemitteln (!) verwendet. Auch das aus der Salzschlacke zurück gewonnene Kaliumchlorid wird offenbar als Kalidünger (!) verkauft und nicht zur Herstellung von neuem Schmelzsalz eingesetzt (Schneider und Wolf, 1998; Scheer, 2001; Krone und Rombach, 1995). Die von K+S hergestellten Schmelzsalze sind somit Primärprodukte aus frisch gewonnenen Salzen und keine Recyclingprodukte. (Zur Relevanz für die Schadstoff-Kreisläufe, siehe unten.)

Hergestellte Produkte

Bezogen auf die getrocknete Substanz hat Oxiton bzw. SEROX (Tabelle 13 und 14) eine chemische Zusammensetzung, die durch die Legierungsbestandteile des Aluminium-Metalls (im wesentlichen Silizium und Magnesium), sowie anhaftende Verunreinigungen, z.B. von Farblackierungen, etc. bestimmt wird.

	<i>Serox (Feige und Merker, 2001)</i>	<i>Oxiton (Krone und Rombach, 1995)</i>
Al ₂ O ₃	59 – 63	58 - 66
SiO ₂	7 - 12	7,4
MgO	7 – 10	8,5
CaO	2 - 5	3,2
Fe ₂ O ₃	1,5 - 2	1,8
Na ₂ O + K ₂ O	kA*	1,4
F	1 - 2,5	< 0,25
Cl	< 0,3	1,7
TiO ₂	< 0,2	kA
Glühverlust	ca. 10	kA
Feuchte	kA	30 - 35
Al-Metall	kA	< 2
C	kA	< 1
Cu	kA	0,5 – 1,5
Zn	kA	0,17 – 0,05
Pb	kA	0,15 – 0,0015
Cr	kA	0,05 – 0,0075
Ni	kA	0,03 – 0,01
V	kA	< 0,01
As	kA	< 0,01
Be	kA	< 0,01
Co	kA	< 0,01
Hg	kA	< 0,001
Cd	kA	< 0,001
*) kA = keine Angabe		

<i>Phase</i>	<i>REKAL-Rückstand, salzfrei (Diekmann, 2002)</i>	<i>SEROX (Feige und Merker, 2001)</i>	<i>Oxiton (Krone und Rombach, 1995)</i>
Korund	44	20 - 25	44
Mg-Al-Spinell	32	22 - 27	32
Al-Hydroxide		30 – 35	11
Al-Silikat	6	6 – 10	
Quarz	10		
Fluorit	5	2 - 4	
Natriumsilikat	1		
Ba, Sr-Carbonat	0,6		0,6
Kupfer-Eisen-Sulfide			0,5
Flussspat, Gips			5
Schwermetalle	0,5		
Al-Metall		2 - 3	
Si-Metall		1 - 2 %	
Fe-Metall		1 - 1,5 %	

Oxiton wird besonders in der Zementindustrie als Korrekturstoff zur Einhaltung normgerechter Al_2O_3 -Gehalte eingesetzt und in der Baustoffindustrie als Trockenmittel verwendet. Der größte Teil der in Deutschland anfallenden Oxiton-Mengen wird in Zementwerken in Luxemburg, Frankreich und Dänemark verwertet.

Oxiton ist mittlerweile zu einem Massengut geworden, das auch grenzüberschreitend, zumeist per Lastkahn, gehandelt wird. Dabei behauptet die Industrie, dass Oxiton ein ungefährliches Produkt sei, das auch in der „EU Green List“ (EU, 1999) aufgeführt sei (Hazworld.com, 2003), und das ohne besondere Einschränkungen grenzüberschreitend gehandelt werden könne. Diese Einschätzung trifft wohl nicht zu, denn Oxiton wird in der Green List nicht aufgeführt, und diese Beurteilung widerspricht auch der Erfahrung:

- So ist am 2. Dezember 2002 das Frachtschiff Sierksdorf mit einer Ladung von 3000 Tonnen Oxiton im Hafen von Aalborg explodiert und gesunken. Als Ursache wird die Entzündung von explosiblen Gasen angegeben, nachdem die Mannschaft es versäumt hatte, den Frachtraum vor dem Öffnen der Ladeklappen entsprechend der Sicherheitsvorschriften zu durchlüften (Hazworld.com, 2003). Es ist also bekannt (Sicherheitsvorschriften!), dass Oxiton explosible (und toxische) Gase in nicht unerheblichen Mengen entwickeln kann.
- Im September 2003 kam es in der REKAL-Anlage auf Sigmundshall zu einer Explosion, die einen Schaden von 200 000 € anrichtete (HAZ, 2003).
- Anfang 1997 ereignete sich in Österreich ein Giftgasunfall beim LKW-Transport von Aluminium-Salzschlacke. Einer der Container war undicht und durch diese Beschädigungen gelangten Wasser und Luft an das Gefahrgut; es kam zur exothermen chemischen Reaktion. Ein qualmendes Gemisch aus brennbaren und giftigen

Gasen wurde freigesetzt; die Behälter erwärmten sich durch die entstandene Reaktionswärme. Am Unfallort herrschte akute Explosions- und Vergiftungsgefahr. Messungen ergaben, dass größere Mengen von Ammoniak, nitrosen Gasen und Wasserstoff entwichen. Die Ammoniakkonzentration neben dem Lastzug betrug zeitweise 700 ppm (MAK-Wert 50 ppm). Zehn Polizisten und Feuerwehrleute atmeten die giftigen Gase ein und mussten vorübergehend im Krankenhaus behandelt werden. Zwei Helfer stürzten beim Anbringen einer Plane von der Leiter. (Land Oberösterreich, 2001)

Der Bedarf der deutschen Zementwerke für reine Aluminium-Korrekturstoffe (Oxiton, Alu-Werkstäube, Katalysatorstaub, Al-Hydroxide) lag im Jahr 2000 bei 40 000 t/a. (VDZ, 2002). Im Werk Höver der Holcim AG wurden beispielsweise 1999 zur Herstellung von rund 1 Million Tonnen Klinker ca. 8000 Tonnen Oxiton verwertet (Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, 1999). Die von ALSA an das dänische Zementwerk Aalborg Portland gelieferte Oxitonmenge von 20 000 bis 25 000 t/a (Hazworld.com, 2003) entspricht dem gesamten dänischen Bedarf. Es ist daher evident, dass bei einem Anfallen von derzeit ca. 170 000 Tonnen Oxiton pro Jahr allein in Deutschland neben den bisherigen Abnehmern weitere (hochwertige) Verwertungsmöglichkeiten erforderlich werden.

Grundsätzlich wäre es natürlich vorteilhaft, gerade bei der Verwendung von Aluminium auf Langlebigkeit der Produkte zu achten (also keine Einweg-Verpackungen), damit das Metall weniger häufig recycelt werden muss. Auch dadurch würde sich der Anfall von Oxiton und das Auftreten von negativen Begleiterscheinungen der Aluminium-Metallurgie verringern lassen.

3. Abfälle und Umwelt- auswirkungen

3.1 Schutzgut Wasser

Belastungen der Gewässer durch Salzeinträge

Das versalzene Abwasser der Kalihalde Sigmundshall wurde zusammen mit Abwässern aus der Produktion bis 1995 über den Mordgraben in die Westaue eingeleitet (Abbildung 4). In der Westaue ergaben sich dadurch an der Messstelle Ellernbrücke Chloridkonzentrationen um 800 mg/L, mit Spitzen bis 1500 mg/L. Seit 1995 wird

das Salzwasser durch eine Rohrleitung direkt zur Leine abgeleitet. Jährlich sind es rund 600.000 m³, wovon ein Teil Haldenabwasser ist. Im Mittel führen diese Einleitungen zu einer zusätzlichen Salzbelastung der Leine von ca. 40 mg/L Cl⁻, bei Niedrigwasser steigt der Chloridgehalt aber entsprechend an. Unterhalb der Salzwasser-Einleitung ist die Leine bis zu ihrer Einmündung in die Aller aufgrund der erhöhten Chlorid-Gehalte in die Gewässergüteklasse III (>200 – 400 mg/L Cl⁻, „erhöhte Belastung“) eingestuft worden (Region Hannover, 2003; NLÖ, 2000).

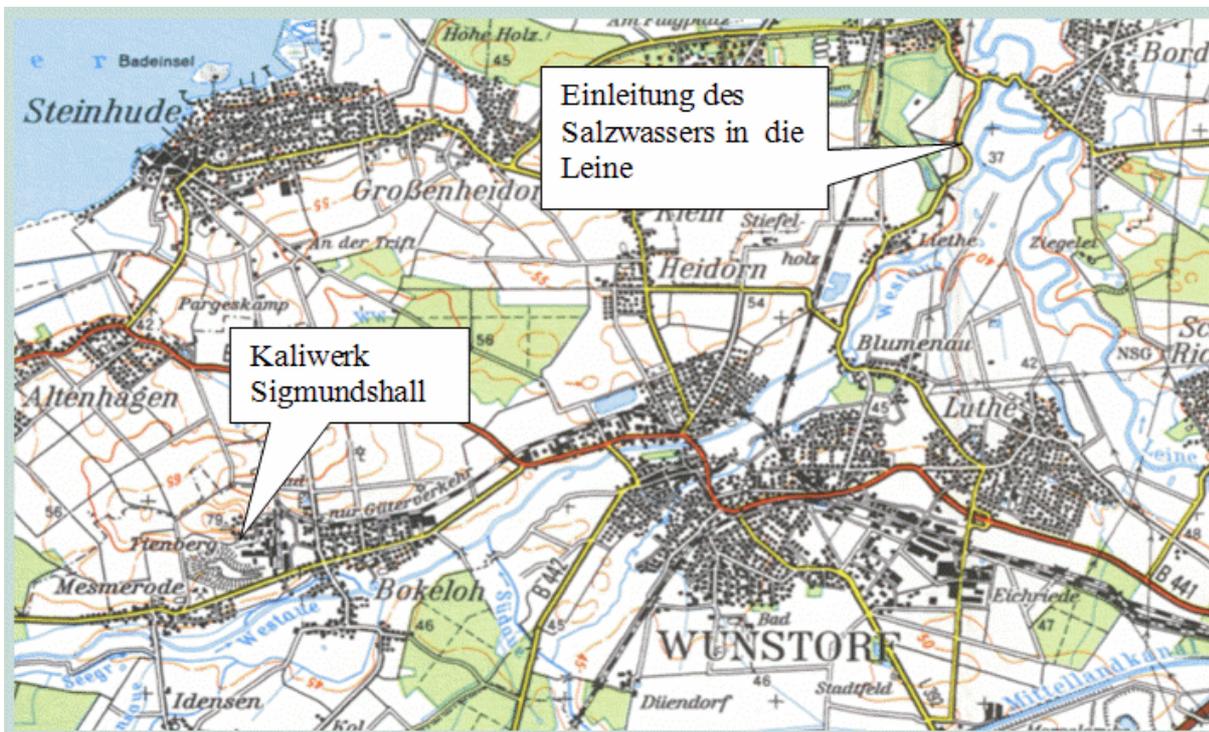


Abbildung 4 – Abwassereinleitungen des Kaliwerkes Sigmundshall

Aufgrund der Durchlässigkeit des Haldenkörpers (Diekmann, 2002) und seines Untergrundes versickert aber auch ein Teil des auf die Halde treffenden Niederschlags im Untergrund und gelangt so ins Grundwasser. Obwohl zumindest die jüngeren Abschnitte der Kalihalde Sigmundshall mit einer dünnen Basisabdichtung aus Ton versehen wurden, so bleiben ältere Teile

der Haldenbasis unabgedichtet (Region Hannover, 2003). Die Wirksamkeit der nur partiellen Basisabdichtung, die zudem mit dem Gelände nach Süden zum Vorfluter hin abfällt, ist daher sehr fraglich.

Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass die Werksleitung von Sigmundshall einräumt (Diekmann, 2002), dass die Hal-

denkörper hoch durchlässig sind. In der Vergangenheit wurde von K+S (Schroth, 1977) nämlich bei anderen Halden behauptet, dass die Versickerung sehr gering sei, z.B. 0,3 % des Haldenwassers in Neuhoellers. Tatsächlich findet nach der zunächst locker geschichteten Aufhaldung der Rückstände eine Kompaktierung und Rekristallisation statt, mit der Folge dass der anfangs vorhandene Porenraum und damit die Wasserwegsamkeit großenteils verschwindet. Gleichzeitig entstehen aber Kompaktionsrisse und nachfolgend karstartige Auswaschungen in dem Haldenkörper, die das Sickerwasser nach unten zur Haldenbasis abführen, was praktisch an allen freigelegten Haldenkörpern beobachtet werden kann.

Aufgrund der bereits begonnenen Abdeckung der Kalihalde mit einer weniger wasserdurchlässigen „Rekultivierungsschicht“ und des Fehlens einer kapillarbrechenden Drainageschicht besteht auch die Gefahr, dass die Abdeckung zusammen mit der Basisabdichtung ein wannenartiges Staubecken um den Haldenkern aus Salz herum ausbildet. Dadurch kann sich im Haldenkern ein schwebendes „Grundwasserstockwerk“ ausbilden, welches mit einem, seiner Stauhöhe proportionalen hydrostatischen Druck die Filtergeschwindigkeit durch die Basisabdichtung vergrößert und außerdem aufgrund des erhöhten Porenwasserdrucks im Bereich des Böschungsfußes Böschungsbrüche begünstigt.

Der geologische Untergrund der Halde Sigmundshall besteht aus wenige Meter mächtigen pleistozänen Sanden und Schluffen, die durch sandigen Löß überlagert sind. Darunter stehen mächtige sandig-kiesige Schmelzwasserschichten des Pleistozäns an, die den regional wichtigsten Grundwasserleiter bilden (Geol. Karte 1:25 000, Blatt Wunstorf). Somit kann bei den Sedimenten im Untergrund der Kalihalde nicht von einer natürlichen Barriere Wirkung ausgegangen werden. Dies bedeutet für die Anwendung der Technischen Regeln der LAGA (1997), bzw. der LAB (2002) (siehe unten), dass von ungünstigen hydrogeologischen Bedingungen für die Verwertung von mineralischen Reststoffen auszugehen ist und deshalb nur Materialien der Einbauklasse Z1.1 verwendet werden dürfen.

Bei einer Grundfläche von 36,1 ha und einem mittleren jährlichen Niederschlag von 643 mm ergibt sich eine Niederschlagsmenge auf der Haldenfläche von 227 430 m³/a. Geht man von rund 800 000 t/a deponierter Rückstandssalze mit einem Feuchtegehalt von 5-6 % aus (EU, 2003b), so kommen weitere 44 000 m³/a Wasser hinzu. Abflussmengen von Haldenwasser werden von Wöhler (1999) angegeben, wobei leider durch fehlende Angaben der genauen Bezugsfläche eine gewisse Unsicherheit bleibt.

Tabelle 15 - Versuch einer Wasserbilanz für Halde Sigmundshall

	<i>Einträge</i>	<i>Austräge</i>
Niederschlagswasser	227 430 m ³ /a	
Haftwasser	44 000 m ³ /a	
Versickerung		<i>Zusammen ca. 108 430 m³/a</i>
Verdunstung		
Haldenabfluss		163 000 m ³ /a *
Summe	271 430 m ³ /a	271 430 m ³ /a

*) Mittelwert aus den Jahren 1994-1997 nach Wöhler (1999)

Aus der Wasserbilanz (Tabelle 15) kann die Summe aus Verdunstung und Versickerung abgeschätzt werden, die etwa 40 %

des Wasserhaushalts ausmacht. Für Salzhalden können die üblichen Verdunstungsraten nicht übertragen werden, weil es sich

bei der anhaftenden Feuchtigkeit um gesättigte und daher stark hygroskopische Salzlösungen handelt. (Beispielsweise ist der Wasserdampfpartialdruck einer 6-molaren (gesättigten) NaCl-Lösung nur 0,7598 des Dampfdruckes von reinem Wasser (Robinson & Stokes, 1968; eine gesättigte MgCl₂-Lösung hat gar eine Wasseraktivität von nur 0,3814.) Es ist daher sogar möglich, dass durch den hygroskopischen (besser: isopiestic) Effekt Nettoeinträge von Wasser in die Halde stattfinden, wenn insgesamt mehr Luftfeuchtigkeit aus der Umgebung absorbiert wird als Haftwasser zu Zeiten geringer Luftfeuchtigkeit verdunstet. Man muss daher aufgrund der Wasserbilanz wohl davon ausgehen, dass im Bereich der Halde Sigmundshall trotz aller Gegenmaßnahmen gesättigte Salzlösungen in der Größenordnung von 100 000 m³/a (oder mehr) im Untergrund versickern.

Ein direkter Hinweis auf Salzeinträge ins Grundwasser liegt in Form eines Berichts über die Versalzung privater Brunnen im Grundwasserabstrom der Kalihalde vor. Ein in den 70er Jahren angelegter Bewässerungsbrunnen im Ostteil von Mesmerode weist seit 2002 hohe Salzgehalte auf und gibt damit einen Hinweis auf die Ausbreitungsdynamik der Salzfahne im Grundwasserkörper.

Der gesamte, nur von der Halde Sigmundshall ausgehende Salzeintrag (als NaCl) in Oberflächen- und Grundwasser kann aufgrund der Haldenbasisfläche und der mittleren jährlichen Niederschlagsmenge und des eingebrachten Haftwassers, sowie der Löslichkeit von Salz auf ca. 98 000 Tonnen pro Jahr beziffert werden (Annahme: Nettoverdunstung ± 0) . Hinzu kommen die Salzeinträge aus Produktionsabwässern in die Leine (Tabelle 16).

	Grundwasser	Leine
Haldenabwässer	~ 100 000 m ³ /a	163 000 m ³ /a
Produktionswässer	-	437 000 m ³ /a
Summe	~ 100 000 m ³ /a	600 000 m ³ /a

Die deponierte Salzmenge von bis heute ca. 30 Millionen Tonnen (30 000 Güterzüge à 1000 Tonnen) NaCl entspricht rund 18 Millionen Tonnen Chlorid. Der Grenzwert der Trinkwasserverordnung für Chlorid beträgt 250 mg Cl⁻ /Liter (entspricht 1 kg Cl⁻ Ionen pro 4 m³ Wasser). Bis zu ihrer vollständigen Auflösung und Verdünnung auf „Trinkwasserqualität“ werden somit im Laufe der Zeit von der Kalihalde Sigmundshall bis zu 72 Milliarden m³ (72 Kubik-Kilometer !) Grundwasser oder Oberflächenwasser unbrauchbar gemacht. Vergleich: In Deutschland wurden 1995 insgesamt 6.528.000.000.000 Liter (entspricht 6,5 Kubik-Kilometer) für Trinkwasserversorgung gefördert.

Bei einer durchschnittlichen Ablaugung (Auflösung) der Halde durch Niederschlagswasser von ca. 10 cm pro Jahr, er-

rechnet aus Salzlöslichkeit und mittlerem jährlichen Niederschlag, wird die Kalihalde mit ca. 135 m Endhöhe in rund 1350 Jahren aufgelöst sein. Bei einer Abdeckung wird sich die Auflösungsrate verringern und die Altlast entsprechend länger bestehen. Wenn also die Rückstandshalde nicht beseitigt wird, so werden über das dritte Jahrtausend hinaus die Trinkwasserressourcen künftiger Generationen zunehmend durch Versalzung unbrauchbar.

Seit Aufnahme der Hartsalzverarbeitung muss damit gerechnet werden, dass außer NaCl besonders auch Magnesiumsalze in den Abwässern auftreten, die zu einer Aufhärtung des Wassers im Vorfluter und im Grundwasser führen.

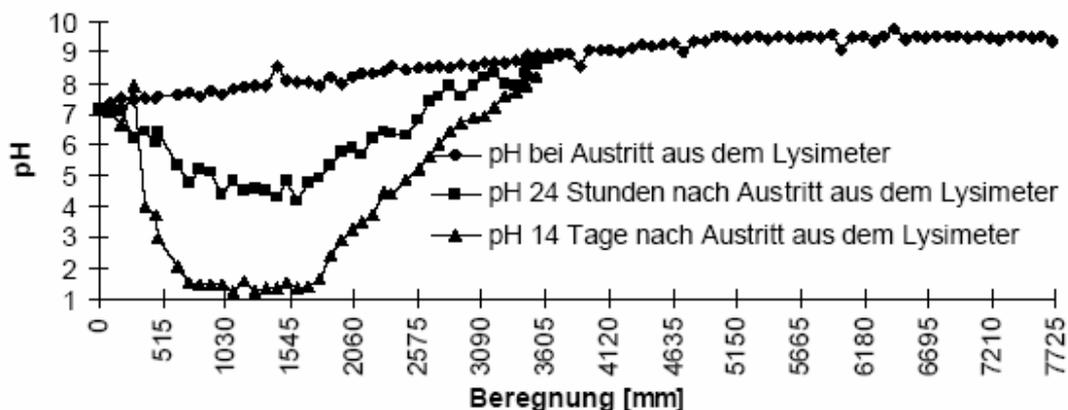
Eine zusätzliche Belastung der Gewässer kommt durch organische Hilfsstoffe zu-

stande, die im elektrostatischen Aufbereitungsprozess und bei der Flotation verwendet werden. Es sind dies beim Flotationsverfahren „stärkeähnliche Stoffe“ als Tondrücker und Alkylamine als Sammler; beim ESTA Verfahren vermutlich Salicylsäure oder Glykolsäure (Gerland, 2000; Beier, 1996; Singewald, 1991). Obwohl die verwendeten Konzentrationen relativ gering sind (normalerweise < 100 g/Tonne Rohsalz), ist die absolute Menge aufgrund des Massedurchsatzes nicht unerheblich (bei 12 000 Tonnen Pro Tag also < 1,2 t/d). Die verwendeten Stoffe führen zunächst zu einer Erhöhung des organischen Kohlenstoffgehaltes und damit des chemischen und biologischen Sauerstoffbedarfs. Inwieweit auch eine spezifische Schädigung durch die einzelnen Substanzen besteht, ist nicht bekannt.

Zusätzliche Gewässerbelastungen durch REKAL-Rückstände

Für die Gewässerbelastungen sind besonders die Schadstoff-Konzentrationen in Eluaten von den REKAL-Rückständen und den beigemischten Rauchgasreinigungsrückständen und Wirbelschichtaschen von Bedeutung.

Die Behandlung des salzfreien REKAL-Rückstands und des SAV-Stabilisats (Rauchgasreinigungsrückstände) mit demineralisiertem Wasser (Standard-Verfahren DEV S4) durch Wöhler (1999) belegen zwar nur eine relativ geringe Mobilisierung der untersuchten Schwermetalle; betrachtet man hingegen die Ergebnisse der Extraktion mit einem salzhaltigen Elutionsmittel (Salzlösung), so liegen alle gefundenen Schwermetallgehalte in der Nähe oder oberhalb der Zuordnungswerte Z1.2 / W1.2 und erst recht Z1.1 / W1.1 (LAGA, 1997 / LAB, 1998). Besonders hoch sind die Überschreitungen bei Cu, wo im REKAL-Rückstand fast 30 ppm mobilisiert werden und im SAV-Stabilisat über 1 ppm. Extrem ist auch die Mobilisierung von Quecksilber im SAV-Stabilisat, wo 140 ppb nachgewiesen werden konnten. Da die REKAL-Rückstände selbst hoch salzhaltig sind, ist hier nur die Elution mit Salzlösungen relevant, die eine sehr signifikante Mobilisierung der Schwermetalle unter Einbaubedingungen nahe legt. Es zeigt sich, dass für die untersuchten Schwermetalle As, Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Hg, Zn (Wöhler, 1999) auch die Geringfügigkeitschwelle für Infiltration ins Grundwasser (LAB, 1998) zum Teil um mehrere Größenordnungen überschritten wird.



pH-Werte im Eluat des Lysimeters L3 bei Austritt aus dem Lysimeter, 24 h nach Austritt aus dem Lysimeter und 14 Tage nach Austritt aus dem Lysimeter

Abbildung 5 – pH-Werte im Eluat von Lysimeterversuchen (nach Wöhler, 1999).

Ein weiteres Problem stellen die extremen pH-Werte dar, die durch die aufgebrachten REKAL-Rückstände hervorgerufen werden. Zunächst sind die Salzschlacken und besonders die Rauchgasreinigungsrückstände und Wirbelschichtaschen stark basisch, aufgrund der freien Basen, besonders CaO. In Kontakt mit Wasser stellen sich, begrenzt durch die Löslichkeit von $\text{Ca}(\text{OH})_2$, pH-Werte bis ca. pH12 ein. Durch Aufnahme von CO_2 aus der Luft werden diese alkalischen Lösungen jedoch nach und nach neutralisiert.

Auf die Bildung stark saurer Lösungen infolge nicht ganz geklärter Vorgänge hat Wöhler (1999) hingewiesen (Abbildung 5): Bei Lysimeterexperimenten mit REKAL-Rückständen wurde beobachtet, dass Eluate die längere Zeit aufbewahrt wurden, extrem saure pH Werte (bis unter 0,25) annehmen konnten. Wöhler (1999) nimmt an, dass neben dem Verlust von Ammoniak aus der Lösung Redoxreaktionen eine Rolle spielen, die vermutlich durch mikrobielle Prozesse ausgelöst werden. Jedenfalls impliziert die Bildung einer fast 1-normalen Säure entsprechend hohe Konzentrationen einer Ausgangssubstanz. Von den bekannten Inhaltsstoffen kämen nur Ammoniumsalze in Frage:



Demnach müssten die Ammoniumkonzentrationen bis zu 0,5 mol/L in den Lysimeterlösungen erreichen.

Es ist daher offensichtlich, dass auch die speziell für Salzhalden definierten Kriterien für die Verwertbarkeit mineralischer Reststoffe (LAB, 1998), die besonders auf das Schutzgut Grundwasser abzielen, in fast allen Punkten durch die aufgebrachten „Rekultivierungs-Materialien“ deutlich verfehlt werden.

3.2 Schutzgut Boden

Im Bereich der Rückstandshalde wird der Boden durch die deponierten Rückstandsalze als Standort für Pflanzen, aber auch für alle anderen üblichen und hochwertigen Nutzungsformen, praktisch wertlos. Insofern wäre es interessant der Frage nachzugehen, was das Bergrecht unter „Wiedernutzbarmachung“ der vom Bergbau in Anspruch genommenen Flächen versteht. Das Bundesberggesetz (BBergG) sagt dazu lediglich in den Begriffsbestimmungen des § 4 Absatz (4): *Wiedernutzbarmachung ist die ordnungsgemäße Gestaltung der vom Bergbau in Anspruch genommenen Oberfläche unter Beachtung des öffentlichen Interesses.* Der Länderausschuss Bergbau (LAB, 1998) sagt: *„Bei der Wiedernutzbarmachung sind dabei insbesondere die Folgenutzung und – soweit möglich – auch die regionalen Bodenverhältnisse zu berücksichtigen“.* Weiter wird, speziell für Salzhalden gefordert: *„Die mit der Überdeckung herzustellende neue Haldenkontur soll sich durch natürliche Schüttwinkel, Böschungsneigungen, naturnahe Übergänge im Bereich des Böschungsfußes sowie des Überganges im Plateaubereich in die Umgebungslandschaft einfügen“.* Besonders im Flachland der Norddeutschen Tiefebene (z.B. Sigmundshall) ist letztere Forderung praktisch nur durch Haldenrückbau (z.B. komplette stoffliche Verwertung) zu realisieren.

Bei der Abdeckung von Salzhalden fordert der LAB (1998) auch, dass die aufgebrachten Abdeckmaterialien kapillARBrechende Eigenschaften aufweisen müssen und damit einen Aufstieg von Salzwasser infolge der kapillaren Saugspannung in engen Porenräumen verhindern. Da die REKAL-Rückstände von tonartiger Konsistenz sind, ist diese kapillARBrechende Eigenschaft (im Gegensatz z.B. zu grobem Bauschutt) aber gerade nicht vorhanden und eine entsprechende Zwischenschicht mit kapillARBrechenden Eigenschaften fehlt offensichtlich.

Im konkreten Fall will K+S seiner Verpflichtung zur Wiedernutzbarmachung der Haldenfläche durch Abdeckung und anschließende Begrünung der Halde nachkommen. Es bleibt jedoch die Frage, selbst unter der utopischen Prämisse, dass die getroffenen Maßnahmen tatsächlich dauerhaft der Erosion Stand halten könnten, welche Folgenutzung eine begrünte Rückstandshalde mit Böschungswinkeln um 35 Grad gegen die Horizontale, einem instabilen, nicht tragfähigen Untergrund und einem hoch schadstoffhaltigen „Boden“-Substrat ermöglichen könnte, z.B. im Vergleich zu dem zuvor in Anspruch genommenen Ackerland? Man kann die Frage auch dahingehend formulieren, welche Verbesserung der Nutzbarkeit der Halde durch die „Wiedernutzbarmachungs-Maßnahme“ eventuell eintreten könnte?

Auch bei wohlwollender Betrachtungsweise ist eine Wiederherstellung verloren gegangener Nutzungsmöglichkeiten nicht erkennbar! Im Gegenteil: Durch die Aufbringung der REKAL-Rückstände vergrößert sich das Haldenvolumen, das Schadstoff-Inventar wird ebenfalls vergrößert und das Schadstoff-Spektrum wird um zahlreiche Schadstoffe erweitert. Eine zukünftige Nutzungsmöglichkeit der Rückstandshalde im Sinne einer stofflichen Verwertung der deponierten Salze wird durch die Vermischung und Verunreinigung mit Sonderabfällen in Frage gestellt.

In seiner Dissertation, die von K+S finanziert wurde, schreibt Wöhler (1999): *Mögliche Entsorgungswege für Salzschlacken waren bis vor kurzem die Verklappung auf hoher See, die seit 1998 nicht mehr erlaubt ist (Hohe-See-Einbringungsgesetz, 1998) oder die geordnete Deponierung auf Hausmülldeponien, die aufgrund der Salzgehalte der TA Siedlungsabfall (1993) zuwiderhandelt.* Es drängt sich daher der Verdacht auf, dass die „Rekultivierung“ der Rückstandshalde mit REKAL-Rückständen lediglich das Alibi für eine nicht ordnungsgemäße (also illegale) Deponierung von problematischen Abfällen

liefern soll, die alle Merkmale einer umweltgefährdenden Abfallbeseitigung trägt.

Von Wöhler (1999) werden folgende „Rekultivierungsmaterialien“ genannt:

- *REKAL-Rückstand: Abfälle aus der Behandlung von Salzschlacken Krätzen (EAK 10 03 10) bzw. unter Berücksichtigung der LAGA 1997b Salzschlacken aus der Zweitschmelze*
- *SAV-Stabilisat: Reaktionsabfälle auf Kalziumbasis aus Rauchgasentschwefelung in fester Form (EAK 10 01 05). Das SAV-Stabilisat ist ein Kraftwerksrückstand z.B. des Gemeinschaftskraftwerks Hannover (GKH)*
- *WSA-Stabilisat: Rost- und Kesselasche (EAK 10 01 01).*

Wöhler's (1999) Abkürzung „SAV“ steht für „Sprühabsorptionsverfahren“ und „WSA“ für „Wirbelschichtasche“. Das „WSA-Stabilisat“ entstammt einer Wirbelschichtfeuerung der Anlage Nord der VW Kraftwerksgesellschaft mbH (Wolfsburg). Die von Wöhler (1999) genannten EAK-Nummern beziehen sich auf eine überholte Fassung des Europäischen Abfallartenkatalogs. Nach der aktuellen Fassung (EAK, 2002) gelten folgende Bezeichnungen, wobei evtl. weitere Positionen hinzukommen:

- 10 03 29* gefährliche Stoffe enthaltende Abfälle aus der Behandlung von Salzschlacken und schwarzen Krätzen
- 10 03 30 Abfälle aus der Behandlung von Salzschlacken und schwarzen Krätzen mit Ausnahme derjenigen, die unter 10 03 29 fallen
- 10 01 05 Reaktionsabfälle auf Calciumbasis aus der Rauchgasentschwefelung in fester Form
- 10 01 01 Rost- und Kesselasche, Schlacken und Kesselstaub mit Ausnahme von Kesselstaub, der unter 10 01 04 fällt

Aufgrund der in Anhang III der EU-Richtlinie 91/689/EWG festgesetzten Kriterien erfüllen die REKAL-Rückstände ohne weiteres die Merkmale für „gefährliche Abfälle“ und fallen daher unter die EAK-Nummer 10 03 29*. („Gefährliche Abfälle“ des EU-Rechts entsprechen den „besonders überwachungsbedürftigen Abfällen“ des deutschen Abfallrechts, also Sondermüll.) Gefährlich sind die REKAL-Rückstände insbesondere wegen ihrer Schwermetallgehalte, ihrer möglichen Dioxin-, Furan- und PCB-Gehalte, sowie Resten von Verbindungen, die unter Freisetzung brennbarer, explosibler und toxischer Gase reagieren können:

Schwermetalle:

Die folgenden Tabellen (Tabelle 17 bis 20) geben chemische Analysen und andere relevante Daten von REKAL-Rückständen, Rauchgasreinigungsrückständen und Wirbelschichtaschen wieder (aus der Arbeit von Wöhler, 1999). Es zeigt sich, dass bei den Gesamtgehalten von Schwermetallen vor allem Kupfer in recht hohen Konzentrationen vorliegt, aber auch Zink, Blei, Nickel und Chrom sind auffällig hoch. Die Gehalte des REKAL-Rückstands liegen bei Cu, Cr, Ni, Pb und Zn oberhalb der LAGA-Zuordnungswerte für die Zuordnungsgruppe Z 1.2 für Boden. Die löslichen Salzgehalte des REKAL-Rückstandes liegen nach Wöhler (1999) zwischen 0,3 und 52,4 Gew.%. Als „Standardwert“ gibt Wöhler (1999) 34,4 Gew % Salze an.

Tabelle 17 - Gesamtgehalte in der Festsubstanz von REKAL-Rückstand, SAV-Stabilisat und WSA-Stabilisat nach DEV S7 (Königswasseraufschluß), sowie Zuordnungswerte nach LAGA (1997). (Nach Wöhler, 1999)

ppm	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Tl	Zn
REKAL-Rückstand	1	1	365	3.090	1	337	300	0,1	1.000
REKAL-Rückstand (K+S)	0,9	4	612	1.643	< 0,1	116	372	< 0,1	629
SAV-Stabilisat	33	< 2	55	129	0,7	120	100	0,5	100
SAV-Stabilisat	24	< 1	121	128	0,6	154	112	< 0,5	215
WSA-Stabilisat	39	< 2	56	102	0,7	94	200	0,5	500
WSA-Stabilisat	< 28	< 1	106	130	1,6	118	110	0,5	317
Z 1.1(LAGA)*	30	1	100	100	1	100	200	1	300
Z 1.2(LAGA)*	50	3	200	200	3	200	300	3	500

*) Z-Werte (Zuordnungswerte) sind Grenzwerte, die für genau definierte Einbaubedingungen festgelegt wurden. Je höher die technischen Sicherungsmaßnahmen, desto höher sind die Zuordnungswerte. Die W-Werte des Länderausschusses Bergbau (LAB) entsprechen zahlenmäßig den Z-Werten der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA).

Tabelle 18 - Elementgehalte mit Königswasseraufschluß (DEV S7; Analyse mit ICP-AES) und Röntgenfluoreszenz-Analyse (XRF) von REKAL-Rückstand, SAVStabilisat und WSA-Stabilisat (Nach Wöhler, 1999)

Element	REKAL Rückstand		SAV Stabilisat		WSA Stabilisat	
	DEV S7 (ppm)	XRF (%)	DEV S7 (ppm)	XRF (%)	DEV S7 (ppm)	XRF (%)
Al	117.000	31,0	25.000	7,7	42.000	9,4
As	< 2		33		39	
Ba	510		31		76	
Ca	15.000		157.000		137.000	
Cd	< 2		< 2		< 2	
Cr	365		55		56	
Cu	3.090	0,5	129	<0,1	102	<0,1
Fe	9.000	1,2	25.000	3,7	35.000	6,5
Hg	< 0,2		0,7		0,7	
K	30.000	5,5	4.000	1,8	9.000	3,1
Mg	11.000	4,9	6.000	0,7	7.000	0,8
Mn	1210		377		657	
Na	130.000	6,3	3.000	0,9	2.000	0,6
Ni	337		120		94	
PO ₄ / P	400	<0,1	5.000	0,2	3.000	0,1
Pb	300		100		200	
S	200	0,4	5.400	11,0	33.000	4,5
Si	131	3,3	111	8,8	129	13,0
Ti		0,4		0,5		0,5
Sr	186		374		345	
Zn	1.000	0,2	100	<0,1	500	0,1
Br	< 250		< 250		< 250	
Cl	203.000	17,0	17.000	2,6	1000	0,2
CO ₃	5.000		25.000		4.000	
F	3.900		480		370	
NO ₃	531		575		575	
NH ₄	283		< 50		< 50	
Al	117.000		25.000		42.000	
As	< 2		33		39	
Ba	510	0,1	31	0,1	76	0,1
Ca	15.000	2,3	157.000	20,0	137.000	21,0
Cd	< 2		< 2		< 2	
Cr	365		55		56	
Cu	3.090		129		102	
Fe	9.000		25.000		35.000	
Hg	< 0,2		0,7		0,7	
K	30.000		4.000		9.000	
Mg	11.000		6.000		7.000	
Mn	1210	0,2	377	<0,1	657	0,1

Tabelle 19 - Schwermetallgehalte im Eluat von salzhaltigem und salzfreiem REKAL-Rückstand sowie SAV-Stabilisat unter Verwendung der Extraktionsmittel aqua demin. (H₂O) und Salzlösung nach DEV S4 (nach Wöhler, 1999)

	Cd (µg/L)	Cr (µg/L)	Cu (µg/L)	Hg (µg/L)	Ni (µg/L)	Pb (µg/L)	Zn (µg/L)
REKAL-Rückstand salzfrei – H ₂ O demin.	< 2	< 2	8	0,02	< 3	< 20	< 50
REKAL-Rückstand salzfrei – Salzlösung	35	21	29 750	0,11	1 049	6 770	10 880
REKAL-Rückstand salzhaltig – H ₂ O demin.	< 2	< 2	10	n b	< 12	< 50	< 5
REKAL-Rückstand*	< 100	< 100	< 100	< 1,00	< 100	<100	< 100
SAV-Stabilisat – H ₂ O demin.	< 2	3	13	0,06	2	< 20	< 50
SAV-Stabilisat– Salzlösung	5	50	1 221	139,00	174	391	253
SAV-Stabilisat	< 0,5	63	< 5	< 0,50	< 5	10	< 50
<i>Zuordnungswert Z 1.1 (LAGA, 1997)</i>	2	30	50	0,2	50	40	100
<i>Zuordnungswert Z 1.2 (LAGA, 1997)</i>	5	75	150	1	150	100	300
<i>Zuordnungswert W1.1 Eluat für Boden (LAB, 1998)</i>	2	30	50	0,2	50	40	100
<i>Zuordnungswert W1.2 Eluat für Boden (LAB, 1998)</i>	5	75	150	1	150	100	300
<i>Geringfügigkeitsschwellen (LAB, 1998)**</i>	5	8	50	1	20	10 (25)	40
* Herstellerangaben (K+S)							
** Tabelle II.3.2.2.1.2 (LAB, 1998) enthält zahlreiche weitere Parameter, u.a. für Arsen, Cyanid und Fluorid, sowie für organische Parameter, inkl. PCDD/F und PCB							

Tabelle 20 - Weitere Angaben zur Zusammensetzung von Abdeck-Materialien (nach Wöhler, 1999)

	„REKAL-Rückstand“ (Salzschlacke)	„SAV Stabilisat“ (Rauchgasreinigungsrückstände)	„WSA Stabilisat“ (Kraftwerksaschen)
EAK Nummern (2002)	10 03 30 10 03 29*	10 01 05	10 01 01
Salzgehalt (%)	34,4	7,4	1,8
pH _(CaCl₂)	7,2	12,6	12,1
pH _(H₂O)	7,4	12,7	12,3
C _{ges} (%)	1,26	3,86	27,14
N _{ges} (%)	0,13	0,93	0,51

Der Vergleich der Elutionswerte der Salzlösung mit den Zuordnungswerten Z 1.2 (entsprechend W1.2 des LAB, 1998) für das Schutzgut Boden nach LAGA (1997) ergibt, dass die Zuordnungs-/Überwachungswerte in fast allen Fällen deutlich überschritten werden. Für Salzhalden gelten aber nach LAB (1998) grundsätzlich die strengeren Zuordnungswerte W1.1. Erst recht werden die Geringfügigkeitsschwellen zur Beurteilung von Grundwasserverunreinigungen (LAB, 1998) überschritten. Ein Einbau der verwendeten Abdeckmaterialien auf der Kalihalde Sigmondshall ist also aufgrund der angeführten Regelwerke unzulässig.

Dioxine, Furane, PCBs und die Problematik ihres Nachweises

Dioxine und Furane (oft kurz als „Dioxine“ zusammengefasst) bezeichnen Stoffgruppen zahlreicher Einzelverbindungen mit gemeinsamer Grundstruktur (Abbildung 6). Das bekannteste unter ihnen, das Seveso-Dioxin 2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo-p-Dioxin oder kurz „TCDD“, ist durch vier Chloratome an den 2,3,7, und 8-Bindungsstellen gekennzeichnet. Polychlorierte Biphenyle (PCB) (Abbildung 6) sind enge Verwandte und Vorläuferstoffe der Dioxine und werden oft mit diesen gemeinsam bewertet.

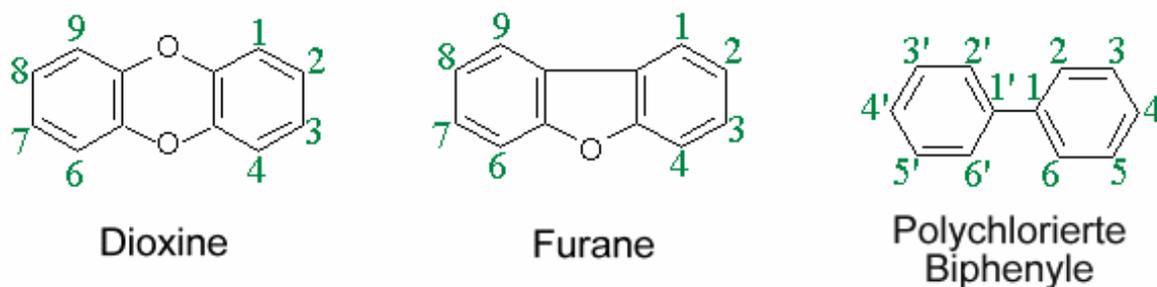


Abbildung 6 – Strukturformeln von Dioxinen, Furanen und polychlorierten Biphenylen (PCB)

Betrachtet man nur reine Chlor-substituierte Dibenzo-Dioxine und -Furane, so gibt es 75 verschiedene Dioxin-Varianten und 135 verschiedene Furan-Varianten. Diese Varianten werden im Fach-Chargon „Kongeneren“ genannt. Von den insgesamt 8 substituierbaren H-Atomen im Dioxin- bzw. Furan-Molekül kann jedes durch Fluor-, Chlor-, Brom-, Iod-, oder auch durch andere Gruppen, ersetzt werden. Unter Beachtung der verschiedenen möglichen Isomere ergibt sich eine Zahl von vielen Tausend möglichen heteropoly-halogenierten Kongeneren, die alle einzeln analysiert werden müssten, um eine vollständige Aussage zu erhalten. Da dies in der Praxis nicht annähernd möglich ist, hat man sich einstweilen darauf verständigt, jeweils nur 17 bestimmte, besonders giftige (soweit durch spezifische Untersuchungen bekannt) und gut messbare Kongeneren zu analysieren und aus den Messwerten eine Kenngröße, den I-TEQ-

Wert zu bilden. Dem 2,3,7,8-TCDD wird dabei der Wichtigkeitsfaktor (Toxizitätsequivalent) 1,0 zugewiesen, den anderen Kongeneren ein stoffspezifischer Wert kleiner 1,0. Die Summe der ausgewählten und so gewichteten Konzentrationen ist der I-TEQ-Wert. Es gibt inzwischen mehrere Bewertungssysteme, die teilweise unterschiedliche Kongeneren berücksichtigen und identischen Kongeneren auch z.T. unterschiedliche Toxizitätsequivalente zuschreiben (Dänisches Umweltministerium, 2003). Für PCBs hat man ebenfalls Toxizitätsequivalente eingeführt, die sich analog zu den Dioxinen am Wert 1,0 für 2,3,7,8-TCDD orientieren. Es gibt 209 PCB Kongeneren (reine Chlor-PCB), die man durchnummeriert hat. Das PCB 126 beispielsweise hat ein TEQ von 0,1, womit deutlich wird, dass PCB kaum weniger giftig sind als Dioxine und Furane. Wenn man andere

Substituenten als Chlor berücksichtigt, so steigt auch hier die Zahl der möglichen Verbindungen in die Tausende.

Dioxine, Furane und PCBs entstehen besonders (aber nicht ausschließlich) bei thermischen Prozessen, und ihre Entstehung wird durch Temperaturen zwischen 150 und 800°C, besonders effektiv zwischen 200 und 450°C, begünstigt. Weitere Bildungsfaktoren sind basische Umgebungsbedingungen, die Anwesenheit von Halogenen und die Gegenwart von katalytisch wirksamen Metallverbindungen (besonders Kupfer).

Das Verteilungsmuster der verschiedenen Kongenere, auch Kongeneren-Profil genannt, hängt von zahlreichen Anlagen-, Prozess-, Einsatzstoff- und anderen Parametern ab, ist aber für vergleichbare Prozesse in der Regel ähnlich, für verschiedene Prozesse durchaus stark verschieden. Es ist daher fraglich, ob ein aus 17 standardisierten Einzelmessungen zusammengesetzter Kennwert, der weniger als ein Promille der unterschiedlichen Kongenere betrachtet, also mehr als 999 Promille der Verbindungen ignoriert (!), und nur die chloresubstituierten Verbindungen berücksichtigt, ein zuverlässiges und repräsentatives Beurteilungsinstrument für alle denkbaren Fälle darstellen kann. Es besteht keine Gewähr, dass bei solcher Vorgehensweise die wichtigsten (häufigsten und giftigsten) Kongenere eines unbekanntem Kongeneren-Profiles erkannt werden.

Zweifel sind unter anderem dann angebracht, wenn in dem betrachteten Prozess auch signifikante Mengen anderer Haloge-

ne beteiligt sind. Bei der Sekundäraluminiumschmelze wird Schmelzsalz verwendet, welches überwiegend aus Chloriden besteht, aber bis 6 Gewichtsprozent Fluoride sowie nennenswerte Gehalte an Bromiden enthält, die als natürliche Verunreinigung in den Salzen enthalten sind. Krone und Rombach (1995) nennen KBr-Gehalte in Montanal von 0,2 %.

Nach Aussagen von K+S sind die Gehalte an halogenierten Dibenzodioxinen und Dibenzofuranen in den REKAL-Rückständen auf Sigmundshall sehr gering und unbedenklich (Leinezeitung, 2003). Analysenergebnisse und Hintergrundinformationen wurden bislang aber nicht veröffentlicht. Auch wegen der oben geschilderten Unzulänglichkeiten der I-TEQ als Bewertungsmaßstab ist es daher sinnvoll, sich nicht allein auf vereinzelte (oder fehlende) I-TEQ Angaben zu verlassen, sondern weitere Informationen über den Entstehungsprozess der Salzschlacken hinzu zu ziehen.

So ist bekannt, dass die Sekundäraluminiumhütten bei den Dioxinemissionen über den Luftweg nach wie vor zu den wichtigsten punktförmigen Emissionsquellen zählen (Österreichisches Parlament, 1999; UN, 2001). Dies ist eine direkte Folge der optimalen Entstehungsbedingungen für Dioxine, Furane und PCBs in dem Schmelzprozess, mit Temperaturen in der Schmelze von 700 bis 750 °C und der Anwesenheit von reichlich Halogenen und organischen Materialien (auch aus dem Brennstoff des Schmelzofens), sowie Metallen (einschließlich Kupfer) als Katalysatoren. Auch die nach dem Abstich langsam abkühlende Salzschlacke ist potentiell eine günstige Umgebung für die *de novo* Synthese von Dioxinen.

Al(total)	2,6 – 17,7
Al(metallisch)	4,0 – 9,0
Na	5,6 – 14,6
K	3,8 – 9,9
Cl	16,2 – 36,6
Ca	2,4 – 25,4
F	0,4 – 8,0
C	1,8 – 6,2
S	0,7 – 2,7
Fe	0,5 – 6,3
Pb	0,1 – 0,4
Cu	0,1 – 0,7
Zn	0,2 – 0,8
PCDD/F	4 300 – 24 300 ng / kg

Zwar wird der größte Anteil der Dioxine unter regulären Betriebsbedingungen offenbar in den Filterstäuben (40 kg Filterstaub pro Tonne Sekundäraluminium; Grund et al., 1994) abgeschieden und die Salzschlacke ist möglicherweise in der Regel weniger belastet (Tabellen 21 und 22). Doch ist bekannt (Dänisches Umweltministerium, 2003; Um-

weltbundesamt Wien, 1999, 2001), dass Filterstäube (ebenso wie Krätzen und Ofenausbruch) teilweise zusammen mit den Salzschlacken recycelt werden, sodass größere Mengen Dioxine auf diesem Weg in die Salzschlackeaufbereitung und gegebenenfalls deren Produkte bzw. Abfälle gelangen.

Tabelle 22 - Literaturangaben zu Schadstoffkonzentrationen in Abfällen der Sekundäraluminiumindustrie

Anlage (Konzentrationseinheit)	Abfall	PCDD/F	PCB	Quellen
Älmhult (ng/g N-TEQ)	Salzschlacke Filterstaub	0,011 3	0,58 200 pg/g PCB-TEQ	(1)
„Sekundäraluminiumhütte Sachsen-Anhalt“ (ng/g I-TEQ)	Drehofenschlacke Schachtofenschlacke Zyklonstaub Filterstaub	0,1 7 720 2220		(2)
REFONDA (ng/g TE(BGA))	33 000 t Salzschlacke	0,071 – 0,587		(3)(4)
Oxiton-„Fehlcharge“ HANSE, Hannover	15 000 t Oxiton- „Fehlcharge“		0,023 mg/kg	(5)
Deutschland ng/g I-TEQ	Filterstaub	4 - 25		(6)(10)
Beste verfügbare Technik ng/g I-TEQ	Salzschlacke	5		(7)
<i>Maßnahmenwert Kinderspielpl.</i> <i>Maßnahmenwert Industriegebiet</i>		0,1 10		(8)
<i>Richtwert für Boden (Schweiz)</i> <i>Sanierungswert Kinderspielplatz</i>		0,005 0,1		(9)
Quellen: (1) EU (2003) (2) LFU (1997) (3) undatierter Zeitungsausschnitt, Berufung auf BUWAL und BezReg Arnsberg (4) BezReg Arnsberg (Az. 52.2.10.978/7.12.5) (5) DEKRA , Az. LU 406123 (6) EU (2003) (7) EU (2000) (8) Bundesbodenschutzverordnung (BodSchV) (9) Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) (Schweiz) (10) Krone und Rombach (1995)				

- Aus dem Dioxinbericht für die EU unter Federführung des Landes Nordrhein-Westfalen (NRW, 1999) geht bezüglich der Sekundäraluminiumindustrie hervor: *The dusts from cyclones / bag filters and possibly the slags are likely to be the only solid waste which could be significantly contaminated with PCDD/Fs. (...) Only one data point has been found for PCDD/F contamination in slags from secondary*

aluminium production which is a concentration of 11 ng Nordic TEQ/kg (de Wit 1996).(...) Although more data are available on waste arisings and PCDD/F concentrations for secondary aluminium processes than for most other non-ferrous metal processes, the estimated releases to land are still fairly uncertain. Improvement to the inventory for this sector should be a medium priority.

- In dem Dioxinbericht der Bundesregierung für die EU (EU, 2003) heißt es: „Another byproduct is slag mainly consisting of melting salts. This slag can be reprocessed but is partly deposited <51>. No measurement results about the PCDD/F content of the slag nor of the flue gases emitted from reprocessing installations are known.“
- In der 807 Seiten starken non-ferrous metal BREF (best available technique reference) der EU (2000) werden dem Thema Dioxin im Aluminium-Recycling (zusammen mit anderen or-

ganischen Schadstoffen) gerade einmal 10 nichts-sagende Zeilen gewidmet.

Man muss daher konstatieren, dass die Ablagerung großer Mengen von Salzschlacke-Rückständen auf der Kalihalde Sigmundshall und die Verwendung von Sekundärstoffen aus Salzschlacken zur Düngemittelherstellung (! Nahrungskette) mit Genehmigung der (nach gesundem Menschenverstand fachlich nicht zuständigen) Bergbehörden erfolgt, obwohl den Behörden offenbar keine ausreichenden Informationen über Dioxingehalte vorliegen.

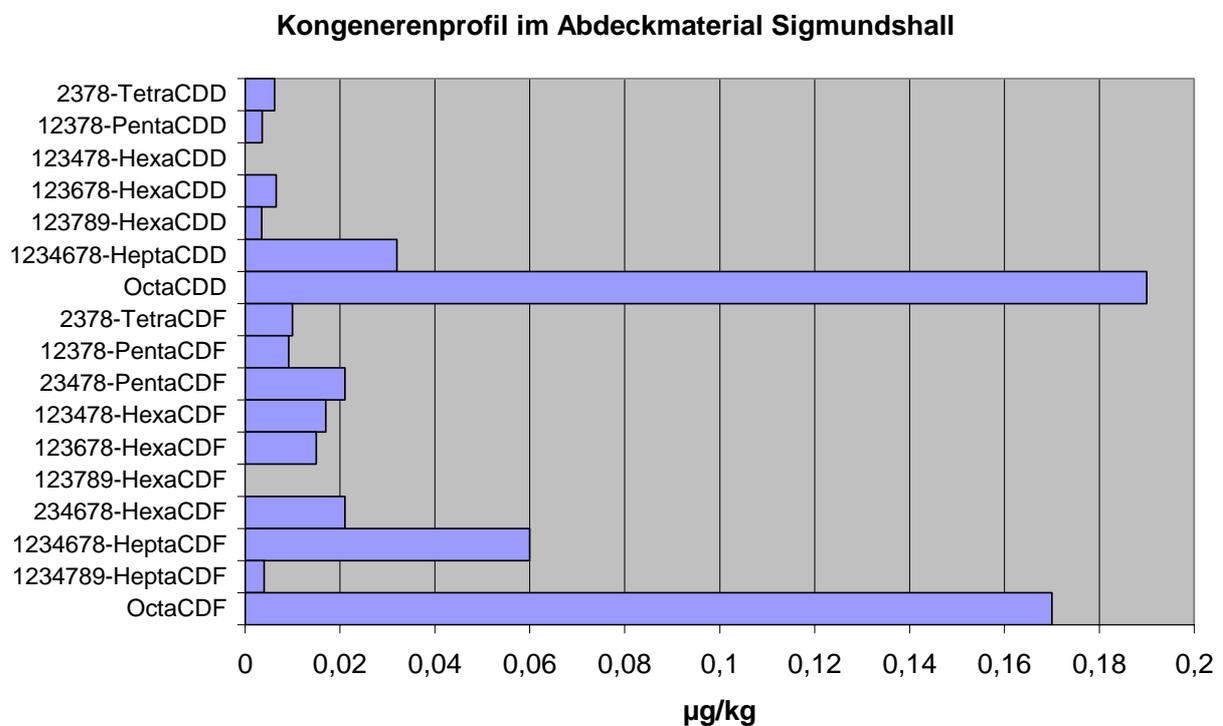


Abbildung 7 – Kongenerenprofil des Abdeckmaterials von Sigmundshall. (Landesbergamt, 2004). Es ist deutlich ein starkes Hervortreten der achtfach chlorierten Kongenere zu beobachten, denen vergleichsweise geringe Toxizitätsäquivalente zugeordnet sind. Folglich ergibt sich trotz einer Gesamtbelastung von 1,19 µg/kg PCDD/F ein ITEQ-Wert von nur 28 ng/kg.

Dioxine und Furane zählen zwar zu den persistenten Umweltgiften; trotzdem unterliegen auch sie einem, wenn auch langsamen Abbau. Als wichtigster Abbaumechanismus werden photochemische Reaktionen angesehen. Über die Halbwertszeiten von natürlichen Abbauprozessen liegen nur relativ grobe Angaben vor, die zwischen einigen Jahren

und einigen hundert Jahren liegen. Es muss betont werden, dass bei diesen Abbaureaktionen, die im wesentlichen stufenweise Dehalogenierungen sind, aus den relativ gering toxischen 7- und 8-fach halogenierten Kongeneren die bis zu 1000-fach giftigeren 4-fach halogenierten TCDD/F hervorgehen können. Dies kann somit bedeuten, dass trotz

des langsamen mengenmäßigen Abbaus das toxische Inventar in Laufe von Jahren dramatisch zunehmen kann (Hirner et al. 2000; Dänisches Umweltministerium, 2003).

Laugungsversuche an Filterstäuben der Sekundäraluminiumschmelze, die mit der Salzschlackeaufbereitung vergleichbar sind, haben gezeigt, dass die PCDD/F aufgrund ihrer Unlöslichkeit in wässrigen Medien bevorzugt in dem Lösungsrückstand angereichert werden (Grund et al. 1994). Es ist daher anzunehmen, dass Dioxine, Furane und PCBs, die in den aufbereiteten Salzschlacken, Filterstäuben, Krätzen und sonstigen produktionspezifischen Abfällen enthalten sind, letztendlich bevorzugt in den unlöslichen Rückständen der Salzschlackeaufbereitung (REKAL-Rückstand) konzentriert werden.

Da bei den verschiedenen Salzschlackeaufbereitern keinerlei gezielte Maßnahmen zur Zerstörung von Dioxinen, Furanen und PCB vorgenommen werden und eine solche Zerstörung bei den gewählten Aufbereitungsschritten auch nicht zu erwarten ist, wäre es daher angebracht, umgehend die Erstellung einer lückenlosen bilanzierenden Analyse über den Verbleib dieser Schadstoffe zu fordern. Eine Verwertung der hergestellten Recyclingprodukte als Düngemittel oder in anderen Bereichen der Lebensmittelproduktion sollte aus Vorsorgegründen bis auf weiteres untersagt werden.

3.3 Luft

Toxische Gase aus Salzschlacken

Die in den Salzschlacken beim Schmelzvorgang gebildeten Carbide, Nitride, Sulfide, Phosphide, Arsenide und evtl. weitere Verbindungen reagieren mit Wasser unter Freisetzung brennbarer und teilweise hochgiftiger Gase (Siehe oben).

Phosphingas (PH_3) ist ab einer Konzentration von 50 ppm (70 mg/m³) akut toxisch (http://www-vetpharm.unizh.ch/clinitox/toxdb/WDK_051.htm). Gemäß Untersu-

chungen an Mäusen ist Arsenwasserstoff (AsH_3) ab einer Konzentration von 3 ppm in der Luft toxisch, und ab 25 ppm innerhalb von Minuten tödlich (maximale Arbeitskonzentration: 0.05 ppm oder 0.16 mg/m³) (http://www-vetpharm.unizh.ch/clinitox/toxdb/KLT_035.htm). Die Gase zeichnen sich, je nach Verunreinigungen und Konzentration, durch widerwärtigen Geruch nach Karbid, faulem Fisch und ähnlichen Geruchsempfindungen aus. Auch Schwefelwasserstoff (H_2S) und Ammoniakgas (NH_3) sind in höheren Konzentrationen giftig. Über die Bildung von Cyanwasserstoffgas (Blausäure; HCN) aus Salzschlacke wird von Wöhler (1999) berichtet. Beschwerden von Anwohnern über Geruchsbelästigungen sind vermutlich auf die gebildeten Gase zurück zu führen, wenngleich diffuse Gerüche mitunter schwer zu bestimmten Quellen zuordenbar sind. Hier wären verbindungsspezifische analytische Nachweisverfahren erforderlich.

Phosphin und Arsin werden an der Luft relativ rasch oxidiert, während Ammoniakgas an der Luft etwas länger beständig ist. Schwefelwasserstoff und Blausäure werden bei alkalischen pH-Werten im Haftwasser ionisiert und in Lösung gehen, wobei besonders beim beständigeren Cyanid ein Eintrag in die Gewässer möglich erscheint.

Neben diesen giftigen Gasen werden auch Methan (CH_4) und Wasserstoff (H_2) freigesetzt, die den größten Anteil an den Reaktionsgasen haben. Wasserstoff und Methan können zusammen mit Luft explosive Mischungen bilden.

Schwebstaub

Über Schwebstaub liegen bislang öffentlich keine Ergebnisse vor. Allerdings ist bekannt, dass in der Umgebung der Halde verwehte Salzpartikel zu Schäden an der Vegetation und zu Korrosion führen. Diese Salzverwehungen entstehen besonders dann, wenn das vom Absetzer der Band-

förderanlage herab fallende Rückstandssalz von Wind erfasst und weggetragen wird. Da die REKAL-Rückstände auf gleiche Weise auf die Halde gelangen, muss entsprechend auch mit einer Ausbreitung von schadstoffbelastetem REKAL-Staub gerechnet werden.

3.4 Landschaft und Flächenverbrauch

Die derzeit genehmigte Haldenfläche von Sigmundshall umfasst 36,1 ha (0,361 km²), die Endhöhe der Halde soll 200 m über NN, bzw. 135 m über Terrain erreichen. Eine Erweiterung der Fläche um 14,8 bzw. 10,3 ha ist beantragt. Die bereits heute vorhandene Halde mit rund 30 Mill. Tonnen Rückstandssalzen wird dann bis 2021 nochmals um rund 13 Millionen Tonnen anwachsen.

Die landschaftsästhetische Bewertung der Rückstandshalde fällt je nach Betrachter unterschiedlich aus. Während die Kaliindustrie ihre Rückstandshalden gerne als „Kalimandscharo“, „Monte Kali“, oder „Weiße Berge“ bezeichnen lässt, so wird man bei Betrachtung aus der Nähe doch erkennen, dass es sich um hässliche Fremdkörper in der Landschaft handelt, die sich auch visuell nicht wesentlich von einer Abfalldeponie unterscheiden. Zum Leben im Schatten der Kalihalde siehe auch Sussebach (2002).

4. Vermeidungs- und Verwertungspotentiale

4.1 Vollständiges Salzschlacke-Recycling

Salzschlacke kann vollständig stofflich recycelt werden, wie das Beispiel der Fa. ALSA und anderer Firmen deutlich macht. Das anfallende Oxiton wird als Korrekturstoff an die Zementindustrie abgegeben,

als Zusatz bei der Herstellung von Mineralfasern und als Zuschlagstoff (Trockenmittel) in der Baustoffindustrie verwendet und damit stofflich verwertet. Ein neues Einsatzgebiet in der Stahlindustrie (Calciumaluminatschlacke) ist im Entstehen. Die eingesetzten Schmelzsätze werden zurück gewonnen und im Kreislauf geführt. Aus dem Ammoniak wird Ammoniumsulfat hergestellt, welches stofflich verwertet wird.

Bei dem ALSA Verfahren zeichnet sich folgende Verbesserungsmöglichkeit ab:

- Die bei der Schlackeauflösung freigesetzten Gase sollten ähnlich wie beim REKAL-Verfahren der K+S einer weitergehenden Verwertung zugeführt werden. Dies bedeutet insbesondere, dass der entstehende Wasserstoff und das Methangas nach einer Reinigung energetisch genutzt werden sollten. So könnte die enthaltene Energie, die sich auf 129 MJ/t Salzschlacke beläuft, gewonnen und die mit der Freisetzung der Gase in die Atmosphäre verbundene Treibhauseffekt des Methans vermieden werden. Eine Ableitung dieser Gase ins Freie ist nicht akzeptabel und entspricht nicht dem Stand der Technik.

Es ist begrüßenswert, dass nach weiteren Einsatzgebieten für die erzeugten Recyclingprodukte geforscht wird, beispielsweise die Verwendung von Calciumaluminat als Schlackebildner in der Stahlindustrie. Dies scheint erforderlich, wegen der zunehmenden Produktionsmengen von Oxiton, das in der Zementindustrie allein nicht mehr untergebracht werden kann.

Es ist nahe liegend, das anfallende Oxiton, evtl. nach einer Vorbehandlung zur Entfernung von Schwermetallen (Säureextraktion) und Wasser, wieder in die Erzeugung von Primäraluminium (Aluminiumelektrolyse) zurück zu führen. Auf diese Weise könnte gegenüber der konventionellen Primäraluminiumschmelze die Gewinnung

und Aufbereitung von Bauxit durch das Bayer-Verfahren eingespart werden, was mit deutlichen Reduzierungen des Energiebedarfs (Natronlaugeherstellung, Autoklavierung) und des Abfallaufkommens (Rotschlamm) belohnt würde.

Sollte dies aus technischen Gründen unüberwindbare Schwierigkeiten bereiten, sollte ein Einsatz von Oxiton anstelle von Bauxit untersucht werden. Dann könnte immer noch der Bauxitbergbau und die Rotschlammdeponierung entfallen.

Die Gegenüberstellung der beiden Verfahrensvarianten zur Salzschlacke-Aufbereitung zeigt, dass das Verfahren der ALSA dem von der K+S betriebenen REKAL-Verfahren deutlich überlegen ist, weil es praktisch abfallfrei arbeitet und die erzeugten Recycling-Produkte relativ hochwertig verwertet.

Die bei K+S betriebene Deponierung der REKAL-Rückstände zum Zweck der späteren Haldenbegrünung kann aus verschiedenen Gründen nicht überzeugen:

- Durch eine Begrünung der Kalihalde werden weder die Salzschlacke-Rückstände noch die REKAL-Rückstände aus der Umwelt entfernt. Sie werden lediglich, unter optimistischsten Annahmen, für eine gewisse Zeit unter einer grünen Pflanzendecke versteckt.
- Selbst wenn unter optimalen Voraussetzungen der Anfall von salzigen Haldenabwässern reduziert werden kann, so werden dafür die Salzfrachten bis zur endgültigen Auflösung der Halde über einen längeren Zeitraum (max. vielleicht 10-fach) gestreckt. Das bedeutet aber auch, dass die Salzbelastungen für die Umwelt entsprechend länger andauern werden, was durchaus nachteilig zu bewerten ist.
- Unter realistischen Bedingungen werden die begrüneten steilen und langen Haldenböschungen vermutlich schon nach wenigen Jahren durch Erosionsrinnen zerfurcht und abgeschwemmt

werden. Sickerwasser wird auch weiterhin durch die Deckschichten dringen und das darunter liegende Rückstandssalz auflösen, so dass es zu karstartigen Einbrüchen der Deckschichten kommen wird.

- Die Halde wird für die Zeitdauer ihres Bestehens (einige tausend Jahre) einer Nachsorge bedürfen, die kommende Generationen belastet.
- Durch die aufgeschütteten REKAL-Rückstände wird eine stoffliche Verwertung oder anderweitige Nachnutzung der Rückstandssalze erschwert oder verhindert.
- Die REKAL-Rückstände bestehen selbst zur Hälfte aus Salz und sind hoch schadstoffbelastet. Dadurch vergrößert sich die Schadstoffmenge und das Schadstoffspektrum der Halde und der entstehenden Haldenabwässer und gasförmigen Emissionen.

Es ist daher aus ökologischer Sicht wesentlich besser, auf die Haldenabdeckung mit REKAL-Rückständen zu verzichten und stattdessen die Salzschlacke komplett stofflich zu verwerten. Das REKAL-Verfahren wurde auch von den Hüttenkundlern Krone und Rombach bereits 1995 als ökologisch bedenklich eingestuft.

Grund zur Besorgnis gibt auch die Verwendung der bei K+S anfallenden Recyclingprodukte (Kaliumchlorid, Ammoniumsulfat, „Granulierflüssigkeit“; bei ALSA und UR-Chemie Ammoniumsulfat) zur Herstellung von Mineraldünger. Auf diesem Weg können möglicherweise Schadstoffe aus der Salzschlacke über den Mineraldünger in die Nahrungsmittelkette eingeschleust werden. Dies gilt umso mehr, als die zuständigen Fachbehörden offenbar keine Kenntnis über Schadstoffgehalte, insbesondere Dioxine, Furane und PCBs in den Salzschlacken und den erzeugten Produkten haben. Hier sollten aus Vorsorgegründen weniger sensible Verwertungswege besprochen, und eine Überwachung der Schadstoffgehalte veranlasst werden.

4.2 Vollständiges Kalihalden-Recycling

Der Bergbau auf Sigmundshall erfolgte bis zum Jahr 2002 ausschließlich auf die sylvinitischen Kalisalze des Ronnenberg-Flözes. Dementsprechend sind in den bis dahin angefallenen, ca. 30 Millionen Tonnen Rückständen, die den Löwenanteil der bisherigen Kalihalde stellen, außer Steinsalz kaum andere Bestandteile enthalten. Dies wird auch durch Angaben von Schmeisky und Lenz (1998) bestätigt (Tabelle 23).

NaCl	94,8
KCl	2,6
MgCl ₂	0,8
MgSO ₄	0,2
Unlösliches (CaSO ₄ und Ton)	1,6

Aufgrund der geringen Magnesiumgehalte wäre die Rückstandshalde prädestiniert, um das Steinsalz durch ein geeignetes Verfahren zu reinigen und als Industriesalz und/oder Streusalz für den Winterdienst einzusetzen. Hierzu käme sowohl das SAVE-Verfahren (Krupp, 2002, 2003) in Frage, wie auch ein neues Rekrystallisationsverfahren (Hydrat-Verfahren) bei niedrigen Temperaturen (Ninane et al., 2000), oder auch mechanische Verfahren wie das Salex-Verfahren (Sedivy, 1996), je nach dem, welche Produktqualität angestrebt wird.

SAVE-Verfahren

Das SAVE-Verfahren wurde eigens zur stofflichen Verwertung von Kalihalden konzipiert (Krupp, 2002, 2003). Zunächst wird die Rückstandshalde künstlich beregnet, wodurch eine gesättigte Salzsole entsteht, die in den Ringgräben der Kalihalden gesammelt und über Filter abgezogen wird. Nach einer Solereinigung wird die Reinsole in Vakuumkristallisatoren eingedampft um reines Siedesalz (~99,95 % NaCl) zu gewinnen. SAVE bietet zwei Varianten: Das ursprüngliche SAVE-Verfahren ist

besonders für kieserit-arme Rückstandssalze geeignet, während das SAVE-2 Verfahren auch kieseritische Rückstandssalze verarbeiten kann. Der Unterschied liegt in einen zusätzlichen Verfahrensschritt bei der Solereinigung im SAVE-2 Verfahren, wodurch Magnesiumionen in Form von sehr hochwertigem Magnesiumhydroxid gewonnen werden und Sulfationen durch Branntkalk in ebenfalls verwertbaren Gips umgewandelt werden.

Das SAVE-Verfahren ist im Labormaßstab erfolgreich durchgeführt worden. Es hat den Vorteil, dass es ausschließlich auf erprobte und praxisbewährte Verfahrensschritte anderer Verfahren zurückgreift, diese aber neu kombiniert.

Hydrat-Verfahren

Das Hydratverfahren (Ninane et al. 2000) nützt einen Phasenwechsel zwischen Halit (NaCl), der in Gegenwart von Lösung nur oberhalb +0,1°C stabil ist, und dem Dihydrat Hydrohalit (NaCl·2 H₂O), das nur unterhalb +0,1°C stabil ist, aus. Das fein gemahlene Rohsalz wird in einer gesättigten NaCl-Lösung angemaischt und auf ca. -5°C abgekühlt. Dadurch kristallisiert das Salz zum Dihydrat um, wodurch eingeschlossene Verunreinigungen als Feststoff ausgeschieden werden bzw. in Lösung gehen. Die Kristalle werden nun abgetrennt und gewaschen. Bei der anschließenden Erwärmung erfolgt dann erneut eine Umkristallisation von Hydrohalit zu Halit.

Die erzielbare Reinheit ist etwas geringer als beim Siedesalz, aber der Prozess ist wesentlich günstiger im Energieverbrauch. Das Verfahren ist in Pilotanlagen erprobt worden.

Salex-Verfahren

Hinter dem Markennamen SALEX (Sedivy, 1996) verbergen sich mehrere Verfahrensvarianten, die im Wesentlichen aus einer Kombination mechanischer Zerkleinerung, selektiver Auflösung und Hydroklassierung beruhen. Durch sorgfältig auf

das Rohsalz abgestimmte Nassmahlung in gesättigter Salzlösung werden Einschlüsse und Verunreinigungen in den Salzkörnern freigelegt und, soweit löslich, durch die Mutterlauge aufgenommen. Durch spezielle Gegenstrom-Waschverfahren werden partikuläre Verunreinigungen aufgrund unterschiedlicher Dichte und Morphologie entfernt. Aus Meersalz sollen so vergleichbare Reinheiten wie beim Siedesalz erreichbar sein. Die Salex-Verfahren sind im praktischen Einsatz.

Wegen des gesättigten Salzmarktes in Deutschland und der Europäischen Union müssten zwangsläufig andere Produktionsstandorte für Salz stillgelegt, bzw. die relevanten Anlagen (Siedesalzanlage) nach Sigmundshall verlagert werden. In Frage kämen beispielsweise der Standort Harlingen in Friesland (NL), an dem die K+S über ihr Tochterunternehmen *esco* eine Siedesalzanlage mit einer Kapazität von mindestens 1,0 Millionen Jahrestonnen betreibt, oder der Standort Grasleben (Niedersachsen), wo K+S (*esco*) ein Steinsalzbergwerk mit einer Jahresförderung von ca. 600 000 Tonnen betreibt.

Bei Verkaufserlösen von ca. 75 € pro Tonne Streusalz oder 100 € pro Tonne Siedesalz steht die Wirtschaftlichkeit des Halde-recycling außer Frage. Auch ein direkter Vergleich des SAVE-Verfahrens mit der konventionellen Herstellung von Siedesalz aus Solungsbohrungen zeigt, dass ein Haldenrecycling wirtschaftlich ist (Krupp, 2002, 2003). Wenn man von einem Recyclingbetrieb mit einer Kapazität von 1 Million Jahrestonnen NaCl ausgeht, so könnte eine Halde wie die von Sigmundshall einschließlich der noch zu erwartenden Rückstandsmengen in 30 bis 40 Jahren verschwunden sein. Dies ist auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten (Abschreibungsdauer, etc.) ein sinnvoller Zeitrahmen, der sich auch technisch realisieren lässt.

Es ist daher nicht einzusehen, dass weiterhin von der gleichen Firma riesige Rückstandshalden aufgeschüttet werden, die in hohem Maße die Umwelt belasten, während sie an anderen Standorten Salz aus primären Lagerstätten produziert und vermarktet. In Anbetracht der Umweltschäden, die im Falle einer Nicht-Beseitigung von Kalihalden in den nächsten Jahrtausenden zu besorgen sind, sollten die gesetzlichen Vorgaben und Prinzipien der Kreislaufwirtschaft umgehend und konsequent angewandt werden.

Die Schließung der Stoffkreisläufe hätte beim Steinsalz, neben der Beseitigung der Kalihalden und echten Wiedernutzbarmachung der beanspruchten Flächen auch noch weitere positive Effekte auf die Umwelt. So würde der Einsatz von Recycling-Siedesalz in der Chloralkali-Elektrolyse, beispielsweise bei DOW in Stade, dazu führen, dass dort nicht weitere Solungskavernen hergestellt werden müssten. Dadurch könnte auch das bislang völlig ungeklärte Problem der Nachsorge bei nicht mehr benötigten Salzkavernen, und ebenso die Schäden, die durch die Bildung von Senkungströgen oberhalb der Kavernenanlagen auftreten, entfallen.

5. Schlußbemerkungen

*„Firmen haben weder Körper,
dass man sie bestrafen kann,
noch Seelen, um verdammt zu werden.
Darum machen sie, was sie wollen.“*

*Edward, 1st Baron Thurlow,
Jurist und Lord Chancellor
(1731-1806)*

Kalibergbau

Kalihalden sind in den meisten Fällen fast vollständig und mit wirtschaftlichem Gewinn recycelbar (Krupp, 2002, 2003). Leider zeigt die Kaliindustrie als Verursacher dieser Altlasten keine Bereitschaft von sich aus tätig zu werden. Vielmehr wird versucht, durch Desinformation gegenüber Behörden und der Öffentlichkeit und durch juristische Verschleppungsstrategien sich der Verantwortung für verursachte Umweltschäden zu entziehen. So ist beispielsweise seit 1997 ein Rechtsstreit anhängig, den K+S in erster Instanz verloren hat, weil die Firma ihrer Sanierungspflicht bezüglich der Kalihalde Buggingen in Südbaden nicht nachkommen will, während auf der anderen Rheinseite die elsässischen Minen schon längst ein umfangreiches Programm zur Beseitigung der Kalihalden und Verhinderung weiterer Versalzungen des Grundwassers durchführen. Dabei ist K+S auch wirtschaftlich durchaus in der Lage, mehr für die Minderung der durch sie verursachten Umweltschäden zu tun. So verkündete beispielsweise Dr. Ralf Bethke (Vorsitzender des Vorstands der K+S Aktiengesellschaft) anlässlich einer Bilanzpressekonferenz:

„Meine Damen und Herren, unsere Aktionäre profitieren von dem starken Kursanstieg der K+S-Aktie sowie unserer attraktiven Dividendenrendite. Ein Aktionär, der Ende 1996 für 5.000 € K+S-Aktien erworben hat, verfügte am 31. Dezember 2000 bei Wiederanlage der in diesem Zeitraum gezahlten Dividende in K+S-Aktien über einen Depotwert von rund 13.850 € - ein Wertzuwachs in vier Jahren von rund 177%.“ (K+S, 2001)

Die deutschen Kalivorkommen, die zu den bedeutendsten der Welt zählen, sollten besser vor Raubbau geschützt werden. Beispielsweise dürften neue Lagerstättenteile erst dann zum Abbau frei gegeben werden, wenn die bereits durch Bergwerke erschlossenen, technisch gewinnbaren Reserven vollständig ausgebeutet sind. Hierzu

zählt insbesondere auch das Hartsalzflöz Stassfurt. Auch wenn hierdurch geringfügig höhere Kosten für Kalidünger entstehen, so ist dies keine Entschuldigung für praktizierte Rosinenpickerei und die *de facto* Vernichtung von Rohstoffreserven. Da der von K+S dominierte europäische Kalimarkt ohnehin seit Jahren durch Anti-Dumpingzölle der EU abgeschottet ist (K+S, 2001; IGBCE, 2003), ist eine Weitergabe von mäßigen Kostensteigerungen durchsetzbar. Die monopolartige Konzentrierung des Kalibergbaus bei einer einzigen Firma bietet gute Rahmenbedingungen, sofern seitens der Politik und der Bergbehörden entsprechende Vorgaben gemacht werden. Eine Flutung von Kalibergwerken, die noch über gewinnbare Vorräte verfügen, sollte unterbleiben bis diese Vorräte gewonnen sind. Im Hinblick auf die wachsende Weltbevölkerung, die auch in fernerer Zukunft auf Kalidünger angewiesen sein wird, diesen aber voraussichtlich mit weniger verfügbarer Energie gewinnen muss, ist eine Vergeudung von Kali-Reserven nicht akzeptabel. Da es sich bei den Kalivorräten um endliche Ressourcen handelt, sollte für deren Förderung ein angemessener Tonnenzins, z.B. 10 % des Verkaufserlöses, gezahlt werden. Es ist nicht einzusehen, weshalb unser gemeinsames Naturerbe einer Aktiengesellschaft kostenlos (oder sogar noch mit Zuzahlung von Steuergeldern; s.o.) zur Verfügung gestellt wird.

Aluminium-Recycling

Das Recycling von Aluminium ist grundsätzlich dringend erforderlich, weil ein Metall, welches mit derart hohem Energieaufwand und mit entsprechend hohen Schadstoffemissionen hergestellt worden ist, unbedingt im Wertstoffkreislauf, besser noch im Werkstoffkreislauf, verbleiben muss. Allerdings sollte Aluminium nur für hochwertige und langlebige Produkte verwendet werden, wo es aufgrund seiner stoffspezifischen Eigenschaften auch ökologisch sinnvoll verwendbar ist. Um das Downcycling zu verringern, sollten Alu-

miniumschrotte möglichst sortenrein (jede Legierung für sich) gesammelt und recycelt werden, um Aluminiumverluste durch Oxidation und Verluste von Legierungsmetallen bei metallurgischen Reinigungsschritten zu minimieren. Dazu ist es sinnvoll, dass sich die Aluminium verarbeitende Industrie auf die Verwendung von einigen wenigen Aluminium-Legierungstypen verständigt. Durch diese Maßnahmen würde auch der Anfall von Salzschlacken verringert.

Salzschlacke-Recycling

Die stoffliche Verwertung von Salzschlacken ist notwendig und sinnvoll. Sie sollte vollständig erfolgen, d.h. im Wesentlichen abfallfrei. Die rückgewonnenen Aluminiumoxide sollten möglichst hochwertig verwendet werden, d.h. so weit oben wie möglich in die Prozesskette zur Primäraluminiumherzeugung rückgeführt werden, weil so der größtmögliche Einspareffekt erzielt wird. Eine Verwertung des Oxidons in der Zementindustrie ist nur die zweitbeste Lösung. An dieser Stelle sollte wesentlich mehr Forschungs- und Entwicklungsarbeit geleistet werden.

Die Verwendung des gewonnenen Ammoniumsulfates und des zurück gewonnenen Kaliumchlorids, sowie von phosphat- und sulfathaltigen Produktionswässern aus der Salzschlackeaufbereitung zur Herstellung von Mineraldüngern muss missbilligt werden. Es ist nicht auszuschließen, dass auf diesem Wege Schadstoffe, insbesondere Schwermetalle, Dioxine, Furane und PCBs in die Nahrungsmittelkette eingeschleust werden. Eine kontinuierliche Überwachung der PCDD/F und PCB-Gehalte ist messtechnisch unmöglich, so dass sich dieser Verwertungspfad verbietet. Auch eine stichprobenartige Überwachung von Mineraldüngern hinsichtlich dieser Schadstoffe findet offenbar nicht statt und es sind keine Daten über Dioxingehalte in Mineraldüngern verfügbar (BUWAL, 1997). Es ist daher dringend notwendig wesentlich schärfere Überwachungsprogramme zu

implementieren um verlässliche Daten über die Höhe der Schadstoffbelastungen zu gewinnen und den Verbleib der Schadstoffe in den Stoffkreisläufen lückenlos aufzuklären. Es muss deutlich werden, wo die Schadstoffsinken sind und wie die Schadstoffe ordnungsgemäß beseitigt werden. Diese Untersuchungen sind auch im Hinblick auf die Arbeitssicherheit in den Anlagen überfällig.

Bei der Deponierung von REKAL-Rückständen auf der Kalihalde Sigmundshall handelt es sich um eine Scheinverwertung in Verbindung mit einer umweltgefährdenden Abfallbeseitigung, die aus rein wirtschaftlichen Gründen betrieben wird und keinen wirklichen ökologischen Nutzen hat. Salzschlacken sind nicht umsonst als „gefährlicher Abfall“ klassifiziert. Sollte eine vollständige Verwertung, die grundsätzlich möglich ist, im Einzelfall nicht durchführbar sein, so gehören diese Salzschlacken, gegebenenfalls nach einer Vorbehandlung, in eine Untertagedeponie der Deponieklasse DK III. Es ist geradezu absurd, dass Abfälle auf Sigmundshall unter freiem Himmel deponiert werden und Dioxinanalysen nur 1 mal pro Jahr durchgeführt werden, während die gleichen Materialien bei Anlieferung in eine Sondermülldeponie chargenweise zusammen mit Begleitscheinen und Deklarationsanalysen angedient werden müssen.

Die Haldenabdeckung mit REKAL-Rückständen und anderen industriellen Abfällen, wie sie seit einigen Jahren mit Genehmigung des Niedersächsischen Landesbergamtes auf Werk Sigmundshall betrieben wird, ist mit geltenden Rechtsvorschriften, sowohl des Abfallrechts als auch des Bergrechts unvereinbar und bedarf dringend einer Korrektur.

Weitere Handlungsempfehlungen und Gegenstrategien

Grundsätzlich sollten in Zukunft die Gesetze dahingehend angepasst werden, dass es bezüglich der Abfallwirtschaft keine

Sonderrechte für den Bergbau mehr gibt. Bergbauliche Abfälle sollten wie alle anderen Abfälle auch durch ein einheitliches Abfallrecht geregelt werden und bezüglich des Umweltrechts keine Ausnahmefälle darstellen. Dabei ist eine Differenzierung nach spezifischen Schadstoffgehalten notwendig und eine Abgrenzung gegenüber inerten Bergehalden sinnvoll. Es ist nicht einzusehen, weshalb Natriumchlorid, welches in einem x-beliebigen Betrieb als Abfall anfällt, rechtlich anders behandelt wird als Natriumchlorid, das beim Kalisalz-Bergbau und der Herstellung von Kalidünger in Form von Rückstandshalden deponiert wird. Der Weiterbetrieb von Kalihalde als *de facto* Abfalldeponien für Bauschutt und Sonderabfälle unter der Aufsicht von Bergämtern sollte unterbunden werden. Die gesetzlichen Regelungen der Kreislaufwirtschaft sollten in vollem Umfang auch auf Abfälle des Bergbaus Anwendung finden, damit Vermeidungs- und insbesondere Verwertungspotentiale ausgeschöpft werden.

Aufgrund der zunehmenden Konzentrierungs- und Globalisierungstendenzen in der Wirtschaft haben die großen Konzerne, zu denen auch K+S gerechnet werden muss, ein viel zu großes politisches Gewicht erlangt, ohne eine demokratische Legitimation dafür zu besitzen. Unter den 100 größten Wirtschaftsgebilden der Welt sind 49 Staaten mit ihrem Bruttonationalprodukt, 51 sind multinationale Konzerne mit ihrem Umsatz. (Verein für Soziale Stadtentwicklung, 2002). Als Global Play-

ers sind sie sich ihrer wirtschaftlichen Macht bewusst und spielen diese jenseits aller demokratischen Strukturen und Konventionen rücksichtslos aus.

So werden z.B. bezüglich Standortentscheidungen Kommunen, Bundesländer, oder gleich ganze Staaten gegeneinander ausgespielt um wirtschaftliche und andere Vorteile zu erpressen. Da sich Politiker aus offensichtlichen, egoistischen Motiven zuerst für den eigenen Wahlkreis einsetzen, und weil Länder und Kommunen auf Steuereinkommen aus dem eigenen Hoheitsgebiet angewiesen sind, müssen diese Organisationsformen geradezu als Einladung zur Erpressung verstanden werden. Dabei sind die Konzerne oft selbst verwundbar: K+S beispielsweise ist aufgrund seiner Abhängigkeit von der regionalen Rohstoffbasis in Hessen, Thüringen, Sachsen-Anhalt und Niedersachsen gar nicht in der Lage seine Kalisalz- und Kieserit-Aktivitäten anderswo zu betreiben. Kieseritreiche Kalilagerstätten des Sulfat-Typs sind in nennenswerter Größe praktisch auf die deutschen Zechsteinsalze beschränkt.

Danksagung

Der Kreisverband Hannover des BUND und der Verfasser danken der Umweltstiftung BINGO-Lotto für die finanzielle Unterstützung zu dieser Studie.

Quellen

Air Liquide (2001a) EG-Sicherheitsdatenblatt gemäß TRGS 220. Phosphin

Air Liquide (2001b) EG-Sicherheitsdatenblatt gemäß TRGS 220. Arsin

BDZ (2002) Zementrohstoffe in Deutschland: Geologie, Massenbilanz, Fallbeispiele. Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V.; Verein Deutscher Zementwerke e.V. – Düsseldorf: Verlag Bau + Technik, 2002

Beier P (1996) Fortschritte bei ESTA und Flotation. Kali und Steinsalz 12, 57-62

B.U.S. (2001) Pressemitteilung der B.U.S. Berzelius Umwelt-Service AG, 26. Juni 2001.

B.U.S. (1999) Geschäftsbericht der B.U.S. Berzelius Umwelt-Service AG

BUWAL (1997) Dioxine und Furane. Schriftenreihe Umwelt Nr. 290, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft

Dänisches Umweltministerium (2003) Environmental Project No. 811 2003: Substance Flow Analysis for Dioxin 2002 (Erik Hansen and Charlotte Libak Hansen Cowi A/S) 156 pp.

Diekmann (2002) Renaturierung von Rückstandshalden der Kaliindustrie mit geringem zusätzlichen Flächenbedarf am Beispiel der Halde des Kaliwerkes Sigmundshall. Kali und Steinsalz 2002(3), 32-41

EAK (2002) Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis. Zuletzt geändert durch Art. 2 V v. 24.7.2002.

Eidgenössisches Department des Innern (1997) Antrag zur Einfuhr aluminiumhaltiger Salzschlacke bei der zuständigen Bezirksregierung Arnsberg (Deutschland; Nordrhein-Westfalen) eingetroffen. Presse- und Informationsdienst. Pressemitteilung vom 14. März 1997

EMC (2003) European Metallurgical Conference, Hannover, 16-19.9.2003. Exkursions-Ankündigung.

EU (1999) Green List of Waste. Annex II of Council regulation (EEC) 259/93 as amended by Commission Decision 1999/816/EU

EU (2000) Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). Reference Document on Best Available Techniques in the Non Ferrous Metals Industries. European IPPC Bureau

EU (2003) European dioxin inventory:
Sweden. http://europa.eu.int/comm/environment/dioxin/stage1/inv_s.pdf
Germany. http://europa.eu.int/comm/environment/dioxin/stage1/inv_d.pdf

Feige R, Merker G (2001) SEROX - ein Tonerderohstoff aus der Aufarbeitung von Aluminium-Salzschlacke. Vortrag zum 52. Berg- und Hüttenmännischen Tag 2001 der TU Bergakademie Freiberg, 20.-22. Juni 2001 "Einsatz von Abfallstoffen im Bereich Keramik, Glas, Bau-

- stoffe". Freiburger Forschungshefte, A 864 Verfahrenstechnik/Umwelttechnik 2001, S. 107-117
- GDA (2002). Aluminium, ein nachhaltiger Werkstoff. Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. <http://www.aluinfo.de/75.html>
- GDA (2003). Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (CF₄ und C₂F₆). Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. <http://www.aluinfo.de/75.html>
- Gerland H (2000) Hartsalzprojekt Werk Sigmundshall. Glückauf 136(7/8), 431-437
- Grimmig G (1998) Zur Lage der Kaliindustrie. Glückauf 134, 495-500
- Grund G, Krone K, Krüger J, Urbach R, Fuchs R, Hofman W, Stäubner H (1994) Aufarbeitungsmöglichkeiten dioxinhaltiger Flugstäube. EMC'94, Metallurgy II, 219-249
- HAZ (1999) Der „Kalimandscharo“ leuchtet weiter. Hannoversche Allgemeine Zeitung vom 22.05.1999
- HAZ (2003) Vorfall bei K+S geklärt. Hannoversche Allgemeine Zeitung vom 22.09.2003
- Hazworld.com (2003) Nachricht vom 5. Dezember 2002
- Hirner A, Rehage H, Sulkowski M (2000) Umweltgeochemie. 836 S. (Steinkopff, Darmstadt)
- Hoberg H (1997) Aluminiumwirtschaft im Wandel - Ein moderner Werkstoff im Spannungsfeld zwischen Ökonomie und Ökologie. Vortrag bei der KFA Jülich am 13. Juni 1997 im Rahmen der Frühjahrstagung der gste
- Hoffmann D (1972) Elf Jahrzehnte deutscher Kalisalzbergbau. Verlag Glückauf, Essen, 151 S.
- Hübner C, Boos R, Bohlmann J, Burtscher K, Wiesenberger H (2000) In Österreich eingesetzte Verfahren zur Dioxinminderung. Umweltbundesamt Wien, Monographien, Band 116 (<http://www.ubavie.gv.at/publikationen/Mono/M116z.HTM>)
- IGBCE (2003) Bericht I/2003 Kalibergbau und weiterer Nichtkohlenbergbau. Industriewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie. (Bernd Westphal, Abt. Bergbau und Energiewirtschaft) Hannover, Januar 2003, 20 p.
- International Aluminium Institute (2003) Life Cycle Assessment of Aluminium: Inventory Data for the Worldwide Primary Aluminium Industry. 53p.
- Krone K, Rombach G (1995) Rückstände der Sekundäraluminiumproduktion – Bildung, Aufarbeitung, Nutzung. Aachener Umwelttage (9-10.11.1995), Tagungsband, V4, 1-18
- Krupp R (2003) Umweltschäden und stoffliche Verwertungspotentiale in der Kali- und Salz-Industrie. Umweltinformationen für Niedersachsen, Ausgabe 53, 1-43
- Krupp R (2002) Stoffliche Verwertung der Rückstandshalden und Endlaugen der Kaliwerke. Glückauf 138(10), 484-488

K+S (2003) Systemlösungen für die Sekundäraluminium-Produktion, Broschüre

K+S (2001) Bilanzpressekonferenz am 15. März 2001 in Frankfurt am Main. Rede von Dr. Ralf Bethke, Vorsitzender des Vorstands der K+S Aktiengesellschaft

K+S (1999) Kaliwerk Sigmundshall: Grundsteinlegung für Kieseritfabrik. Presseinformation vom 20.9.1999

LAB (1998) Anforderungen an die stoffliche Verwertung von Abfällen im Bergbau über Tage. Technische Regeln. Länderausschuss Bergbau. 58p.

LAGA (1997) Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/ Abfällen. Technische Regeln. Stand: 6. November 1997. Mitteilung 20. 96p.

Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (1999) Regelwerke und beste verfügbare Techniken zur Luftreinhaltung sowie Einsatz von Abfällen in der Zementindustrie.

Landesbergamt (2003) Das Bergjahr 2002. Überblick über das Bergbaugeschehen im Bezirk des Landesbergamtes Clausthal-Zellerfeld.

Landesbergamt (2004) Schriftliche Mitteilung aufgrund einer Anfrage nach Umweltinformationsgesetz. Analyse einer Probe von Haldenabdeckmaterial, durchgeführt von UCL Umwelt Control Labor, Lünen. Probenummer 03-0388-001, Eingangsdatum 16.01.2003.

Land Oberösterreich (2001) Leitfaden für einen sicheren Umgang mit Aluminium und Magnesium. Herausgeber: Abteilung Umweltschutz / Abfallwirtschaft beim Amt der Oö. Landesregierung, Stockhofstraße 40, 4021 Linz. E-Mail: u-aw.post@ooe.gv.at

Leinezeitung (2003) Werk Sigmundshall will Fläche für Halde erweitern. 29.05.2003

LFU (1997) Anlagenbezogenes Dioxinmeßprogramm in Sachsen-Anhalt 1993-1996 – Ergebnisbericht. Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, 104 pp. (diox_lau.pdf)

Ninane L, Criado C, Thomas L (2000) Purification of rock salt by a new process at low temperature. 8th World Salt Symposium, Arnhem. Vol 1, 451-458

Niedersächsischer Landtag (1999) Protokoll, 14. Wahlperiode, 26. Plenarsitzung am 5. Mai 1999, Tagesordnungspunkt 14.

NLFB (2000) Rohstoffsicherungsbericht 2000 des Niedersächsischen Landesamtes für Bodenforschung. 69p.

NLÖ (2000) Gewässergütekarte Niedersachsen. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie

NRW (1999) Releases of Dioxins and Furans to Land and Water in Europe Final Report. Report produced for Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Germany on behalf of European Commission DG Environment

Österreichisches Parlament (1999) Beantwortung der schriftlichen parlamentarischen Anfrage Nr. 6619/J. 6301/AB XX.GP

Pfaderer C (2002) Müll ohne Grenzen. Kontexte, 4.2002, 14-16

Phosphorus & Potassium (1995) New dawn for Kali und Salz. Phosphorus & Potassium, Nov-Dec. 1995, 17-25

Region Hannover (2003) Salzausschwemmungen aus Kali-Rückstandshalden. Beantwortung einer Anfrage der regionsabgeordneten Frau Lappé in der Sitzung des AUN am 12.6.03, TOP 10. Informationsdrucksache IM 0458/2003.

Robinson R, Stokes R (1968) Electrolyte Solutions. (Butterworths), 571 p.

RWI (1998) CO₂-Emissionen und wirtschaftliche Entwicklung. Monitoring Bericht 1998, (Essen) 26p.

Scheer T (2001) Rekultivierung von Rückstandshalden der Kaliindustrie (Dissertation). Ökologie und Umweltsicherung, 20 (2001)

Schmeisky H, Lenz O (1998) Zur Begrünung von Rückstandshalden der Kaliindustrie – Ergebnisse einer 25jährigen Forschungsarbeit. Glückauf 134(9), 501-515

Schneider C, Wolf S (1998) Processing of salt slag from the secondary aluminium production. www.ifa.rwth-aachen.de

Schroth H (1977) Die Errichtung einer Großhalde unter umweltschützenden Bedingungen. Kali und Steinsalz, 147-154

Schucht S (1999) Ökologische Modernisierung und Strukturwandel in der deutschen Aluminiumindustrie. Forschungsstelle für Umweltpolitik (FFU) Freie Universität Berlin Fachbereich Politik- und Sozialwissenschaften Otto-Suhr-Institut für Politikwissenschaft FFU-Report 99-4

Sedivy V (1996) Purification of salt for chemical and human consumption. Industrial Minerals, April 1996, 73-83

Sessler W, Holländer R (2002) Das Kaliwerk Sigmundshall der K+S Aktiengesellschaft. Akademie der Geowissenschaften zu Hannover, Veröffentlichung 20 (2002):70-76

Singewald A (1991) Kalisalze und deren Aufbereitung. Glückauf, 127; 388-397

Ständerat (1997) Budget 1997, Supplément I, Sechste Sitzung - Dienstag, 10. Juni 1997

STENA Aluminium A/S (2002) Umweltbericht 2000-2001 (tysmiljo.pdf)

Sussebach H (2002) Geschichten vom Kalimandscharo. Die Zeit, Nr. 43 (17.10.2002): 54-55

Symonds und COWI (2001) Final report to DG ENV on Mine Waste Costs. (mining_cost.pdf)

The News (1997) Toxic Clean Up Over. The News is Portugal's largest circulation English language newspaper. Dec. 19

TU Berlin (1999) <http://www.lagerstaetten.tu-berlin.de/exkursion/salz299/sigmundshall.html>

Ullmann (1976) Ullmanns Encyclopädie der technischen Chemie. Band 7 - Aluminiumhydroxid

Umweltbundesamt Wien (1999) Stand der Technik in der Sekundäraluminiumerzeugung im Hinblick auf die IPPC-Richtlinie.

http://www.ubavie.gv.at/publikationen/uba-aktuell/archiv/1999/01/TM_1999-01-20-1.htm

Umweltbundesamt Wien (2001) UN-ECE task force management on by-products/residues containing heavy metals and/or persistent organic pollutants. Status Report, winter conference papers, vol. 3, ICP-031 Wien, 2001

UN (2001) Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. United Nations

UN (2003) Draft Guidelines on BAT for Thermal Processes in the Metallurgical Industry. United Nations Environment Programme. UNEP/POPS/EGB.2/INF/7, 23 October 2003

VDZ (2002) Zementrohstoffe in Deutschland: Geologie, Massenbilanz, Fallbeispiele / Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V.; Verein Deutscher Zementwerke e.V. – Düsseldorf: Verlag Bau + Technik, 2002, ISBN 3-7640-0430-4

Verein für Soziale Stadtentwicklung (2002) Privatisierung = Diebstahl an öffentlichem Eigentum. Graz, 66 S.

Welbourne A (2001) Report by Adrian Welbourne, 2001 Churchill Fellow, To observe companies which recycle aluminium and magnesium saltcake, manufacture aluminium and magnesium powder and meet with respective industry associations - USA, UK, Italy. The Winston Churchill Memorial Trust of Australia. 12p.

Wöhler V (1999) Aufbereitete Aluminium-Salzschlacke als Rekultivierungsmaterial. Untersuchungen zum Stoff- und Wasserhaushalt eines salzhaltigen Rekultivierungsmaterials im Labor und Freiland. Dissertation, Universität Gesamthochschule Kassel, 165p.