

Anlage 1

**Begrünungskonzept für Kalirückstandshalden -
Machbarkeitsstudie zur Abdeckung und
Begrünung**

Begrünungskonzept für Kalirückstandshalden

Machbarkeitsstudie zur Abdeckung und Begrünung

Prof. Dr. Helge Schmeisky
MSc. Greta Papke
Dr. Arne Schmeisky

Witzenhausen, Februar 2015

UMWELTSICHERUNG
Prof. Dr. Helge Schmeisky



Inhalt

1. Einleitung	3
2. Halde Sigmundshall/ Bokeloh: Ergebnisse der Untersuchungen.....	5
3. Übertragungsmöglichkeiten der Begrünungstechnik auf Großhalden generell	7
4. Erste Ergebnisse laufendes Projekt „Begrünungskonzept für Kalirückstandshalden im Werragebiet“	9
5. Mengenaufkommen und Qualitäten	10
6. Zusammenfassende Schlussbetrachtung.....	12
7. Literaturquellen	14

1. Einleitung

Seit Mitte des 19. Jahrhunderts wird Kaligewinnung in Deutschland betrieben. Insbesondere nach Verbesserungen der Fördertechnik in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts kam es zu einer Aufhaldung von Abraum des Kalibergbaus. Nach Innovationen der Extraktionsverfahren, vor allem nach Ende des 2. Weltkriegs, besteht der Kalirückstand über 90% aus Steinsalz (NaCl), und durch eine starke Steigerung der Fördermengen fällt auch eine größere Menge Rückstand an. Die tatsächliche Zusammensetzung variiert abhängig vom Standort (Niessing, 2005). Wegen dieser historischen bzw. technischen Entwicklung unterscheidet man zwischen Althalden, die einerseits eine Beimischung von Abteufgestein bzw. Gipse und Tone enthalten, die sich an der Oberfläche nach einer langen Auswaschungsphase (meist >50 Jahre) angereichert haben (Niessing, 2005) und jüngeren Halden, die nur eine kurze Auswaschungsphase erfahren haben und z. T. noch in Betrieb sind. Weiterhin unterscheidet man zwischen Klein- und Großhalden. In fünf der sechs aktiven Werken der K+S AG (Zielitz/Magdeburg; Sigmundshall/Bokeloh; Neuhoof-Ellers/Fulda; Werk Werra mit Standorten in Wintershall, Hattorf; Ausnahme Standort Unterbreitzbach) wird die Aufhaldung in Großhalden betrieben.

Aufgrund der hohen Anteile an leicht löslichem Steinsalz führen Niederschlagsereignisse zu salzhaltigem Sickerwasser, welches aufgefangen wird und entsorgt werden muss. Bei Einleitung in Oberflächengewässer stellt das Sickerwasser durch hohe Chloridkonzentrationen eine Belastung der Oberflächengewässer (Vorfluter) dar. Im ungünstigsten Fall kann es zu einer Beeinträchtigung des Grundwassers kommen. Daher gibt es seit langem Überlegungen die Kalirückstandshalden abzudecken, um das Sickerwasseraufkommen zu reduzieren. Versuche mit statischen Abdeckungen (z.B. Folie) waren in der Vergangenheit nicht erfolgreich (vgl. Schmeisky et al., 1993; Schmeisky und Lenz, 1998). Bereits seit den 1950er Jahren finden Untersuchungen zur Rekultivierung von Kalirückstandshalden statt. Seit den 1980er Jahren wird an der Kalirückstandshalde Heringen III geforscht (Zusammenfassung vgl. Niessing, 2005). Das Ziel auf dieser und ähnlichen anhydritischen Althalden (z. B. Bleicherode) war, die selbstständige Begrünung auf den angereicherten Schichten (nicht-statische Schichten) durch Düngemaßnahmen, Ansaat und Verbesserungen der Wachstumsbedingungen zu unterstützen (z.B. Lücke, 1997; Schmeisky, 2000; Hofmann, 2004).

Im Jahr 1993 untersuchten Schmeisky et al. (1993) die Aufhaldung von Rückständen aus den Salzschlacken der Sekundär-Aluminium-Industrie in Stockach. Dabei wurde nach einer 30jährigen Liegezeit bereits eine hohe Artenzahl von Pflanzen (>40) angetroffen. Das sogenannte REKAL-Material (REcyclingKALi) fällt als Reststoff an, nachdem die gebrauchten Schmelzsalze der Aluminiumschmelze, die dann mit verschiedenen Metallen verunreinigt sind, die Anlage zur Aufbereitung am Werk Sigmundshall/Bokeloh durchlaufen haben. Hier wird u.a. das noch enthaltene Kalium ausgeschleust.

Durch die Ergebnisse in Stockach konnte von einer generellen Begrünbarkeit des Materials ausgegangen werden. Damit kam es für die Bildung einer mineralischen Abdeckschicht („technogenes Substrat“) für ein Rekultivierungsprojekt auf der Halde Sigmundshall in Frage. Der hohe Salzgehalt des Rückstandes bedingt hier, dass eine Etablierung von Pflanzen ohne eine Abdeckung durch eine Rekultivierungsschicht nicht stattfinden kann. Eine Begrünung ist ein erklärtes Ziel, da eine geschlossene und produktive Pflanzendecke zu einer hohen aktiven Verdunstungsleistung führt, so dass die Sickerwassermenge minimiert werden kann. Weiterer Vorteil ist eine langfristige physikalische Stabilisierung der Oberfläche durch die Wurzeln.

Die Ausdehnung einer Großhalde setzt einen großen Materialbedarf für eine Abdeckung voraus. Deswegen ist eine Abdeckung mit herkömmlichen Materialien (Boden, Bauschutt, Kompost etc.) aus Platzbedarf und Mengenverfügbarkeit nicht umsetzbar (vgl. Zundel, 2000; Scheer, 2001). Zusätzlich zur abweichenden Zusammensetzung des Rückstandes unterscheidet sich diese Großhalde in Bokeloh von der Kleinhalde III in Heringen erheblich in Volumen und Höhe. Daher wurde an einer Dünnschichtummantelung gearbeitet, bei der eine Abflachung des Böschungswinkels aufgrund der Substrateigenschaften nicht nötig ist. Dies wiederum führte zu starken Einsparungen des Platz- und Materialbedarfs (Abb. 1). Dadurch ergeben sich aber steile Flanken (30-40°) mit einer Länge bis zu 300 m. (Schmeisky und Papke, 2013). Aus diesem Grund wurden puzzolanische Zuschlagstoffe gesucht, die durch ihre zementartige Reaktion zu einer statischen Stabilisierung des REKALs auf den Haldenflanken beitragen. In diesem Zusammenhang wurde man im nahegelegenen Kohlekraftwerk Hannover-Stöcken fündig. Das SAV-Stabilisat, ein Rückstand aus der Rauchgasreinigung (SprühAbsorptionsVerfahren), ist eine Mischung aus Flugasche und Rauchgasentschwefelungsprodukt (REA) (Scheer, 2001).

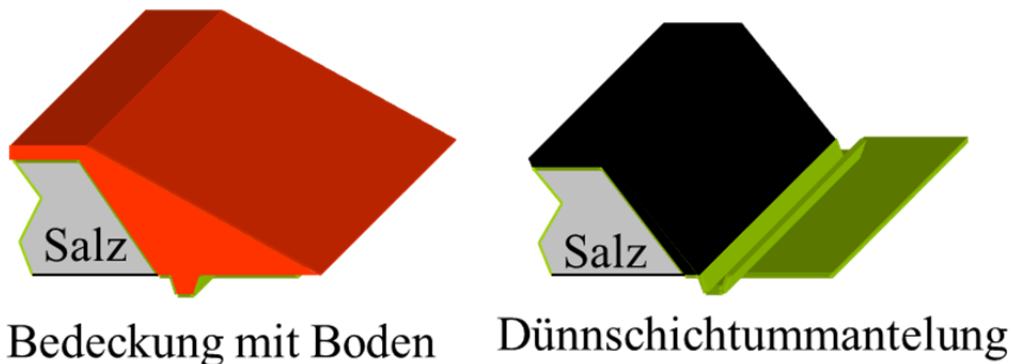


Abb. 1: Schematische Darstellung des unterschiedlichen Material- und Platzbedarfes, für herkömmliche Materialien (links) und die Dünnschichtummantelung (rechts)

Neben der Forschungsarbeit am Projekt in Sigmundshall wurde in der Forschungsgruppe an der Universität Kassel in Witzenhausen auch an anderer Stelle an der Eignung von (puzzolanischen) Aschen für Begrünungsvorhaben gearbeitet. Hier kamen beispielsweise Wirbelschichtaschengemische (Podlacha, 1999) und Kraftwerksreststoffe zur Optimierung von Rekultivierungsschichten (Braunisch, 2008) zum Einsatz. Eine Zusammenstellung von Arbeiten anderer Forschungsrichtungen ist ebenfalls bei Braunisch (2008) zu finden.

2. Halde Sigmundshall/ Bokeloh: Ergebnisse der Untersuchungen

In diesem Teil wird näher auf die einzelnen Versuche und Ergebnisse im Zusammenhang des Rekultivierungsprojektes auf der Halde Sigmundshall in Bokeloh eingegangen.

Ab 1997 wurden unterschiedliche Mischungen aus REKAL und SAV-Stabilisat in Gewächshausversuchen und in einem Kleinfeldversuch für eine Eignung als Rekultivierungsschicht getestet. Bei Untersuchungen (1997-1999) der **Universität Hannover** im Rahmen des wissenschaftlichen Begleitprogramms kam es zum Einsatz von Lysimetern an der Südseite der Halde, während im Labor die hydraulischen Eigenschaften der Materialien/-mischungen untersucht wurden. Unter Berücksichtigung der Klimadaten entstand ein Wasserhaushaltsmodell. Dabei ergab eine Simulation eine mittlere jährliche Sickerwasserreduzierung unter einer optimalen Begrünungsschicht von 75%, die Kapazität des reinen Substrates lag bei dieser Berechnung bei 40% (Hermesmeier, 2001). Diese im Modell berechneten durchschnittlichen Werte für einen längeren Zeitraum wurden jedoch durch Untersuchungen Podlachs 1999 mit Verdunstungsraten bis ca. 85% übertroffen. Die bereits vollständig begrünten Flanken in Bokeloh weisen keine sichtbaren Sickerwassermengen auf. Dabei ist eine getrennte Strauch- bzw. Baumschicht so gut wie nicht etabliert.

Die **Forschungsgruppe in Witzenhausen** führte Gewächshausversuche im Kontext von Mischungsverhältnissen, zur Nährstoffoptimierung, und zu Keim- und Aufwuchsverhalten durch, die eine Begrünungsfähigkeit eindeutig bewiesen. Gleichzeitig wurde 1997/98 ein Lysimeterfeldversuch (n=13, versch. Größen) auf dem Gelände des Werkes Sigmundshall eingerichtet. Hier kam neben dem reinen REKAL eine Mischung aus 70% REKAL und 30% SAV zum Einsatz. Dieses Verhältnis hatte sich in den Gewächshausversuchen als am besten geeignet herausgestellt. Das Ergebnis der Sickerwasserreduzierung aller Lysimeter betrug durchschnittlich 50% (65% bei einer Schichtdicke von 3,3 m) der Niederschlagsmenge. Die besten Werte betrugen bereits in diesem nahezu unbegrünten Zustand (eine Einsaat erfolgte erst am Ende der Auswertungsphase) über 70% (Scheer, 2001). Innerhalb des Versuchszeitraums von 16 Monaten wurden bereits Spitzenwerte von über 90% erreicht (Schmeisky, 2000).

Am Haldenfuß der Südflanke wurde 1997 ein hangparalleles Kleinversuchsfeld angelegt. Es war in 13 Parzellen mit unterschiedlichen Mischungsverhältnissen unterteilt. Teilweise kam es zusätzlich zu Beimischungen von Kompost und Wirbelschichtaschen (WSA). Weitere Versuchsparameter bezogen sich auf unterschiedliche Ansaatmischungen und die Pflanzenernährung. Von 1998 bis 2004 untersuchte Niessing (2005) die Vegetationszusammensetzung und -entwicklung, sowie Substratzusammensetzung und Bodenmechanik. Die Ergebnisse zeigen, dass man auf dem technogenen Substrat trotz hoher pH-Werte eine produktive Vegetationsschicht, die sogar einen unerwarteten Artenwandel über alle Mischungen hinweg aufweist, etablieren kann. Großen Einfluss auf die Entwicklung der Pflanzen haben die Nährstoffversorgung und klimatische Faktoren (Wasserhaushalt).

Trotz einer guten Stabilität der Rekultivierungsschicht (Scherfestigkeit) besitzt das Material ein sehr gutes Wasseraufnahmevermögen und eine hohe Wasserhaltefähigkeit (bis zu 45%). Das ist insbesondere auf eine außergewöhnliche Zusammensetzung der Partikelgrößen zurückzuführen. Da das REKAL selbst einen hohen Salzgehalt (> 50%) aufweist wurden in unterschiedlicher Form ebenfalls Untersuchungen zur Aussüßung und zu chemisch-physikalischen Parametern durchgeführt (Wöhler, 1999; Bericht Uni Hannover, 1999; Scheer 2001; Niessing, 2005).

Nach einer zweijährigen Aussüßungszeit wurde im Rahmen eines **Großfeldversuches** 2002 die erste Schüttung des technogenen Materials (REKAL/SAV 7:3, Schüttdicke mind. 4 m) auf einer ganzen Haldenflanke (Nordflanke) begrünt. Es wurden unterschiedliche Ansaat- und Düngetechniken getestet. Dabei wurde der Prototyp eines „Haldenigels“ entwickelt, mit dem bei einer punktuellen Auflockerung der verhärteten Oberfläche auch gleichzeitig Dünger und Saatgut ausgebracht werden konnte (Abb. 2).



Abb. 2: Laufbild des „Haldenigels“ (links) mit aufgelaufenem Saatgut nach wenigen Wochen (rechts)

Die Ergebnisse des Kleinversuchsfeldes führten zur Auswahl der Grassaatmischung. Auch hier stellten sich rasche Begrünungserfolge ein, die Vegetation wurde aber teilweise stark vom Salz beeinflusst (Niessing, 2005). In den folgenden Jahren kam es jeweils zur Einsaat weiterer Teilflächen, auch auf dem Nordplateau (2005) und der Südflanke (ab 2006, siehe Abb. 3).

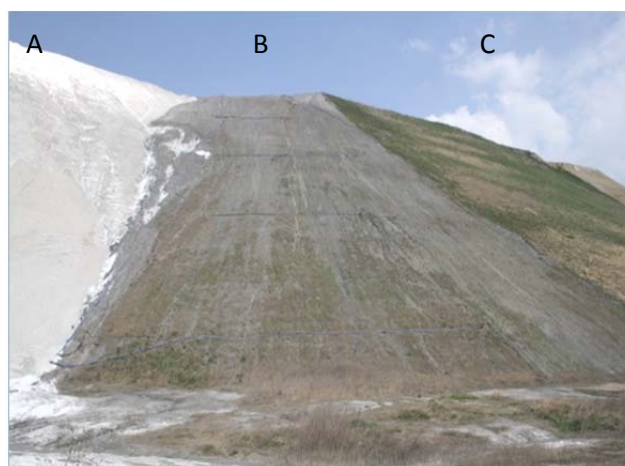


Abb. 3: Verschiedene Stadien der Rekultivierung: A reine Salzhalde, B geschüttete Rekultivierungsschicht mit Ansaat, C flächendeckende Vegetation auf der Rekultivierungsschicht

Die begrünte Gesamtfläche erstreckt sich nun über sechs Teilflächen und summiert sich auf ungefähr zehn Hektar. Das wissenschaftliche Begleitprogramm zu diesen Großfeldversuchen beinhaltete einerseits die Untersuchung der Pflanzenentwicklung in Bezug auf Nährstoffsituation, Einfluss von

Salzen und Schwermetallen, sowie Aufwuchs und Biomasseproduktion. Andererseits war bereits in den ersten Jahren eine starke Zunahme (Einwanderung) und Fluktuation an Pflanzenarten zu erkennen, die sich im Laufe der Jahre in der Entwicklung verschiedener „Vegetationstypen“ auf jeweils unterschiedlich beeinflussten Teilflächen (z.B. Salzeinfluss) niederschlug. Im Jahr 2012 wurden 132 Arten krautige Pflanzen und mindestens 30 Gehölze auf den begrünten Haldenflächen kartiert. Die Ergebnisse der Biomasseanalysen zeigten - nach anfänglichen Düngemaßnahmen wurde in späteren Begrünungsjahren kein Dünger mehr zugeführt - eine hoch produktive, stabile Vegetationsdecke. Die Ernte des oberirdischen Aufwuchses im Jahr 2011 auf unterschiedlich alten Flächen zeigte Erträge von 64-141 dt/ha. Diese Ergebnisse sind mindestens mit produktiven Wirtschaftswiesen vergleichbar. Damit kann von einem hohen Sickerwasserreduzierungspotenzial durch die Evapotranspirationsleistung der Vegetation ausgegangen werden. Auch Substratuntersuchungen wurden durchgeführt. Die Untersuchung des Wirkungspfades Boden-Pflanze für verschiedene Schwermetalle ergab keine erhöhten Aufnahmen der Pflanze. Eine Durchwurzelung des Substrats reichte mindestens in eine Tiefe von bis zu 0,6 m (Papke und Schmeisky, 2013). Anders als bei Niessing (2005) vermutet, konnte auf den Flächen bereits nach weniger als zehn Jahren eine Bodenbildung, und damit eine Etablierung biologischer Kreisläufe festgestellt werden. Neben zahlreichen unterschiedlichen Insekten sind insbesondere Mäuse (*Mus sp.*), aber auch Feldhasen (*Lepus europaeus*) besonders häufig. Dies führt ebenfalls zu einer hohen Dichte an unterschiedlichen Greifvögeln wie z.B. Bussarde (*Buteo sp.*), Turmfalke (*Falco tinnunculus*) oder Roter und Schwarzer Milan (*Milan milvus* und *migrans*) (Papke und Schmeisky, 2013).

Eine Betreuung der etablierten Rekultivierungsflächen ist nur noch im Rahmen der Kontrolle wichtiger Parameter (v.a. pH, Standfestigkeit) und zur Untersuchung der weiteren Sukzessions- und Vegetationsentwicklung notwendig. Die aktuellsten Ergebnisse aus 2014 zeigen einen weiteren Anstieg der Pflanzenarten (163, davon 36 Gehölze). Insbesondere die Zunahme von Gehölzen in Gesamtvorkommen und auf Artenniveau zeigt die Entwicklung hin zu einem dreischichtigen Vegetationsaufbau, der das Potenzial zur Sickerwasserreduzierung erhöht. In Kombination mit den hohen Windgeschwindigkeiten, der Exposition und der steilen Haldenflanken sind Werte von 80-90% realistisch.

3. Übertragungsmöglichkeiten der Begrünungstechnik auf Großhalden generell

Aufgrund der positiven Ergebnisse der Begrünung einer Dünnschichtummantelung zur Rekultivierung der Kalirückstandshalde Sigmundshall/Bokeloh stellt sich die Frage nach der Übertragbarkeit dieser Methode auf andere Kalirückstandshalden in Deutschland. In diesem Zusammenhang muss ganz klar auf den standortspezifischen „**Sonderfallcharakter**“ am Werk Sigmundshall in Bokeloh hingewiesen werden.

Die Überlegungen bzw. die Entwicklung des technogenen Substrates in Bokeloh waren gänzlich durch eine aktuelle, regionale Verfügbarkeit durch (a) die Aufbereitung des REKALs auf dem Betriebsgelände und (b) die Nähe zum Kraftwerk Hannover-Stöcken beeinflusst. Bis auf eine weitere Art der Wirbelschichtaschen (WSA) wurden keine alternativen mineralischen Komponenten in die Untersuchungen einbezogen. Dies liegt sicherlich in erster Linie daran, dass auf allen Untersuchungsebenen (Gefäßversuche, Lysimeterversuche, Feldversuche) die Eignung der Materialmischung bestätigt wurde. Die Einbeziehung von organischen Materialien erfolgte nur im

Zusammenhang von Problemlösungen meist im Zusammenhang mit Erosionsschutzmaßnahmen (Kantenbegrünung und Ansaattechnik). Das REKAL, als Hauptkomponente, fällt in dieser Form allerdings nur in begrenzten Mengen in Bokeloh an. Für die weiteren Abdeckmaßnahmen ist es dort langfristig verplant, da das zukünftige Ziel die sukzessive, komplette Abdeckung der Halde ist, um später direkte Lösungserscheinungen am Salzkörper durch Niederschlagsereignisse weitgehend auszuschließen. Vor dem Hintergrund des Materialbedarfes zur Abdeckung einer oder mehrerer zusätzlicher Großhalden ist die Materialverfügbarkeit des REKAL-Materials sowieso als zu gering einzustufen.

Daher ergab sich ein dringender Forschungsbedarf zu alternativen Lösungen. Die bereits in der Einleitung erwähnten Arbeiten zur Eignung von mineralischen Verbrennungsrückständen in Rekultivierungsschichten konnte bereits eine generelle Begrünbarkeit dieser Materialgruppe zeigen (z.B. Podlacha, 1999; Braunisch, 2008). Somit bot es sich an in dieser Richtung weiter zu forschen.

Durch die Erfahrungen und Ergebnisse in Bokeloh können die **Ansprüche an vergleichbare Materialmischungen als technogenes Substrat für eine Dünnschichtummantelung** formuliert werden. Diese Ansprüche sind unterschiedlichster Natur:

- **Standfestigkeit der Rekultivierungsschicht** (Scherfestigkeit etc.)
 - Statische Stabilität der Abdeckung auf salzhaltigem Untergrund bei gleichzeitig vorhandener Plastizität („Selbsteilungsvermögen“ bei eventuellen Setzungen und Rutschungen, bzw. Verformung des Salzkörpers)
 - Stabilität der Oberfläche auf starken Neigungen (geringes Erosionsrisiko; z.B. Puzzolanität)
- **Begrünbarkeit auf unterschiedlichen Standorten** (Mikroklimata)
 - Gute Wasserhaltefähigkeit
 - Hohes Wasserinfiltrationsvermögen
 - Verfügbarkeit von Luft, Nährstoffen und Wasser (Porenvolumen, Korngrößenverteilung etc.)
 - Möglichkeit zur Etablierung von Pflanzen (Keimfähigkeit, Biomasseentwicklung, Durchwurzelung, Ausbreitung und Flächenschluss)
- **Technische Parameter**
 - Schichtdicke möglichst nicht unter 3m Möglichkeit der großtechnischen Ausbringung (Abrollverhalten etc.)
 - Gute Transport- und Lagereigenschaften
- **Langfristige Verfügbarkeit der Materialien in ausreichender Menge**

Zusätzlich sollte nicht zuletzt aus ökonomischen, ökologischen und logistischen Gründen bei der Materialauswahl - wie auch in Bokeloh - auf eine regionale Verfügbarkeit der Massenströme Wert gelegt werden, um das Transportaufkommen möglichst gering zu halten.

An dieser Stelle sollte ebenfalls daraufhin gewiesen werden, dass für eine generelle Begrünung von Kalirückstandshalden eine nicht zu starke Einschränkung und Fixierung auf wenige mögliche Komponenten stattfinden sollte. Eine Austauschbarkeit von Einzelmaterialien und Materialmischungen kann zur Stabilität des benötigten Stoffstroms beitragen. Dadurch kann auf Veränderungen am Markt (z.B. durch technische Innovation oder Gesetzeslage) durch Anpassung der Materialflüsse besser reagiert werden. Gerade durch die lange Laufzeit von Begrünungsmaßnahmen

auf einer Großhalde sollten sowohl eine vorläufige Planungssicherheit als auch Abänderungen möglich sein.

Die in Frage kommenden Massenströme, also **Hauptkomponenten** für ein alternatives technogenes Substrat, müssen anfänglich nach zwei Hauptkriterien begutachtet werden. Erstens nach ihren spezifischen Eigenschaften Teile der o.g. Ansprüche erfüllen zu können, zweitens nach ihrer Verfügbarkeit (Mengenaufkommen). Hierfür werden verschiedene Fraktionen und Korngrößen aus unterschiedlichen Verbrennungsprozessen in Betracht gezogen, die dann als eine Art „Konstruktionsrahmen“ dienen können. Insbesondere bei der Aufarbeitung von Verbrennungsprodukten kann es aus technischen Gründen (z.B. Absiebungen, Ausschleusungstiefen von NE- und FE-Metallen) zu Veränderungen der Fraktionen und Mengenströme kommen. Dies kann allerdings auch ganz eindeutig zu einer Qualitätsverbesserung z.B. im Hinblick auf Schwermetallfrachten oder Korngrößenverteilung führen.

Um bestimmte Eigenschaften an die unterschiedlichen, teilweise widersprüchlichen Ansprüche anzupassen bzw. nicht vorhandene nötige Eigenschaften hinzuzufügen, können andere Materialien als **Zuschlagstoffe** eingemischt werden. In diesem Zusammenhang müssen in erster Linie Materialien mit puzzolanischen Eigenschaften genannt werden (z.B. Produkte der Rauchgasreinigung). Aber auch Materialien mit hohen Anteilen an organischer Substanz (z.B. Kompost, org. Dünger etc.) sowie natürliche mineralische Materialien (z.B. Sand) fallen unter diese Kategorie. Hier muss natürlich auch auf mögliche Wechselwirkungen der unterschiedlichen Materialien untereinander geachtet werden.

Für ein Begrünungskonzept der Kalirückstandshalden im Werragebiet wurden mit einigen Materialien bereits Gewächshausversuche durchgeführt. Diese führten zu einer Auswahl von vier Mischungen für einen aktuell laufenden Lysimeterversuch auf der Halde IV in Heringen. Darauf wird im Anschluss näher eingegangen. Die K+S Entsorgung GmbH ist überdies mit einer großflächigen Suche nach verwendbaren Materialien beauftragt. Diese können ebenfalls auf eine Eignung überprüft und bei einer positiven Einschätzung im Rahmen eines mehrstufigen Versuchsaufbaus (Gewächshausversuche, Lysimeterversuche, Kleinfeldversuche, Schüttversuche etc.) auf die Erfüllung der Ansprüche getestet werden.

4. Erste Ergebnisse laufendes Projekt „Begrünungskonzept für Kalirückstandshalden im Werragebiet“

In einer Reihe von **Gewächshausversuchen** (2011/12) wurden unterschiedliche Fraktionen bzw. Herkünfte von aufbereiteten Schlacken aus Rostfeuerungsanlagen (aus der Hausmüllverbrennung= HMV) sowie Wirbelschichtaschen aus einem Ersatzbrennstoff-Kraftwerk (EBS) auf ihre Eignung überprüft. Zuschlagstoffe waren neben Waschsanden aus der Kiesgewinnung zwei organische Komponenten (Kompost und eine Organikfraktion aus der Hausmüllaufbereitung), sowie zwei Produkte aus der Rauchgasreinigung von Kohlekraftwerken und Produkte aus der Gipskartonherstellung. Eine generelle Begrünbarkeit konnte bei allen untersuchten Mischungen festgestellt werden, sogar auf den reinen Schlacken und Aschen. Allerdings führte eine starke bis extreme Aushärtung der Oberfläche bei einigen Mischungen zu einem Kümern bzw. Absterben der Pflanzen nach der Keimphase. Eine Verbesserung der Stabilität konnte durch Produkte aus der Rauchgasreinigung (Puzzolanität), beziehungsweise der Wasserhaltefähigkeit durch andere

Zuschlagstoffe (Gips, Sand), erreicht werden. Die Durchwurzelung und die Nährstoffversorgung wurden durch Zugabe von Sand, Kompost und der Organikfraktion positiv beeinflusst. Bei letzteren kann von einer starken Einsparung von mineralischen Düngern und späteren Beschleunigung von biologischen Prozessen im Substrat ausgegangen werden. Zusätzlich senken diese Anteile die hohen pH-Werte der Verbrennungsrückstände. Unterschiedliche Mischungsverhältnisse von Materialien mit o.g. spezifischen Eigenschaften wurden getestet. Auch unter Berücksichtigung der regionalen, aktuellen Mengenverfügbarkeit wurden vier Mischungen für einen Lysimeterversuch ausgewählt (Schmeisky und Papke, 2012, unveröffentlicht)

Die Errichtung eines **Lysimeterfeldes** fand im Juli 2013 auf der Halde IV in Heringen statt, damit empirische Daten unter den spezifischen Klimabedingungen am Standort erhoben werden können. In das Lysimeterfeld (Schüttdicke 3 m) sind acht Lysimeter eingelassen, jede der vier Mischungen wird damit doppelt beprobt. Variante 1 und 2 bestehen nur aus HMV-Schlacken und dem SAV-Produkt (Rauchgasreinigung Kohlekraftwerk) mit einem Mischungsverhältnis von 8:2 beziehungsweise 7:3. In Variante 3 findet sich zusätzlich Waschsand (6:3:1), während bei Variante 4 zwei Fraktionen aus der Bettasche des EBS-Kraftwerkes zugeschlagen sind (5:3:1:1). In die obere Schicht wurde flächendeckend Kompost (entspricht 200 t/ha) eingearbeitet. Nach der Aufsättigung der Lysimeter kam es im Oktober 2013 zur Einsaat und Düngung der Versuchsfläche inklusive der steilen Böschungen des Lysimeterfeldes (Schmeisky und Papke, 2013, unveröffentlicht). Die Versuchslaufzeit ist für mindestens drei Jahre vorgesehen. Neben Begrünungsparametern wird vor allem auch die Qualität und Quantität des Sickerwassers untersucht. Die vorläufigen Lysimeterergebnisse aus Heringen zeigen bereits eine Evapotranspirationsleistung von ca. $74\% \pm 3,4\%$ im Versuchsjahr 2014 (Hensel et al., 2015 unveröffentlicht). Die Vegetationsentwicklung kam beim Biomasseertrag auf gute Ergebnisse, trotz geringer Wurzeltiefen von maximal 20 cm. Bereits in der ersten Vegetationsperiode wurden ähnliche Biomasseerträge (35-55 dt/ha) wie 2002 in Bokeloh festgestellt. Ebenso haben sich erste Pflanzenarten - die nicht Bestandteil des Saatguts waren – auf dem Lysimeterfeld etabliert. Auf der Oberfläche des Versuchsfeldes konnte bereits im Mai 2014 ein vollständiger Vegetationsschluss beobachtet werden (Schmeisky et al., 2014). Mit endgültigen Ergebnissen ist erst nach einer längeren Versuchsdauer zu rechnen, frühestens nach Abschluss des Jahres 2015. Aufgrund der jetzigen Untersuchungen ist von einer Evapotranspirationsleistung von 80% auszugehen.

5. Mengenaufkommen und Qualitäten

Das Fazit der bisherigen Ergebnisse ist, dass: (a) ein großer Teil der Kraftwerksnebenprodukte und der Rückstände aus weiteren Verbrennungsprozessen sowohl als Einzelmaterial als auch in Mischung begrünbar ist; (b) bei entsprechenden Zumischungen von puzzolanischen Nebenprodukten eine Standfestigkeit auf den Großhalden aus Kalirückständen gewährleistet ist; (c) die Wasserhaltefähigkeit dieser Mischungen guten bis sehr guten natürlichen Böden entspricht, bzw. diese sogar übertreffen kann, (d) eine Verdunstungsleistung von 80% realistisch ist.

Jährlich fallen in Deutschland aus der thermischen Verwertung in Kraftwerken ca. 30 Millionen Tonnen Rückstände an. Der größte Anteil hiervon setzt sich aus Kraftwerksnebenprodukten zusammen. Das Gesamtaufkommen (Stein- und Braunkohle) lag 2004 bei über 26 Millionen Tonnen (Reichenberger et al., 2007). Die aktuellen Zahlen für 2011 liegen laut Fachverband für Strom- und Wärmeerzeuger bei ca. 22 Millionen Tonnen (VGB PowerTech, 2015). Dieses Ergebnis bestätigt die

Einschätzung einer Potenzialstudie („Referenzszenario 2“), deren weitere Hochrechnung für 2020 mit einem vergleichbaren Anfall rechnet (trend research, 2006). Die Rückstände aus der thermischen Behandlung von Müll entsprechen einer Größenordnung von 4-5 Millionen Tonnen pro Jahr (4,1 Mio. t Rohschlacke: Reichenberger et. al, 2007; 4,8 Mio. t aus MVA, 0,4 Mio. t aus EBS: UBA, 2010). Prognosen rechnen kurzfristig bereits mit einer weiteren Zunahme dieses Anteils auf 5-6% (UBA, 2010). Die Rückstände für Klärschlamm- und Biomasseverbrennung lagen bisher bei um 1% des Gesamtaufkommens, dies entsprach 2004 einer berechneten Menge von 240.000 t bzw. 365.000 t. Die Autoren wiesen 2007 bereits daraufhin, dass der tatsächliche Anfall höher liege, da nach 2004 eine stark gestiegene Nachfrage an v.a. Holzbrennstoffen vorgelegen habe (Reichenberger et al., 2007), diese Entwicklung hat sich bis heute weiter verstärkt.

Zusammenfassend kann also festgestellt werden, dass die Gesamtmenge an Rückständen stabil bleiben, bzw. vor dem Hintergrund der Energieerzeugung und des Konsumverhaltens sogar noch ansteigen, wird. Die tatsächliche Menge an Rückständen ist neben dem Anfall an Verbrennungsmaterialien auch abhängig von der Anzahl und Leistungsfähigkeit der eingesetzten Kraftwerke. Auf der Ebene der Kraftwerkstechnik entscheidet sich die Unterteilung in Qualitäten. Hierbei sind neben der Zusammensetzung der Ausgangsprodukte auch die Verbrennungstechnik und Aufarbeitungstechnik und –tiefe ausschlaggebend. Diese Faktoren führen dann zur Bildung unterschiedlicher Fraktionen.

Zahlreiche Nebenprodukte fallen in strom- und wärmeerzeugenden Kraftwerken an, wie z.B. Kesselasche/Kesselsand, Flugasche, Wirbelschichtasche, SAV-Produkte und REA-Gips (Mengenauflkommen siehe VBG PowerTech, 2015).

Von primärer Bedeutung für die Standfestigkeit einer Rekultivierungsschicht sind Rückstände mit puzzolanischen Eigenschaften. Hier sind in erster Linie Produkte aus der Rauchgasreinigung zu nennen, die teils sehr starke puzzolanische Reaktionen zeigen. Bei dieser Reaktion schließen sich Puzzolane (metastabile Mineralphasen und metastabile amorphe Glasphasen (Ca(OH) und SiO_2) unter Zugabe von Wasser in ein sehr festes, wasserunlösliches Gefüge zusammen. Weiterhin kann eine hydraulische Abbindung (z.B. Ettringit-Bildung bei Anwesenheit von Aluminaten und Sulfaten) und eine Rekristallisation erfolgen (Zingl et al., 2009; Zingl, 2011).

Die aufbereiteten Aschen und Schlacken aus Müllverbrennungsanlagen (Rostfeuerung, Wirbelschichtverbrennung, MHKW, EBS-Kraftwerk etc.) besitzen ebenfalls teilweise ein puzzolanisches Potenzial, dies ist allerdings stark mit der Aufarbeitungstiefe (Brechen, Mahlen, Sieben) und der Ablagerungsdauer verknüpft. Je höher der Anteil an Fraktionen mit größeren Partikelgrößen an einem technogenen Substrat ist, desto höher ist auch der Bedarf an Materialien mit feinen Partikelgrößen. Diese werden benötigt, um die Wasserhaltefähigkeit und die Porenzusammensetzung des Materials zu verbessern. Aschen biogenen Ursprungs (Holzaschen, Klärschlammaschen etc.) stellen weiterhin langfristig eine Nährstoffquelle für die Vegetation dar.

Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass durch den Zusatz feiner Partikel das Volumen des technogenen Substrates nicht unbedingt in Relation zur Zugabemenge vergrößert wird.

Die Schichtdicke sollte nicht unter 3 m betragen, um der Vegetation ausreichend Wurzelraum zur Verfügung zu stellen, da sich voraussichtlich auch Gehölze ansiedeln werden. Innerhalb dieses Wurzelraumes kann das gespeicherte Wasser aktiv durch die Pflanzen verdunstet werden. Zusätzlich sollte die Rekultivierungsschicht trotz einer guten Wasserhaltefähigkeit dick genug sein, um bei

Starkregenereignissen ein Durchlaufen des Wassers bis auf den Salzkern zu vermeiden. Durch ein Abschütten des Materials vom Haldentop, wird die Schichtdicke, je nach Schüttwinkel, an der oberen Flanke dünner sein, als am Haldenfuß. Dies muss berücksichtigt werden.

Die o.g. zahlreichen Produkte und Fraktionen (z.B. Absiebungen) aus der thermischen Verwertung werden in der Literatur meist als nahezu vollständig verwertet beschrieben (z.B. 99% Gesamtverwendung der Kraftwerksnebenprodukte, VGB PowerTech, 2015). Auch MVA-Schlacken werden zu rund 90% verwertet (z.B. als Grubenmörtel, Versatzbaustoff und auch unter Tage eingesetzt); die nicht verwertbaren Mengen auf Deponien beseitigt (UBA, 2010). Einzelne Verwendungsgebiete sind auch mineralische Produkte im Betonbau, Bergbau, Straßen- und Wegebau, sowie im Erd-, Garten- und Landschaftsbau. Der Einsatz erfolgt u.a. als Bodenhilfsstoff, zur Konditionierung von Schlämmen und zur Beimischung in der Zementindustrie (Thome, 2012). Auf Deponien werden diese Materialien bereits als Deponie-Ersatzbaustoff und in der Rekultivierung (Kubatur u.ä.) eingesetzt. Beim Deponiebau handelt es sich meist um zeitliche begrenzte Projekte bis zum Abschluss von Verfüllung und anderer Maßnahmen. Daher werden auch zukünftig immer neue Wege der Verwertung gesucht. Letztendlich spielen hier auch ökonomische Gegebenheiten eine große Rolle.

Weitere Materialien aus anderen Quellen, die für die Herstellung eines technogenen Substrates in Frage kommen könnten, sind Abraumprodukte des Bergbaus (z.B. Basaltmehl aus Schotterherstellung, Spülsande aus Kieswerken, Abraum aus dem Tagebau), Bypassstäube aus der Zementindustrie und Aschen aus der Papierschlammverbrennung. Als Beimischung sind auch wieder die Materialien der herkömmlichen Haldenabdeckung (Bauschutt, Erde, Schotter etc.) denkbar.

Ausgehend von der Gesamtmenge der anfallenden Produkte gehen wir davon aus, dass die Mengenströme für die Ummantelung von Kalirückstandshalden zur Verfügung stehen, wobei die Teilmengen sich nach den tatsächlichen Mischungsverhältnissen richten werden. Die Möglichkeit einer Veränderung der Einzelmaterialien bzw. der Mischungsanteile besteht bei Veränderung des Marktangebotes.

6. Zusammenfassende Schlussbetrachtung

Zusammenfassend kann nur eine positive Bilanz für die Eignung aller hier näher dargestellten Materialien und Materialmischungen gezogen werden. Die generelle Begrünbarkeit steht außer Frage. Die Leistungsfähigkeit einer Vegetation, und damit auch ihr Evapotranspirationsvermögen, kann durch eine Beeinflussung der Wachstumsbedingungen z.B. durch eine Konditionierung des technogenen Substrates durch Zuschlagstoffe vor der Abdeckung beeinflusst werden. Kurz- bis mittelfristig sind auch Eingriffe in den Nährstoffhaushalt (z.B. Düngung, pH-Wert Kontrolle) oder in den Etablierungsprozess einer Vegetation (z.B. Nachsaat oder Pflanzung, Oberflächenbehandlung zum Erosionsschutz) auf der Rekultivierungsschicht möglich.

Für ein technogenes Substrat kommen Kombinationen von verschiedenen Stoffen und Materialströmen in Betracht. Das Aufkommen von Rückständen aus der thermischen Energie- und Stromerzeugung, sowie aus der thermischen Abfallverwertung liegt in einer Größenordnung von 30 Millionen Tonnen pro Jahr. Die geplanten Hauptkomponenten aus den Müllverbrennungsanlagen fallen jährlich zu ca. 5 Millionen Tonnen an. Damit sollte eine ausreichende Mengenverfügbarkeit

gegeben sein. Die einzelnen Mischungen müssen allerdings unabhängig voneinander auf ihre individuelle Begrünbarkeit, Standsicherheit und Sickerwasserqualität geprüft werden.

Die Modellberechnung für Bokeloh gab unter der Voraussetzung einer (rechnerisch) optimalen Vegetationsdecke ein Sickerwasserreduzierungspotenzial von 75% (bezogen auf die Niederschlagsmenge) an (Hermesmeier, 2001). Bereits nach dem ersten Begrünungsjahr konnte für eine Schichtdicke von ca. 3 m mit einer nicht geschlossenen Vegetationsdecke Werte von 65% empirisch bestätigt werden (Lysimeterversuch Scheer, 2001). Unter Berücksichtigung einer hochproduktiven, mehrschichtigen Vegetationsdecke, wie sie jetzt bereits auf den Begrünungsflächen etabliert ist, ist von einem tatsächlich sehr viel höheren Potenzial auszugehen. Die Untersuchungen von Braunisch (2008) zeigen deutlich eine Abhängigkeit der Sickerwasserbildung von der Durchwurzelungstiefe der Rekultivierungsschicht. Bei seinen Untersuchungen war das eingesetzte Material schon nach weniger als drei Jahren bis zwei Meter Tiefe durchgewurzelt und führte zu einer Sickerwasserreduzierung von über 80%. Damit könnten die Prognose von Niessing (2005) und die Einzelwerte (Schmeisky, 2000) mit Werten von 80-90% unterstützt werden. Die vorläufigen Ergebnisse des Lysimeterversuches auf Heringen IV sind ebenfalls sehr erfolgversprechend, da in der letzten Versuchsperiode (2014) bereits eine Sickerwasserreduzierung von ca. 74% bei geringen Wurzeltiefen erreicht wurde. Mit zunehmendem Aufwuchs und fortschreitender Durchwurzelungstiefe wird von einer über 80%igen Sickerwasserreduzierung schon Ende der Vegetationsperiode 2015 (spätestens 2016) ausgegangen. Um auch großflächig die Eignung eines technologischen Substrates auf Basis von HMMV-Produkten bezüglich der Ansprüche für eine begrünbare Dünnschichtummantelung zu testen, ist bis zur großtechnischen Durchführung noch ein weiterer Feldversuch vorgesehen. Dieser befindet sich für die Halde in Hattorf in Planung, hier sollen die Materialien, insbesondere weitere statische und technische Parameter (z.B. Aufbringung), direkt auf der steilen Haldenflanke getestet werden. **Generell ist eine Dünnschichtabdeckung auf den Halden des Werkes Werra realisierungsfähig.**

Witzenhausen, den 26.02.2015


Prof. Dr. H. Schmeisky


MSc. G. Papke


Dr. A. Schmeisky

7. Literaturquellen

Braunisch, F. (2008): Untersuchungen zum Aufbau einer funktional optimierten Rekultivierungsschicht auf einer hochbasischen Aschendeponie. Ökologie und Umweltsicherung 30. Universität Kassel, Fachgebiet Landschaftsökologie und Naturschutz

Bericht Uni Hannover [Hermsmeyer, D. und van der Ploeg, R. Fachgebiet Bodenphysik Universität Hannover (1999)]: Abschlussbericht zum WBP Punkt 8: Wasserhaushaltsberechnungen und Wirksamkeit der Haldenabdeckung. In: Wissenschaftliches Begleitprogramm (WBP) zur Abdeckung und Begrünung der Kalirückstandshalde des Werkes Sigmundshall in Bokeloh bei Wunstorf. WBP Abschlussbericht 02/2000 der K+S GmbH, unveröffentlicht

Hensel, O.; Retz, S.; Schellert, C. und Bilibio, C. (2015): Begrünungskonzept für Kalirückstandshalden im Werra-Gebiet. Stufe II, Feldversuch auf der Halde IV Heringen, 2. Zwischenbericht - Teilbericht B. Universität Kassel, Fachgebiet Agrartechnik, unveröffentlicht

Hermsmeyer, D. (2001): Bodenphysikalisch-hydrologische Bewertung von Rückständen der Aluminium-Kreislaufführung als Infiltrationsbarriere für eine Halde des Kalibergbaues. Dissertation am Fachbereich Geowissenschaften und Geografie der Universität Hannover

Hofmann, H. (2004): Rekultivierung von Rückstandshalden der Kaliindustrie -5- Untersuchungen zur Begrünung und zur Sukzession auf einer anhydritisch geprägten Rückstandshalde der Kaliindustrie im Werragebiet. Ökologie und Umweltsicherung 24. Universität Kassel, Fachgebiet Landschaftsökologie und Naturschutz

Lücke, M. (1997): Rekultivierung von Rückstandshalden der Kaliindustrie -1- Untersuchungen zum Standort, zur Begrünung mit Komposten und zur Gehölzsukzession von Rückstandshalden mit anhydritischen Auflageschichten. Ökologie und Umweltsicherung 12. Gesamthochschule Kassel, Fachgebiet Ökologie und Naturschutz

Niessing, S. (2005): Rekultivierung von Rückstandshalden der Kaliindustrie -6- Begrünungsmaßnahmen auf der Rückstandshalde des Kaliwerkes Sigmundshall in Bokeloh. Ökologie und Umweltsicherung 25. Universität Kassel, Fachgebiet Landschaftsökologie und Naturschutz

Papke, G. und Schmeisky, H. (2013): Rekultivierung von Rückstandshalden der Kaliindustrie -8- Ergebnisse aus langjährigen wissenschaftlichen Begleituntersuchungen der Begrünungsflächen auf der Kalirückstandshalde Sigmundshall in Bokeloh. Ökologie und Umweltsicherung 35. Universität Kassel-Witzenhausen

Podlacha, G. (1999): Rekultivierung von Rückstandshalden der Kaliindustrie -2- Untersuchungen zur Substratandeckung mit geringen Schichtstärken aus Bodenaushub-Wirbelschichtasche-Gemischen und ihre Begrünung. Ökologie und Umweltsicherung 16. Gesamthochschule Kassel, Fachgebiet Ökologie und Naturschutz

Reichenberger, H-P.; Mocker, M.; Quicker, P. und Faulstich, M. (2007): Rückstände aus verschiedenen Verbrennungsanlagen. In: Faulstich, M.; Urban, A. und Bilitewski, B. (Hrsg.): Thermische Abfallbehandlung 12: 231-252. Universität Kassel, Fachgebiet Abfalltechnik

Scheer, T. (2001): Rekultivierung von Rückstandshalden der Kaliindustrie -4- Untersuchungen zur Nutzbarkeit aufbereiteter Salzschlacke der Sekundäraluminium-Industrie als Rekultivierungsmaterial einer Kali-Rückstandshalde. Ökologie und Umweltsicherung 20. Universität Kassel, Fachgebiet Landschaftsökologie und Naturschutz

Schmeisky, H. (2000): I. Begrünung von Rückstandshalden der Kaliindustrie. In: Rekultivierung von Rückstandshalden der Kaliindustrie -3- Untersuchungen zum Salzaustrag, zur Sukzession sowie Maßnahmen und Erkenntnisse zur Begrünung. Ökologie und Umweltsicherung 19: 11-27. Universität-Gesamthochschule Kassel, Fachbereich Landwirtschaft, internationale Agrarentwicklung und Ökologische Umweltsicherung

Schmeisky, H. et al. [und Mitarbeiter] (1993): Stellungnahme zur Aufhaldung von Rückständen aus dem REKAL-Verfahren (Aufbereitung von Salzschlacken aus der Sekundär-Aluminium-Industrie). Gesamthochschule Universität Kassel, Fachgebiet Ökologie und Naturschutz, unveröffentlicht

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

Schmeisky, H. und Papke, G. (2012): Begrünungskonzept für Kalirückstandshalden im Werra-Gebiet. Abschlussbericht Stufe 1: Grundlagenermittlung und Begrünungsprüfung, 15 S. inkl. Anhang. Umweltsicherung Schmeisky, unveröffentlicht

Schmeisky, H. und Papke, G. (2013): Begrünungskonzept für Kalirückstandshalden im Werra-Gebiet. Planung Stufe II, Feldversuch Lysimeterfeld auf der Halde IV in Heringen , 1. Zwischenbericht – Teilbericht A, 41 S. inkl. Anhang. Umweltsicherung Schmeisky, unveröffentlicht

Schmeisky, H; Schmeisky, A. und Brenner, C. (2014): Begrünungskonzept für Kalirückstandshalden im Werra-Gebiet. Stufe II, Feldversuch auf der Halde IV Heringen, 2. Zwischenbericht - Teilbericht A, 24 S. inkl. Anhang. Umweltsicherung Schmeisky, unveröffentlicht

Thome, V. (2012): Elektrodynamische Fragmentierung von Abfallstoffen am Beispiel von Altbeton und Müllverbrennungsschlacken. Vortrag: Landeskongress Ressourceneffizienz, ZKM Karlsruhe 27./28.09.2012

www.ressourceneffizienzkongress.de/files/f_13_thome.pdf

trend research - Institut für Trend- und Marktforschung, 28209 Bremen **(2006):** Der Markt für Kraftwerksnebenprodukte bis 2020 – Marktpotenziale, Absatzmärkte, Stoffströme, Preise und Strategien. Potenzialstudie 756 S.

UBA - Umweltbundesamt [Alwast, H. und Riemann, A.] **(2010):** Texte 50/2010. Verbesserung von umweltrelevanten Qualitäten von Schlacken aus Abfallverbrennungsanlagen. Umweltbundesamt (Hrsg.)

VGB PowerTech e.V. (2015): Produktion und Verwendung von Kraftwerksnebenprodukten in Deutschland im Jahr 2011.

www.vgb.org/kwnnebenprodukte.html (Stand 23.02.2015)

Wöhler, V. (1999): Aufbereitete Aluminium-Salzschlacke als Rekultivierungsmaterial. Dissertation am Fachgebiet Bodenkunde der Universität-Gesamthochschule Kassel

Zingk, M. (2011): Verwertung von Kraftwerksrückständen als Deponie-Ersatzbaustoff. In: 7. Leipziger Deponiefachtagung S.131-138

Zingk, M.; Weißflog, E. und Kempf, W-D. (2009): Verwertung von Rückständen aus Kohlekraftwerken. In: Thomé-Kozmiensky, K. und Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe 2: 695-708

Zundel, R. (2000): Praktische Erfahrungen mit der Rekultivierung von Rückstandshalden der Kaliindustrie in Niedersachsen und Thüringen. In: Rekultivierung von Rückstandshalden der Kaliindustrie -3- Untersuchungen von Salzaustrag, zur Sukzession sowie Maßnahmen und Erkenntnisse zur Begrünung. Ökologie und Umweltsicherung 19: 141-160. Universität-Gesamthochschule Kassel, Fachbereich Landwirtschaft, internationale Agrarentwicklung und Ökologische Umweltsicherung