

Rotschlamm

**Reststoff aus der Aluminiumoxidproduktion
– Ökologischer Rucksack oder Input für
Produktionsprozesse?**

Frank Muster

Universität Kassel

Entwicklungsperspektiven Nr. 88
Kassel 2007

kassel university press GmbH
www.upress.uni-kassel.de

ISBN: 978-3-89958-359-5

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

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

Titelfoto: Frank Muster

Umschlaggestaltung: Kassel university press GmbH, Kassel

Gedruckt bei: Druckerei der Universität Kassel

Universität Kassel
FB 05
Nora-Platiel-Str. 5
34127 Kassel
Tel.: 0049 561 804 3152
Fax: 0049 561 804 3738
<http://www.uni-kassel.de/fb5/soziologie/sel/>

Die Debatte über *Entwicklungsperspektiven* steht überall auf der Tagesordnung. Einseitig an wirtschaftlichem Wachstum orientierte Vorstellungen haben verheerende materielle, soziale und psychische Auswirkungen in Lateinamerika, Afrika und Asien, aber auch in Europa und den USA. Obwohl das am Wirtschaftswachstum orientierte Konzept längst kritisiert wurde, ist es nach wie vor für die Richtung unserer wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Veränderungen nach innen und außen maßgeblich.

Die Kritik muss mit konkreten *Entwicklungsperspektiven* für eine humanitäre Entwicklung verbunden werden. Technokratische Politik zur Entwicklung reicht ebenso wenig aus wie politische Utopien. Die Erarbeitung der Perspektiven ist in Wirklichkeit ein umfassender Lernprozess, der ein neues Verständnis von Politik und nicht zuletzt auch ein neues Rollenverständnis von Technikern und Sozialwissenschaftlern erfordert.

So geht es in dieser Reihe *Entwicklungsperspektiven* darum, emanzipatorische Prozesse im Produktions- und Reproduktionsbereich (bzw. Ursachen für ihre Verhinderung) aufzuzeigen. In ihnen wird an die eigene Geschichte angeknüpft und die eigene Identität erneut gefunden. Die Analyse emanzipatorischer Erfahrungen in verschiedenen Bereichen (Gesundheit, Wohnungsbau, Bildung, Produktionsorganisation ...) können hier wie dort Schritte auf dem Weg der Lösung von Abhängigkeiten hin zur Selbstbestimmung klären helfen.

Entwicklungsperspektiven sind heute schwer zu erkennen, daher suchen wir

- Berichte aus der Erfahrung demokratischer Organisationen, Analysen anderer Gesellschaften und Kulturen sowie ihrer Wirtschafts- und Lebensweisen.
- Auswertungen von Erfahrungen in Entwicklungsprojekten.
- Dokumente mit Hilfe derer die Lernprozesse aus diesen Erfahrungen von Europa nach Lateinamerika und vice versa vermittelt werden können.

LATEINAMERIKA-DOKUMENTATIONSSTELLE
Universität Kassel
FB 5
34109 Kassel

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	7
Beiträge zur Bauxit-Energie-Aluminium-Produktlinie.....	7
1. Einleitung	9
1.1. Geschichte des Aluminiums.....	9
1.2. Eigenschaften und Bedeutung.....	9
1.3. Aluminiumgewinnung – Entstehung von Rotschlamm	11
2. Deponierung von Rotschlamm.....	15
3. Weiterverarbeitungsmöglichkeiten von Rotschlamm	19
3.1 Pyrometallurgische Verfahren	19
3.2. Hydrometallurgische Verfahren.....	21
3.2.1. Alkalischer Aufschluss.....	21
3.2.2. Saurer Aufschluss.....	22
3.3. Komplexe Rotschlammverarbeitung.....	25
4. Geologisch-technische Eigenschaften und die kompletten Anwendungen des Feststoffabfalls Rotschlamm in der Aluminiumindustrie Chinas...27	
4.1. Einleitung	27
4.2. Physikalische Eigenschaften und Aufbau des Rotschlammes.....	27
4.2.1. Physikalische und hydrophile Eigenschaften.....	27
4.2.2. Mineralischer Aufbau des Rotschlammes.....	31
4.3. Technische Eigenschaften des Rotschlammes	33
4.3.1 Permeabilität und auslaugende Eigenschaften.....	33
4.3.2. Festigkeit des Rotschlammes	35
4.4. Verstärkung des Rotschlammabfalls.....	36
4.4.1. Experiment von Rotschlammverstärkung mittels Ätzkalk	36
4.5. Steuerung und Anwendung der Rotschlammabfälle.....	39
4.5.1. Verstärkungsgegenmaßnahmen für eine Rotschlammverdämmung	39
4.6. Zusammenfassung.....	40
5. Herstellung von Baumaterial aus Rotschlamm in Jamaika.....	43
5.1. Einleitung	43
5.2. Vorbereitende Untersuchungen.....	44
5.3. Silikat (silicate) gebundene Back-/Ziegelsteine.....	45
Parameter.....	45
Gemessene Daten	45
5.4. Red mud pozzolanic cement	47
5.5. Gips fines.....	48
Parameter.....	48
Durchschnittswert.....	48
5.6. Herstellungstechnologie für red mud pozzolanic cement.....	49
5.7. Mischen und Herstellung	51
5.8. Testen der Steine	53

5.9. Errichtung von Demonstrationsgebäuden	54
5.10. Schluss	56
6. Anwendungen von Rotschlamm für Baumaterialien in der Bundesrepublik Deutschland.....	59
6.1. Verwertung von Steinkohlewaschbergen und Rotschlamm zur Herstellung von Blähtongranulat.....	59
6.1.1. Konventionelles Blähtongranulat	59
Einsatzgebiete	59
Vorteile gegenüber anderen Baustoffen	59
6.1.2. Blähtongranulat aus industriellen Reststoffen.....	60
6.1.3. Methoden und Vorversuche.....	60
Bestandteil.....	61
6.1.4. Viskositätsverhalten (Erhitzungsmikroskop)	62
6.1.5. Blähverhalten (Gradientenofen)	63
6.1.6. Verfahrenstechnische Einflussgrößen	63
6.1.7. Zusammenfassung	64
6.2 Erfahrungen über den Einsatz von Rotschlamm bei der Herstellung von grobkeramischen Erzeugnissen	65
6.3. Rotschlamm als Grundstoff für Ziegelsteine.....	72
6.3.1. Einleitung.....	72
6.3.2. Ausgangsmaterial	72
6.3.3. Herstellung der Ziegel	75
6.3.4. Eigenschaften der Ziegel	77
6.3.5. Wirtschaftlichkeit des Verfahrens	80
6.3.6. Zusammenfassung	81
7. Industrial Waste Products	83
7.1. Der Verbundwerkstoff Red Mud Jute Fibre Polymer Composite (RFPC).....	83
8. Alkaloam - Verwendung von Rotschlamm bei australischen Farmern....	85
8.1. Darstellung von Alcoa	85
8.2. Das große Rotschlamm-Experiment, welches radioaktiv wurde ..	88
9. Anwendung von Rotschlamm bei Böden	93
9.1. Immobilisierung von Schwermetallen in belasteten Böden	93
9.2. Der Einfluss unterschiedlicher Bodenzusätze auf die sortenspezifische Schwermetallaufnahme von Pflanzen auf belasteter Böden in Bangladesh.....	94
9.3. Stabilisate aus basischen Industrierückständen zur Bodenverbesserung und Pflanzenernährung	95
9.4 Einsatz von Rotschlamm und Grünsalz auf als Grünland genutzten sauren Hochmoorböden	96
9.4.1. Einleitung.....	96
9.4.2. Feldversuch auf Hochmoorgrünland	97
9.4.3. Dränwasseruntersuchungen	97
9.4.4. Bodenuntersuchungen	100

9.4.5. Schlussbemerkung.....	101
10. Bioleaching – Laugung von Wertmetallen mit heterotrophen Mikroorganismen	105
11. Neutralisation von Rotschlamm mittels Meerwasser.....	107
12. Katalytische Verflüssigung von Kunststoffabfällen mittels Rotschlamm	109
12.1. Einleitung	109
12.2. Experimentell	110
12.3. Resultate	110
13. Resümee	113
Weitere Literatur	117
LADOK – ENTWICKLUNGSPERSPEKTIVEN	126

Vorwort

Betrachten wir Produktionsprozesse von der Wiege bis zur Bahre, so können wir unterschiedliche Perspektiven erkennen:

- 1.) Menschen der Region, wo die Rohstoffe entnommen werden, werden die Rohstoffentnahme und ihre Konsequenzen immer im Vergleich zu den Potentialen ihrer Region und ihren eigenen Zukunftsvorstellungen und Planungen sehen. Sie werden im Interesse ihres Naturbezuges und der Nachhaltigkeit ihrer Region Alternativen verfolgen.
- 2.) Jene, die den Gesamtüberblick über die Produktlinie – die Etappen von der Extraktion des Rohstoffes bis zur Wiederverwertung/ dem Recyceln in ihren ökologischen, ökonomischen und sozialen Dimensionen übersehen – können die Fokussierung auf Auswirkungen im globalen Interesse wie zum Beispiel auf Klima- und Menschenrechtsprobleme darstellen und ihre Vermeidung bzw. Sanktionierung verfolgen bzw. politisch bewirken.
- 3.) Schließlich sind die potentiellen Konsumenten der in diesem Prozess erstellten Produkte daran interessiert, vor ihrem Kauf die Nachhaltigkeit der von ihnen nachgefragten Produkte in einem Ökocheck – „product sustainability assessment“ – durchleuchtet zu sehen.

Jede dieser Perspektiven hat ihre volle Berechtigung. Sie sind alle drei durch präventive Forschung zu erhellen und so zu kommunizieren, dass die Akteure selbst auf gleicher Augenhöhe im Sinne der Nachhaltigkeit ihre Interessen durchsetzen können.

Beiträge zur Bauxit-Energie-Aluminium-Produktlinie

In dieser Studie wird danach gefragt, ob ein Reststoff der Aluminiumoxidproduktion, der Ätznatron versetzte Rotschlamm, ein Reststoff ist, dessen schädliche Auswirkung auf Wasserökosysteme sorgsam verhindert werden muss oder ob er als Input in weitere Produktionsprozesse eingehen kann und so eine doppelte Erfolg (win-win) erzielt werden kann?

Aus vier bis fünf Tonnen Bauxit können ca. zwei Tonnen Aluminiumoxid und eine Tonne Aluminium gewonnen werden. Pro produzierte Tonne Aluminiumoxid fallen etwa 0,7 Tonnen trockener Rotschlamm an. In der Regel jedoch eine größere noch mit Wasser versetzte Menge. Der Unterschied ergibt sich daraus, dass einige Fabriken Wasserrückgewinnungssysteme/ -anlagen installiert haben, bei denen Wasser aus dem Reststoff in den Betrieb zurückgepumpt wird.

Wenn die oft viele Hektar großen Seen mit Ton und PVC ausgelegt sind, spricht man von einer umsichtigen präventiven Strategie zum Schutze der Gewässer. Die Sicherheit dieser Strategie ist noch nicht wissenschaftlich belegt.

Da von diesen großen Flächen Staub aufwirbelt, bemüht man sich um eine Bepflanzung. Der relative Erfolg hiervon wäre ebenfalls noch wissenschaftlich im Vergleich zur vorherigen Flächennutzung zu untersuchen.

Angesichts der in der Regel problematischen Sicherheit und nicht evaluierter Rekultivierung der Rotschlammseen sind die Erfahrungen mit der Weiterverwendung des Reststoffes als Input für Straßen- und Dammbau, Ziegelsteine, Düngemittel etc. von überaus großem Interesse für die jeweilige regionale Bevölkerung, ihre Landwirtschaft und Fischerei und ihre kommunalen Verwaltungen.

Daher hat Frank Muster eine umfangreiche Recherche angestellt, um zu durchleuchten, von welchen Beispielen in Zukunft im Sinne nachhaltiger Regionalentwicklung gelernt werden kann. Das Ergebnis ist ein Überblick aus dem wir ersehen können, dass Versuche in unterschiedlichen Richtungen von staatlicher Seite unternommen wurden. Die Berichte hierüber erschienen aber eher wie Holzwege, denn die Versuche sind offenbar oft nicht fortgesetzt worden. In jedem Fall wurden weiterhin Rotschlammseen angelegt und alte nicht abgebaut.

Da die Bearbeitung eines so großen Nachhaltigkeitsproblems einer Aufklärung bedarf, scheuen wir uns nicht, mit dieser Schrift eine weitere Debatte mit dem Ziel anzuregen, dass die Bearbeitung unabhängig davon fortgesetzt wird, ob sie kurzfristig Gewinne abwirft.

Im Sinne des Rechts auf Entwicklung das 1992 in der Erklärung der Zweiten Internationalen Konferenz für Umwelt und Entwicklung bekräftigt wurde, ist hier im öffentlichen Interesse nachzufragen.

Die Betriebe scheuen – laut Auskunft des Direktors der Aluminiumschmelze von São Luis im Jahre 1998 – die Ausgaben für die Weiterverwendung des Rotschlammes in Form von Ziegelsteinen. Welcher Ökonom hat berechnet, welchen Wert diese Fläche für einen regionalen Nutzen hatte?

Welcher Biologe hat erforscht, wie die Rekultivierung auf Rotschlammseen in verschiedenen Klimazonen auszuwerten ist?

Welcher Jurist hat sich im Sinne der Anwohner Gedanken gemacht, welche vertraglichen Regelungen dafür verantwortlich sind, dass die Flächen regionalen Nutzungsformen entzogen wurden und wie vertragliche Regelungen aussehen müssten, um eine Wiederverwendung – so diese regional sinnvoll und ohne Folgeschäden machbar ist – durch den Betrieb mit einer Grundfinanzierung auszustatten ist.

Also hoffen wir, mit der Publikation dieser Studie die richtigen Fragen für die nächsten Schritte einer breiten Forschungsstrategie zur Nachhaltigkeit aufgeworfen zu haben.

*Jens Hesselbach
Clarita Müller-Plantenberg*

1. Einleitung

1.1. Geschichte des Aluminiums

Das Aluminium ist im Vergleich zu den übrigen Nichteisenmetallen ein recht junges Metall. Im Jahr 1807 vermutete Sir Humphrey Davy in Tonerde (englisch: “alumina”; als Bestandteil des Alauns) das Metall Aluminium; allerdings misslangen seine Versuche, das Metall elektrolytisch mit einer Batterie aus 1000 Elementen herzustellen. Der Däne Christian Oersted gewann 1825 durch chemische Reduktion zum erstenmal winzige Mengen Aluminium.

Der Franzose Saint-Claire Deville überzeugte seinen Kaiser Napoleon III. im Jahr 1827, dass das neue “Silber aus Lehm” auch für die damalige Wehrtechnik geeignet sei. Daraufhin finanzierte Napoleon III. eine Fabrik zur Herstellung von Aluminium auf chemischem Wege. 1855 präsentierte Deville auf der Pariser Weltausstellung die erste 1kg-Stange Aluminium. Da die Bank von Frankreich daraufhin beschloss, das künftige Hartgeld aus Aluminium herzustellen, fielen an der Börse über Nacht rapide die Preise für Silber und Kupfer. Zu den ersten aus Aluminium hergestellten Gegenständen zählten eine Kinderklapper, eine Tabakdose und Essbesteck für die Tafel des Kaisers; an den höfischen Nebentischen wurde weiterhin mit Gold- und Silberbesteck gespeist.

Im Jahr 1886 meldeten Paul T. Héroult in Paris und Charles M. Hall in den USA unabhängig voneinander Patente auf die heute noch gebräuchliche elektrolytische Aluminiumgewinnung aus Tonerde in Kryolithschmelze an. Die Deckung des dazu notwendigen hohen Bedarfs an elektrischer Energie war möglich geworden, nachdem Siemens 1866 die Dynamomaschine erfunden hatte.

Die Inbetriebnahme der ersten deutschen Aluminium-Elektrolyse fand 1897 in Rheinfelden durch die heutige Firma Alusuisse statt. Nach dem 1. Weltkrieg entstanden die Aluminium-Sekundärhütten, die sich dem Recycling von Aluminiumschrott und -abfällen widmen (Umschmelzen).

1.2. Eigenschaften und Bedeutung

Aluminium ist nach Sauerstoff und Silizium das dritthäufigste Element bzw. das häufigste Metall der Erdkruste (ca. 8%). In der Natur kommt es nicht in reiner Form vor, sondern immer gebunden, z. B. in Glimmer, Korund und Kaolin. Der wichtigste Ausgangsstoff für die Aluminiumgewinnung ist das Verwitterungsgestein Bauxit, das neben Tonerdehydraten ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) auch andere Stoffe, wie Eisenoxid und Quarz, beinhaltet.

Aluminium ist ein silberweißes Metall, welches hauptsächlich in Form von Guss- und Knetlegierungen verwendet wird, ferner als Legierungsbestandteil in zahlreichen anderen Werkstoffgruppen sowie als Desoxidationsmetall zur Reduzierung von Oxiden edlerer Metalle. Die Bedeutung des Aluminiums und seiner Legierungen lässt sich aus deren wichtigsten Eigenschaften ableiten:

- **Gewicht**
Mit einer Dichte von $\rho_{\text{Al}}=2,7 \text{ kg/dm}^3$ (vgl. Stahl: $\rho_{\text{St}}=7,85 \text{ kg/dm}^3$, Kunststoffe: $\rho_{\text{Kst}}=1 \text{ bis } 2 \text{ kg/dm}^3$), gehört Aluminium zur Gruppe der Leichtmetalle; daher die Verwendung als Konstruktionswerkstoff mit dem Ziel des Leichtbaus bspw. in der Luft- und Raumfahrt sowie im Fahrzeugbau.
- **Härte und Festigkeit**
Aluminium ist in reiner Form weich, legiert und/oder wärmebehandelt hart. Werkstoffingenieure sprechen daher von “Maßschneidern”, womit sich ein breites Anwendungsspektrum erschließt.
- **Korrosionsbeständigkeit**
Durch die hohe Sauerstoffaffinität bildet sich an der Luft eine dichte Oxidschicht heraus, die vor weiterer Oxidation schützt. Aus diesem Grund wird Aluminium im Außenbereich und in der chemischen Industrie eingesetzt.
- **Wärmeleitfähigkeit**
Aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit erfolgt der Einsatz in Sonnenkollektoren, Kühlelementen und als Kochgeschirr. Problematisch ist diese Eigenschaft bei der unsachgemäßen Verwendung im Baugewerbe, da sich Wärme- bzw. Kältebrücken bilden können; die Folge sind Energieverluste.
- **Elektrische Leitfähigkeit**
- Die elektrische Leitfähigkeit des Aluminiums beträgt die 1,6-fache des Kupfers ($\rho_{\text{Cu}}=9 \text{ kg/dm}^3$). Aufgrund der niedrigeren Dichte des Aluminiums wird es als Leiterwerkstoff in der Elektrik und Elektronik verwendet, z. B. Freileitungen.
- **Duktilität**
Aluminium ist nach allen gebräuchlichen Verfahren umformbar (spannende Bearbeitung, Walzen, Tiefziehen, Strangpressen, Schmieden)
- **Gesundheitliche Unbedenklichkeit**
Einsatz in der Verpackungsmittel- u. Pharmaindustrie.
- **Recyclingfähigkeit**
Durch Umschmelzen von Aluminiumschrott und -abfällen entsteht das sogenannte Sekundäraluminium.

Die Fachzeitschrift *Aluminium* (4/2001, S. 10ff, 292) hält Aluminium in Zukunft für den großen Gewinner unter den metallischen Werkstoffen. Das 21. Jahrhundert wird weiterhin eine metallabhängige Epoche bleiben. Die weltweite Stahlproduktion wird stagnieren, der Pro-Kopf-Verbrauch aufgrund der zunehmenden Weltbevölkerung sinken. Dagegen kann der Gesamtverbrauch an Aluminium im Jahr 2030 50 Millionen Tonnen erreichen, wobei 22 bis 24 Millionen Tonnen aus der Sekundär- und 26 bis 28 Millionen Tonnen aus der Primärschmelzung stammen werden.

Die im Vergleich zu heute steigende Recyclingrate auf 44 bzw. 48 Prozent (Diagramm 1, S. 13) würde zu einer Reduzierung des durchschnittlichen elektri-

schen Energiebedarfs für die Gewinnung einer Tonne des Leichtmetalls von 13 auf 8 kWh drastisch reduzieren. Die weltweite Aluminiumerzeugung betrug im Jahr 1998 rund 30 Mio. Tonnen; im Vergleich dazu betrug 1998 die weltweite Stahlproduktion 775 Mio. Tonnen.

1.3. Aluminiumgewinnung – Entstehung von Rotschlamm

Der Bauxit als Ausgangsstoff für die Aluminiumgewinnung wird überwiegend im Tagebau abgebaut, wobei sich die Bauxitvorkommen zu ca. 90 % auf die Länder des Tropengürtels konzentrieren. Australien liefert zurzeit etwa 30 % der jährlichen Gesamtabbaumenge, darüber hinaus existieren großen Ressourcen in Guinea, Jamaika, Guayana, Surinam, Brasilien, Indien und Kamerun.

Ist das Abbaugelände bewaldet, so muss zunächst der Bewuchs gerodet werden. Anschließend wird im Tagebau die oberste - einige Meter dicke - Bodenschicht abgetragen. Die freigelegte Bauxitschicht beträgt ebenfalls einige Meter in der Dicke. Schwerlastkraftwagen kippen den Bauxit in Güterwagen oder in Frachtschiffe, worin der Transport in die Aufbereitungsanlage stattfindet. Die Weiterverarbeitung erfolgt im Wesentlichen in den Schritten Zerkleinern, Waschen, Schleudern, Filtern und ggf. Trocknen. Neben der Rodung der Bauxitabbaugebiete ist darüber hinaus die Schaffung der Aufbereitungsanlagen, Straßen, Bahnlinien, Häfen und Lagerplätzen notwendig.

Den nächsten Schritt im Aluminiumherstellungsprozess bildet die Verarbeitung des Bauxits zu Aluminiumoxid. Durch Zugabe von Natronlauge wird in Autoklaven unter Druck und Temperatur der Bauxit gelöst (Bayer-Verfahren), d. h. das Aluminium geht als Natriumaluminat in Lösung. Aufgrund des ausgeprägten unedlen elektrochemischen Charakters wird Aluminium aus den Aluminiumhaltigen Verbindungen (Oxide) in einem zweistufigen hydrometallurgischen Prozess gewonnen. Aufgrund der zuvor beschriebenen Eigenschaft wird Aluminium nicht wie andere Gebrauchsmetalle (bspw. Eisen, Kupfer, Zink) in einem carbothermischen Prozess gewonnen.

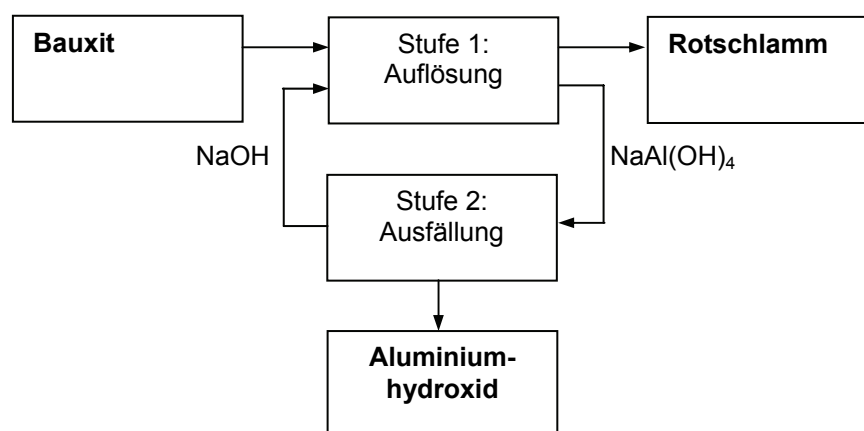


Abbildung 1: Verfahrensprinzip des Bayer- Prozesses

Die Reststoffe (Eisenoxid, Silizium, Titanoxid und ein beträchtlicher Teil der stark basischen Natronlauge) werden als Rotschlamm bezeichnet. Pro Tonne Aluminium fallen in Brasilien 830 kg des Residuums in fester Masse an. Das tatsächliche Volumen dürfte durch die Vermischung mit Flüssigkeit weitaus höher liegen [GhK, ELNI, 1996, S. 235].

Das Natriumaluminat wird im Folgenden mit Aluminiumhydroxid geimpft, was die Bildung von Aluminiumhydroxidkristallen begünstigt. In ölbefeuerten Drehrohröfen wird durch Erhitzen auf 1200-1300°C das enthaltene Wasser ausgetrieben (Kalzinieren); es entsteht Aluminiumoxid.

Staat	Standort	Kapazität (Tonnen/ Jahr)
USA	Baton Rouge	200.000
	Point Comfort	2.200.000
	Gramercy	1.150.000
	Burnside	700.000
	Gregory	1.700.000
	Virgin Islands	600.000
		6.550.000
Brasilien	Saramenha	160.000
	Poços de Caldas	270.000
	São Luis	1.500.000
	Barcarena	1.500.000
	Sorocaba	640.000
		4.070.000
Jamaica	Nain	1.500.000
	Kingston	850.000
	Kirkvine	550.000
	Ewarton	550.000
		3.450.000
Surinam	Paramaribo	1.750.000
Kanada	Vaudreuil	1.250.000
Guinea	Kimbo	640.000

Tabelle 1: Aluminiumraffinerien der Welt [Aluminium, 4/2001, S. 293]

Die großtechnische Herstellung von Aluminium geschieht durch elektrolytische Zersetzung des in einer Kryolithschmelze gelösten Aluminiumoxids (Schmelzflussanalyse). Das geschmolzene Kryolith (Natrium-Aluminium-Flour-Salz) löst die Tonerde, sodass deren Schmelzpunkt von über 2000°C auf etwa 1000°C sinkt. Unter Einwirkung von elektrischem Gleichstrom wird die Lösung

in Aluminium und Sauerstoff zerlegt. Das flüssige, reine Metall scheidet sich auf dem Boden des Elektrolyseofens ab. Nach dem Ofenanstich wird das flüssige Aluminium abgegossen, wo es erstarrt. Der Sauerstoff entweicht zu den von oben eingetauchten Kohlelektroden, wo er zu Kohlenoxiden verbrennt. Aus vier bis fünf Tonnen Bauxit entstehen etwa 2 Tonnen Aluminiumoxid, woraus ca. eine Tonne Aluminium gewonnen wird.

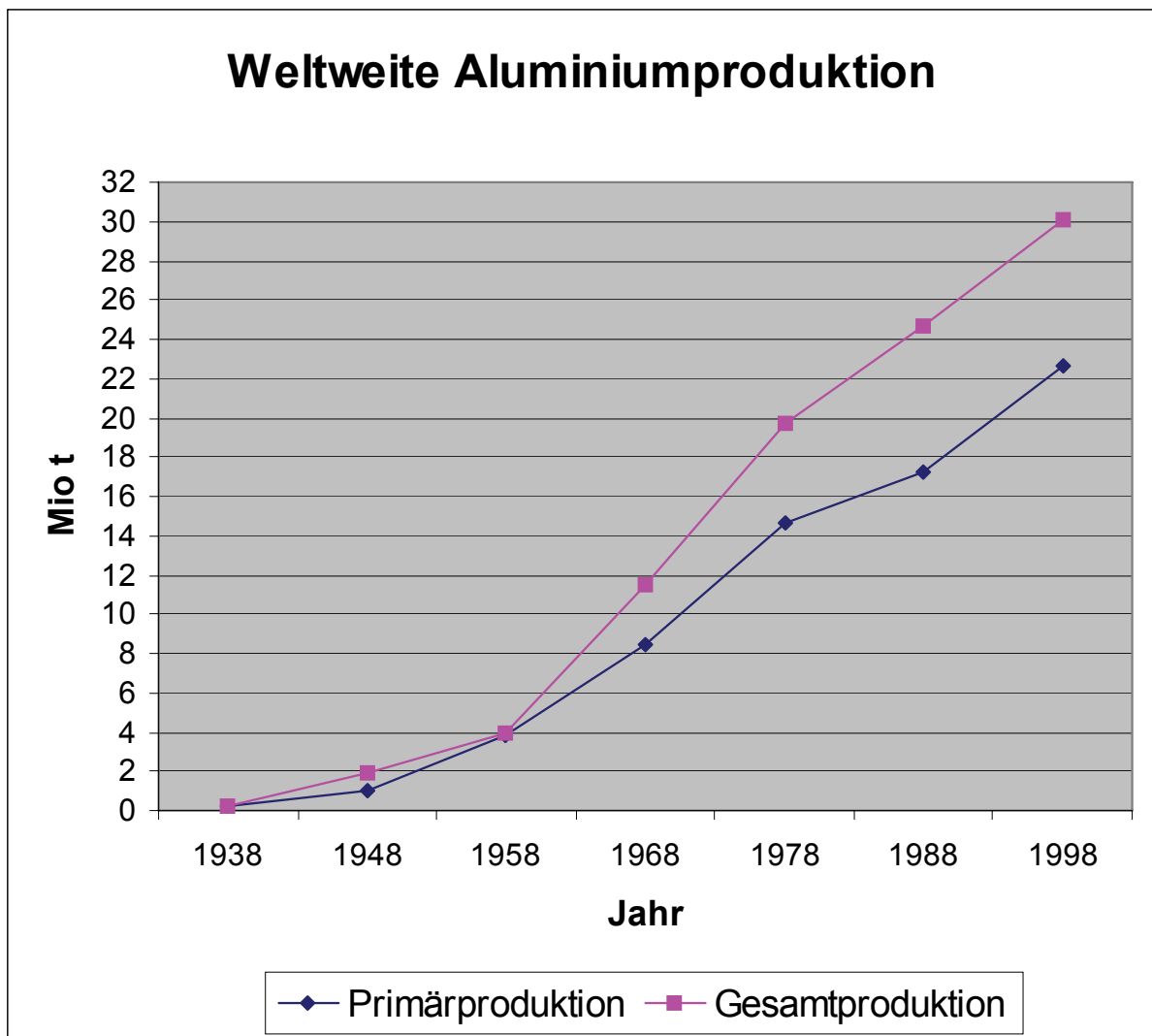


Diagramm 1: Weltweite Aluminiumproduktion [Aluminium, 1/2 2001, S. 10]

Literatur

Aluminium, *Zeitschrift*, 1/2 2001.

Aluminium, *Zeitschrift*, 4 2001.

HASSE, S. (Hrsg.) (1997): Gießerei-Lexikon. 17. Auflage, Berlin: Schiele & Schön.

Vereinigung Deutscher Schmelzhütten VDS (1988): Aluminium-Gusslegierungen. 5. überarbeitete Auflage, Düsseldorf: Gießerei-Verlag.

VSAI Verein Schweizer Aluminium-Industrieller (1998): Aluminium. Zürich.

Wirtschaftliche, soziale und kulturelle Rechte indigener Völker (1996). Entwicklungsperspektiven Nr. 59/60, Gesamthochschule Kassel, ELNI (Hrsg.). Kassel Darmstadt: Horlemann Verlag.

2. Deponierung von Rotschlamm

Die gängige Verfahrensweise zur Entsorgung des Rotschlammes ist dessen Deponierung, nachdem - zumindest in der Bundesrepublik Deutschland - für die Verklappung auf See keine Genehmigung erteilt wird. Das Einrichten und Betreiben von Rotschlammdeponien unterliegt, wie alle Deponien, der Genehmigungspflicht; es gilt daher eine Reihe von Gesetzen und Verordnungen. Die wesentliche Problematik hierbei besteht in der Sicherung der Lagerstätten.

Bezüglich der Deponiesicherheit wurden Untersuchungen zur Mobilität der Schadstoffe sowie der Grundwassergefährdung durchgeführt: Zur Bewertung der Mobilität wurden Elutionsversuche durchgeführt. Es konnte dabei festgestellt werden, dass die im Rotschlamm enthaltenen Schwermetalle fast vollständig als schwerlösliche Hydroxyde vorliegen bzw. an unlösliche Eisenhydroxyde gebunden sind. Die löslichen Anteile liegen deutlich unter 1 % des Gesamtgehaltes. Anders ist dies bei den anionischen Spezies wie Fluorid, Arsenat, Chromat und Vanadat. So liegt der potentiell auswaschbare Anteil für Chrom bei ca. 2 %, für Arsen und Fluorid zwischen 40 und 50 % und für Vanadat bei ca. 13 %. Diese Befunde stehen in Übereinstimmung mit den Beobachtungen in den Grundwasserpegeln. Kommt es im Grundwasser zu einem Absinken des pH-Wertes durch Verdünnung bzw. teilweise Neutralisation, so nimmt die Mobilität der o. g. Stoffe deutlich ab und es kommt zur Sorption im Untergrund.

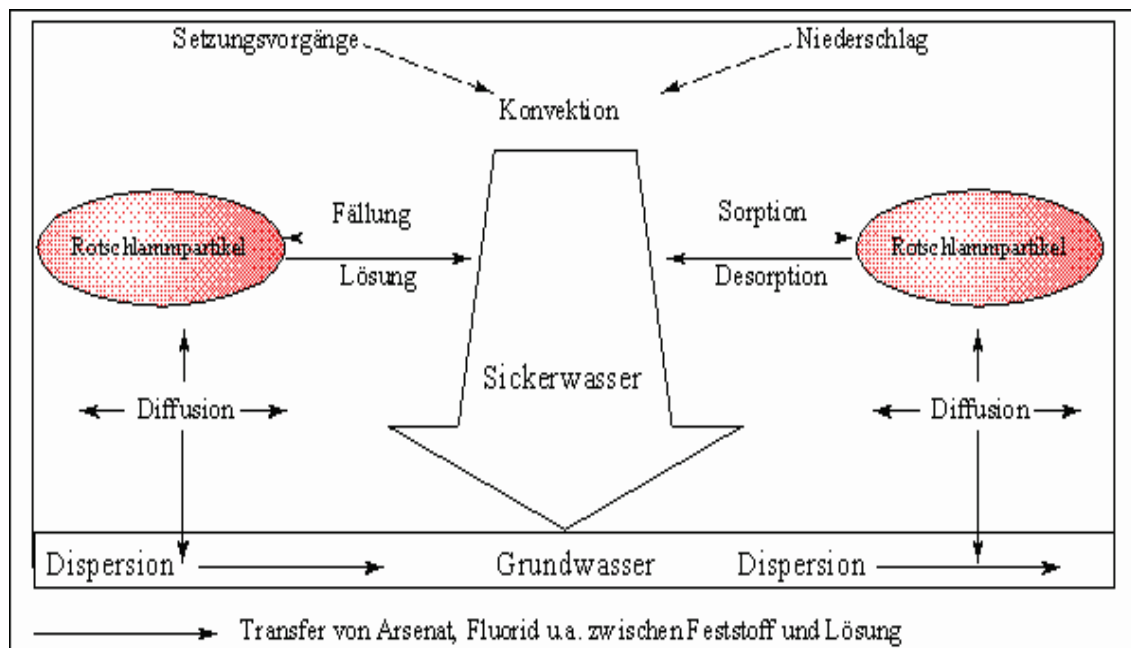


Abbildung 1: Transportprozesse im Deponiekörper

Für die Bewertung der Varianten war es zunächst erforderlich, die Anteile aller Transportprozesse in den Deponien zu kennen. Das Ergebnis der Untersuchungen war, dass der konvektive Anteil am Stofftransport in den Untergrund im Vergleich zur Diffusion über die Grenzfläche Deponie/Grundwasser relativ gering ist. Dies bedeutet, mit einer Oberflächenabdeckung allein kann der Stoffaustrag aus den Deponien auch auf lange Sicht nur geringfügig reduziert werden. Die Umschließung der Deponien ist also erforderlich.

Die Deponierung des Bauxitresiduums kann prinzipiell auf zwei Arten erfolgen: Zunächst die Rückverfüllung der infolge des Bauxitabbaus geschaffenen Hohlräume. In den Bauxiterzeugerländern, in denen die Aluminiumoxidfabriken in der Nähe der Bauxitabbaugebiete liegen, wird diese Möglichkeit genutzt. Die Alternative stellt die Errichtung eines allseitig umschlossenen Deponiebeckens dar, welches aus einer Deponiebasisabdichtung, Ringdämmen zur Umschließung und einer Oberflächenabdeckung mit anschließender Rekultivierung besteht.

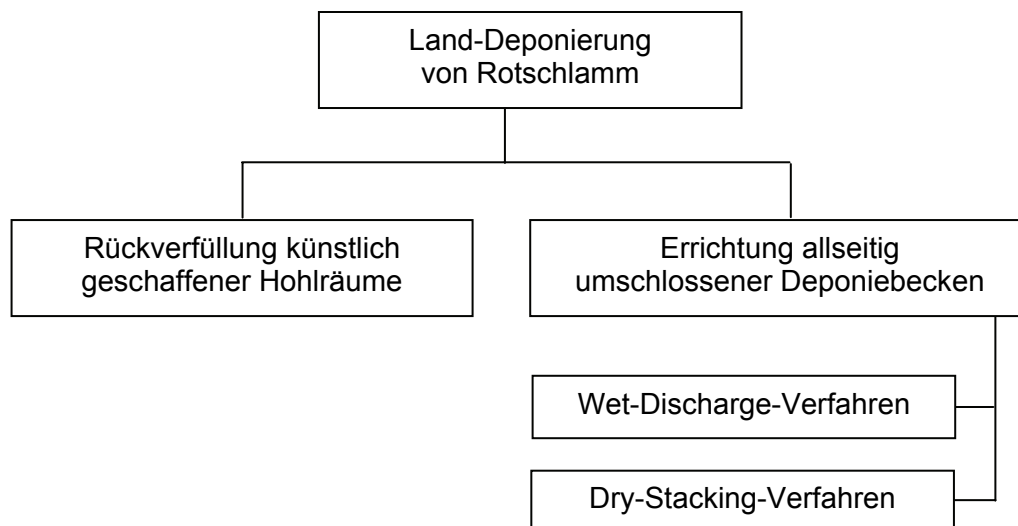


Abbildung 2: Möglichkeiten der Land-Deponierung von Rotschlamm

Beim *Wet-Discharge-Verfahren* wird der nicht weiter eingedickte Rotschlamm über ein Rohrleitungssystem in ein Deponiebecken geleitet. Dieses Verfahren bedingt eine inhomogene Verteilung des Residuums. Die schwere Fraktion setzt sich an der Einleitstelle ab, die feineren Bestandteile werden dagegen in den See hineingespült, wo sie sich absetzen. Der Rotschlamm setzt sich auf dem Grund des Deponiebeckens ab, das an der Oberfläche anfallende Wasser wird abgepumpt und dem Herstellungsprozess wieder zugeführt. Dieses Wasser enthält hohe Anteile an NaOH und Al_2O_3 ; es wird sowohl dem Bayerprozess zur Verdünnung der Lauge rückgeführt, als auch für die Waschung des Bauxits verwendet.

Die Abdichtung der *Wet-discharge-Deponie* erfolgt zum einen mittels einer Tonschicht als Basis und Dichtschicht, zum anderen wird auf eine natürliche Basis-Sandschicht eine Folie aufgebracht, die Diffusion verhindern soll. Problematisch ist bei dieser Deponierungsmethode der hohe hydrostatische Druck, der trotz Abdichtung der Deponien das Grundwasser durch die Rückstände belasten kann. Abhilfe wird durch Regenwasserauffangbecken geschaffen, zusätzlich wird eine Basisdrainage angelegt, die das durchsickernde Wasser auffangen und dem Aufarbeitungsprozess wieder zuführen soll.

Die o. a. Probleme beim *Wet-discharge-Verfahren* haben zu dem sogenannten *Dry-stacking-Verfahren* geführt. Den Kern bildet hierbei eine weitere Entwässerung des Rotschlammes nach der Waschung. In Eindickern wird der Feststoffanteil auf 55 - 60 % erhöht und anschließend über Pipelines zum Deponiekörper gepumpt. Die *Dry-stacking-Deponien* weisen eine kegelförmige oder hangartige Form auf. Der am höchsten Punkt eingetragene Rotschlamm setzt sich infolge der Neigung in einer gleichmäßig starken Schicht von 5-10 cm ab. Die Trocknung erfolgt durch die Verdunstung von Wasseranteilen, sodass innerhalb der nächsten 6-8 Tagen die nächste Schicht aufgetragen werden kann. Die Abdichtung der Deponiebasis gleicht der des *Wet-discharge-Verfahrens*.

Die immense Platzersparnis aufgrund der Trocknung des Rotschlammes bildet einen Vorteil dieses Verfahrens. Darüber hinaus stellt sich eine homogene Oberfläche ein, die nicht verstaubt, da keine Separation des Rotschlammes nach der Korngröße stattfindet. Letzteres bedingt eine bessere Rekultivierung von *Dry-stacking-* gegenüber *Wet-discharge-Deponien*. Das *Dry-stacking-Verfahren* (auch *solar drying*) wird beispielsweise auf Jamaika und in Australien angewendet.

Ein Derivat des *Wet-discharge-Verfahrens* stellt ein von der Firma Nabalco Pty Ltd. in Australien entwickeltes Verfahren dar, bei dem der Rotschlamm nach der Korngröße in zwei Fraktionen separiert wird. Die feinen Bestandteile werden eingedickt und in ein Gebiet mit senkrechten aufgestellten Rohren gepumpt, aus denen die Masse auf den Boden läuft und sich dort verteilt. Die Sonne trocknet den Rotschlamm, sodass durch die Rohre weitere Schichten aufgetragen werden; es entsteht eine Rotschlammsschicht wachsender Dicke und Dichte. Sind die Schlammablagerungen in dem Gebiet abgeschlossen, werden zu den Sandrückständen eine Erhöhungsschicht, Dünger und eine Deckschicht aufgetragen, bevor die Renaturierung beginnt. Der grobkörnige Rückstand wird aussortiert und zur weiteren Verwendung bei Baumaßnahmen oder als Teil einer Regenerierungsmaßnahme zwischengelagert.

Literatur

http://www.bauv.unibw-muenchen.de/institute/inst6.3/forschungsvorhaben/abgeschlossene%20projekte/krause_rots%201/rotschl.html
am 05.11.2002.

sfb525.rwth-aachen.de/sfb/poster/tp2_entsorgung2.pdf am 05.11.2002.

sfb525.rwth-aachen.de/sfb/subpro/sub_pro2/entsorg/rots4_de.htm
am 05.11.2002.

Minerals Gazette. October 1996, Volume 1 Number 93. Western Australia.

3. Weiterverarbeitungsmöglichkeiten von Rotschlamm

3.1 Pyrometallurgische Verfahren

Zur Gewinnung des im Rotschlamm enthaltenen Eisens existieren mehrere Verfahren. Kennzeichnend für diese zur Gruppe der *pyrometallurgischen Verfahren* ist der Fokus für die Eisen- und Stahlgewinnung, die übrigen Bestandteile werden dabei in der anfallenden Schlacke gebunden.

Vor und während des zweiten Weltkriegs wurde Rotschlamm von der deutschen Eisenhüttenindustrie auf Etagenöfen getrocknet und als Katalysator für die Sumpfphase der Kohlehydrierung verkauft. Die aktive Komponente bildete dabei das feinteilige Eisenhydroxid. Bis in die 50er Jahre wurden die Rückstände in getrockneter Form in Mengen von etwa 3.000 t/a als Eisen haltiger Rückstand an die Hüttenwerke geliefert. Die Problematik des Handels von getrocknetem Rotschlamm liegt aufgrund seiner hohen Feinheit in dessen starkem Staubverhalten (40 bis 60 % haben eine Teilchengröße $<1\mu\text{m}$); erst ab etwa 12 % Restfeuchte legt sich diese Neigung.

Die Eisenhüttenindustrie bekundete in der zweiten Hälfte der 50er Jahre im Zusammenhang mit dem *Kruppschen Rennverfahren*¹ erneut Interesse an Rotschlamm. Vorgesehen war zunächst die Aufbereitung saurer Eisenerze, wobei sich eine Zugabe des basischen Residuums als probates Mittel zur Schlackenkorrektur erwiesen hatte, besonders bezüglich des beim Rennverfahren wichtigen Parameters Viskosität. Eine Versuchsanlage der Fa. Krupp ging 1961 in Betrieb, wurde allerdings 1966 wegen der stark rückläufigen Preisentwicklung für Schrott stillgelegt. Der hergestellte Sinter² hatte einen Eisengehalt von zunächst 39 %, der im Laufe der Zeit infolge Änderungen des Bauxitprogramms auf teilweise unter 36 % absank. Dieser Anteil lag unter den Anforderungen für Eisenerz. Parallel dazu war der hohe Alkaligehalt von 6 bis 8 % Na_2O im Hochofen nicht erwünscht.

¹ Rennverfahren: pyrometallurgische Eisenreduktion. Als Produkte entstehen dabei flüssige Schlacke und fester Eisenschwamm, ein poröses kohlenstoffarmes weiches Eisen. Seinen Namen bezieht die Rennfeuertechnik aus dem Umstand, dass bei der Eisenherstellung flüssige (= rinnende) Schlacke anfällt. Bei dem Verfahren wird die erforderliche Reaktionstemperatur für die endotherme Eisenoxidation durch die Verbrennung von Kohlenstoff erreicht. Den für die Verbrennung benötigten Sauerstoff erhält man beim Rennfeuer durch Düsenrohre, beim Schachtofen reichen dagegen die natürlichen konvektiven Luftzüge. Das Eisen wird in Form eines in der Ofenhitze teigigen, nach Entnahme aus dem Ofen festen schlackedurchsetzten Klumpens (Luppe von lat. *lupus* = Wolf) erhalten; die Schmelztemperatur des Eisens von 1535 °C wird nicht erreicht.

² Sintern: durch Erhitzen zusammenbacken lassen.

Dem bestreben, den Eisengehalt des Rotschlammes nutzbar zu machen, wurde von weiteren Unternehmen weiter verfolgt. Erwähnt sei in diesem Zusammenhang das *Halomet-Verfahren* der Tellus AG für Bergbau und Hüttenindustrie. Dem Unternehmen zufolge wurde dieses Verfahren versuchsweise mit Erfolg angewendet; das erhaltene Eisen soll eine Reinheit von 99,85 % gehabt haben. Die übrigen Bestandteile waren fast eisenfreier Mineralstaub.

Die Direktreduktion gelang mit einem dreifachen Kohlenstoffüberschuss in Form von Braunkohlestaub, womit eine tropfenförmige Abscheidung des metallischen Eisens erreicht wurde. Die noch 20 % Kohlenstoff enthaltene Schlacke ließ sich durch Absieben vom Eisen separieren. Die letztlich entscheidende Frage dürfte jedoch sein, ob bzw. unter welchen Bedingungen sich diese Verfahren neben den herkömmlichen wirtschaftlich behaupten können. Von wesentlicher Bedeutung ist dabei der Eisengehalt in den zur Verfügung stehenden Rückständen.

Die Fa. Lurgi hat 1963 Anreicherungsversuche nach dem Verfahren der *magnetischen Röstung* durchgeführt. Dabei wurden die Rückstände bei 750°C mit einem CO/CO₂-Gemisch behandelt, anschließend vermahlen und nassmagnetisch geschieden. Hieraus ergab sich eine hoch angereicherte Fraktion mit etwa 52 % Eisen, jedoch war ihr Anteil so gering, dass die Eisenausbringung im Konzentrat nur 20 bis 25 % betrug. Es bestätigte sich hierbei die auch bei anderen Versuchen gemachte Erfahrung, dass die Verwachsung der verschiedenen Komponenten des Rotschlammes bis in die kleinsten Teilchen hinein sehr innig ist.

Bis zur Stilllegung der o. a. Anlage wurde das Feingut als farbechter und wetterbeständiger Belag für Betondachziegel verwendet. Der größte Teil des Bestandes wurde später an eine Zementfabrik verkauft, welche ihr Ausgangsmaterial im Fe₂O₃- und Al₂O₃-Gehalt korrigieren musste. Das Unternehmen wäre gern bei Sinter geblieben, weil sich dieser wesentlich besser verarbeiten ließ als nur getrocknete Rückstände. Sowohl der erzielbare Preis als auch die benötigte Menge waren jedoch zu gering, um eine Wiederaufnahme der Sinterung zu ermöglichen.

Darüber hinaus wurde geprüft, ob der Sinter für die Herstellung von Schwebeton (z. B. Strahlenschutzbeton) einsetzbar war. Der Sinter hatte eine Dichte von etwa 4 kg/dm³. Aufgrund der Porosität der größeren Stücke konnte jedoch nur ein Raumgewicht des Betons von etwa 3 kg/dm³ erreicht werden, was für den bedachten Zweck zu niedrig war.

Ein weiteres Versuchsfeld – zur Auslastung des Sinterofens – stellte die Verwendung von Rotschlamm mit Ton und Blähhilfsmitteln zur Herstellung von Blähtongranulat als leichten Betonzuschlag dar. Es gelang die Herstellung sehr guter Granulate. Die technische Realisierung musste unterbleiben, da einerseits im räumlichen Umfeld der Versuchsstätten Bimsvorkommen lagen, demzufolge waren die Preise für Leichtzuschläge relativ niedrig. Zum anderen konnte der große Sinterofen etwa 700 m³ Blähtongranulat am Tag ausstoßen; eine Menge,

die im Kölner Raum – dem Standort der Anlage – nicht absetzbar war. In Norddeutschland wäre die Situation wesentlich günstiger gewesen.

Das von der Firma Guilini in Ludwigshafen entwickelte *Guilini-Verfahren* besteht aus zwei Stufen: Zunächst erfolgt das Trocknen und Sintern des Rotschlammes unter Zugabe von Abfallkohle in Drehrohröfen, womit eine Teilreduktion des Fe_2O_3 bis zum metallischen Eisen erfolgt. Ein anschließendes Einschmelzen sowie die Restreduktion des Sinters wird im Herdschmelzofen erreicht; die Endprodukte sind Roheisen und granuliert Schlacke. Die Voraussetzung für die Anwendung dieses Verfahrens ist ein 45%-iger Gehalt an Fe_2O_3 an den Ausgangsstoff. Das Verfahren wurde bis zur großtechnischen Reife entwickelt, jedoch aus wirtschaftlichen Gründen eingestellt.

ENGLER (1999) verweist auf ZIEGENBALG U. A. (1985), wonach wesentliche Varianten der thermischen Verfahren zur Schmelzreduktion von Rotschlamm wie folgt eingeteilt werden:

- Reduzierendes Schmelzen mit Roheisengewinnung, Sintern der Schlacke mit Soda und Kalkstein.
- Reduzierendes Schmelzen unter Erzeugung von Roheisen, Nachbehandlung der Schlacke mit Kalk und Bildung direkt laugbarer Calciumaluminat-/Calciumsilikatschlacken.
- Kaustifizieren³ des Rotschlammes, nachfolgendes reduzierendes Schmelzen auf Roheisen und selbstzerfallende direkt laugbare Calciumaluminatschlacke.
- Vorreduktion des pelletierten Rotschlammes, reduzierendes Schmelzen auf Roheisen mit Stahlherstellung im LD-Konverter.

Bei der elektrothermischen Verarbeitung von Rotschlamm wird der Eisengehalt des alkalihaltigen Rotschlammes durch direkte Reduktion im Elektroofen gewonnen. Bei ausreichendem Reduktionsmittelangebot wird das Eisen nahezu vollständig (>98%) ausgebracht. Die Schlacke enthält dann weniger als 1% Eisen.

3.2. Hydrometallurgische Verfahren

Zur Erhöhung der Produktivität und zur Senkung der Kosten kann der hydrometallurgische Aufschluss von Rotschlamm entscheidend beitragen; unterschieden werden der alkalische und der saure Aufschluss.

3.2.1. Alkalischer Aufschluss

Bei der Verarbeitung eines Bauxits mit mehr als 5 % SiO_2 entfällt ein Großteil der Produktionskosten auf das NaOH. Die Kieselsäure bindet während des Bay-

³ Kaustifizieren: (kaustisch = ätzend, scharf; von griechisch: kausticós = brennend). Milde Alkalien (z. B. Soda oder Pottasche) in ätzende Alkalien (Natronlauge, Kalilauge) überführen.

er-Prozesses Alkali und Aluminiumoxid in Form von Natriumaluminiumsilikaten, die ausgefällt werden. Die Folge ist u. U. eine stark eingeschränkte Produktivität durch den Verlust von NaOH und Aluminium.

Beim traditionell angewendeten Kaustifizierungsverfahren wird in Abhängigkeit von der Reaktionsführung und der Art der Fest-Flüssig-Trennung ein Kaustifizierungsgrad von maximal 60-70 % erreicht. Unter Zugabe von Branntkalk oder Kalkmilch zur Rotschlammpulpe wird diese bei etwa 90-100°C 4 bis 5 Stunden lang gerührt, wobei sich der größte Teil des Na-Al-Hydrosilikats durch Freiwerden von NaOH umwandelt. Durch Filtration und vollständiges Waschen des kaustifizierten Rotschlammes kann das chemische regenerierte NaOH in den Kreislauf rückgeführt werden. Da in den Betrieben oftmals nur eingeschränkte Filtermöglichkeiten gegeben sind, werden 30 bis 50 % des chemisch regenerierten NaOH zur Halde gepumpt. Die hohen Kosten des Filters sowie die damit verbundene Arbeitsintensität bilden einen weiteren Nachteil dieses Verfahrens.

Die komplexe Kaustifizierung, die Kaustifizierung unter Druck sowie die hydrothermale Behandlung des Rotschlammes wurden im Rahmen von Forschungsprojekten untersucht. Letztere kann derart gestaltet werden, dass dieses Verfahren leicht in einen bestehenden *Bayer-Prozess* integriert werden kann. Hierbei wird eine isomorphe Substitution von Al^{3+} durch Fe^{3+} bzw. 4OH^- durch $(\text{SiO}_4)^{4-}$ durchgeführt; es entstehen hoch siliziumoxidhaltige Silikate des Eisenhydrogranat-Typs. Die Kombination der Stoffströme eröffnet Perspektiven zur Erhöhung der Produktivität des *Bayer-Prozesses*.

3.2.2. Saurer Aufschluss

ZIMMER (1980) beschreibt ein Verfahren, womit Eisen-, Aluminium- und Titanoxid sowie Na_2SO_4 durch sulfatisierenden Aufschluss von Rotschlamm gewonnen werden können.

Für großtechnische Verfahren unter Verwendung von Mineralsäuren kommen Schwefel-, Salz- und die Salpetersäure in Frage. Auf die Verwendung von Überdruck wurde generell verzichtet, da die im sauren Milieu zu erwarteten Korrosionsprobleme kaum beherrschbar sein dürften. Somit wurde auf eine infolge der Temperatursteigerung erhöhte Ausbringung verzichtet. In Vorversuchen konnte die im Säure äquivalent teure Salpetersäure ausgeschlossen werden, da diese Rotschlamm praktisch nicht löst. Konzentrierte Salzsäure löst Eisen nahezu vollständig, Aluminium zu etwa 80 %, Titan hingegen nur zu ca. 30%, auch wenn mit hohem Säureüberschuss gearbeitet wird. Ähnliche Auflöseraten ergaben sich beim Einsatz verdünnter Schwefelsäure ($\leq 4 \text{ M}$), auch hier war insbesondere die Titanausbringung zu schlecht.

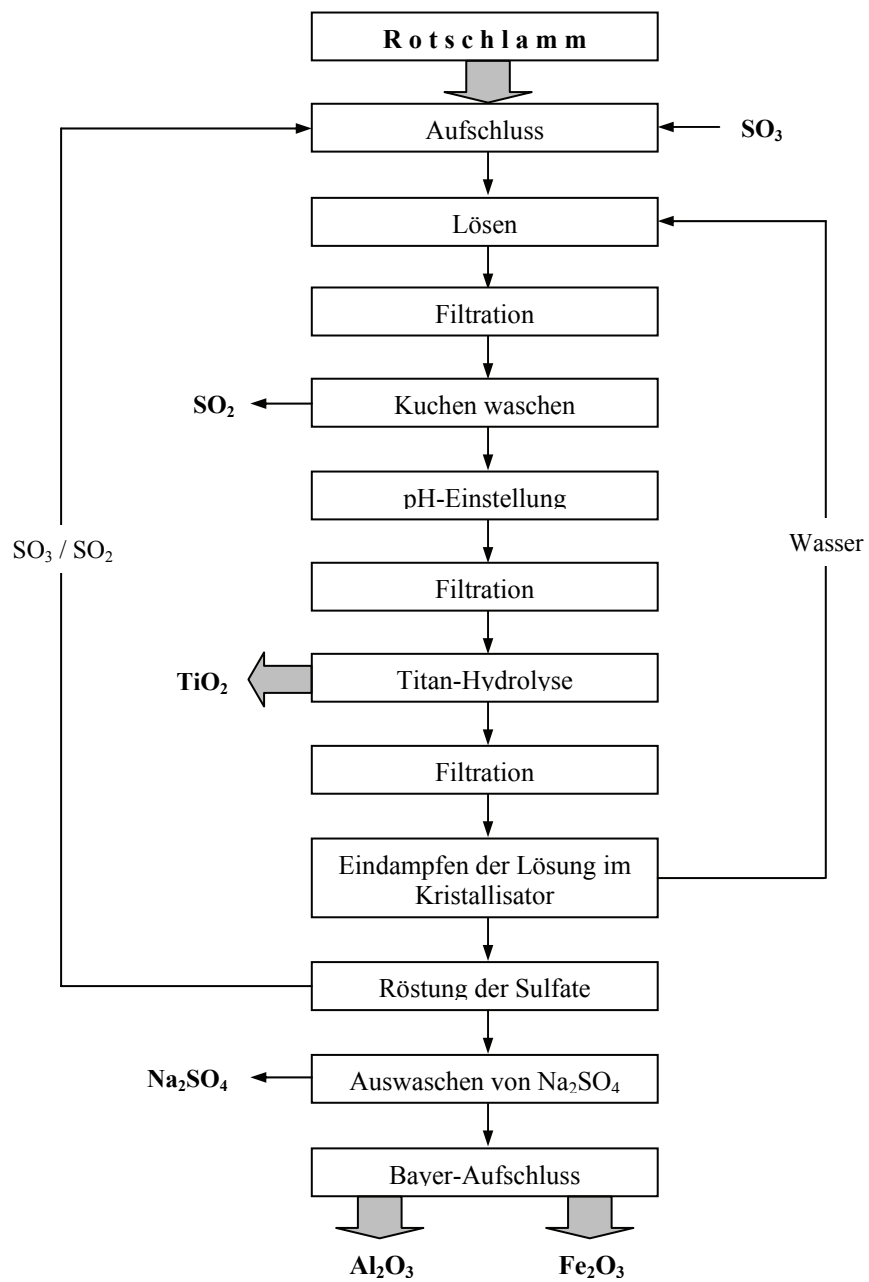


Abb. 1: Fließschema zur Verwertung des Rotschlammes nach sulfatisierendem Aufschluss (ZIMMER 1980, S. 641)

Die optimale Temperatur für den Aufschluss dürfte bei etwa 300°C liegen. Nach dem sulfatischen Aufschluss mit konzentrierter Schwefelsäure (H_2SO_4) oder SO_3 liegen die Sulfate des Aluminiums, Eisens, Titans und des Natriums vor. Durch Auslaugen mit Wasser lassen sich die Sulfate leicht von dem Aufschlussrückstand, der aus SiO_2 und einem Anteil von unaufgeschlossenem Metallen besteht, abtrennen. Aufgrund der gegenüber Aluminium und Eisen stärker ausgeprägten Neigung des vierwertigen Titans zur Hydrolyse⁴ und zur Ausfällung von $\text{TiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ bereits aus stark sauren Lösungen eröffnet die Möglichkeit, das Titan mehr oder weniger selektiv abzutrennen. Die in Lösung verbliebenen Salze werden durch Eindampfen oder durch Ausfällen mit Aceton in fester Form gewonnen. $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ und $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ werden bei 900°C zur Al_2O_3 und Fe_2O_3 zersetzt, das entstehende SO_3 kann für den sulfatisierenden Aufschluss rezykliert werden. Aus dem Röstgut wird durch Auslaugen mit Wasser Na_2SO_4 selektiv gewonnen, anschließend Al_2O_3 durch Bayer-Aufschluss. Den Rückstand dieses Aufschlusses bildet reines Fe_2O_3 (Abbildung 1).

Zwei weitere Verfahren stellt ENGLER (1999) dar. Ein weiteres Selektionsprinzip bildet die *sequentielle Laugung*. Da sich Titan in H_2SO_4 sehr gut, in HCl hingegen sehr schlecht löst, kann in der ersten Stufe mittels HCl -Aufschluss Eisen und Aluminium und in der zweiten Stufe mittels H_2SO_4 -Aufschluss Titan gewonnen werden. In der ersten Laugungsstufe reichert sich das Titan auf 31 bis 58 % an. In der zweiten Stufe wird das Residuum mit H_2SO_4 bei 270°C gelaugt, wobei der TiO_2 -Anteil durch anschließende Hydrolyse (80°C, pH 2) und Kalzinierung auf bis zur 96 % ansteigt.

Ein weiteres Verfahren ähnelt dem obig beschriebenen und wird in 4 Stufen durchgeführt:

- Stufe 1: Vorgewaschener Rotschlamm wird mit verdünnter HCl neutralisiert und anschließend auf 90 bis 95°C erhitzt. Unter permanentem Rühren wird solange HCl zugesetzt, bis sich ein pH-Wert von 4 einstellt.
- Stufe 2: Der getrocknete Rotschlamm aus der 1. Stufe wird mit starker HCl (20-25%) bei 90 bis 95°C behandelt. Dabei werden das vorhandene Aluminium und Eisen aufgelöst und anschließend ausgewaschen.
- Stufe 3: Der unlösliche Rückstand aus Stufe 2 wird mit konzentrierter H_2SO_4 bei 150 bis 180°C gerührt. Das TiO_2 reagiert dabei mit der Säure zu löslichen Sulfaten, die sich in Wasser zu Titanoxidhydrat umsetzen. Der weiße Niederschlag wird abgefiltert, gewaschen und getrocknet.
- Stufe 4: Das weiße Titanoxidhydrat wird bei ca. 1000°C kalziniert. Dabei bildet sich TiO_2 (Anatas) aus.

⁴ Hydrolyse: Aufspaltung chemischer Verbindungen durch Wasser.

3.3. Komplexe Rotschlammverarbeitung

Das Ziel sogenannter komplexer Verarbeitungstechnologien bildet die Nutzung bzw. Gewinnung mehrerer, möglichst aller Inhaltsstoffe aus dem Rotschlamm in Form von Wertprodukten. Diese Form der Rotschlammweiterverwertung beinhaltet meist eine Kombination aus pyrometallurgischen und hydrometallurgischen Verfahren.

Als praxisrelevant führt ENGLER (1999) Technologien mit folgender grundsätzlicher Zielstellung an:

- Gewinnung des Eiseninhalts in metallischer Form,
- Rückführung des Aluminium- und Natriuminhalts als Natriumaluminatlauge in den Bayer-Prozess,
- Verwendung eines anfallenden Rückstands (Grauschlamm) als Zementrohstoff.

Mit dieser Zielsetzung werden die wesentlichen Rotschlammbestandteile gewonnen bzw. genutzt sowie der Anfall an zu deponierenden Reststoffen vermieden. Die hierzu erarbeiteten Verfahren unterscheiden sich in der Wahl der Aggregate für thermische Stufen zur Eisenerzeugung (Drehrohröfen, Elektroöfen u. a.), in der Abfolge der einzelnen Operationen sowie in der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung der anfallenden Zwischenprodukte.

Exemplarisch folgt ein technologisch und apparativ beherrschbares Verfahren, welches aus der Zusammenarbeit zwischen den Forschungsinstituten für Nichteisenmetalle Freiberg und Budapest hervorging; die Stufen sind wie folgt:

- Vortrocknen des Rotschlamm auf ca. 15 % Feuchte, Mischen mit Koksgrus und Kalkstein, Brikkettieren.
- Schmelzen der Brikketts im Elektroofen mit der Erzeugung eines Sonderroheisens, Anfall einer selbstzufallenden Schlacke sowie eines alkali-erdalkalireichen Flugstaubs.
- Laugen des Schlackepulvers mit Soda unter Verwendung des Flugstaubs, Erzeugung einer Natriumaluminatlauge zur Rückführung in den Bayer-Prozess, Anfall eines sogenannten Grauschlamm als gut verwendbarer Zementrohstoff.

Für das Verfahren werden Ausbringungen für Eisen >98 %, für Al_2O_3 75-80% und für Alkali mit >96 % genannt. Der Bedarf an elektrischer Energie wird mit Werten von 800 bis 900 kWh je t Möller (mit 60 bis 70 % Rotschlamm) beziffert.

Eine weitere Technologie im Bestreben nach vollständiger Gewinnung der im Rotschlamm enthaltenen Elementpalette stammt aus Jugoslawien, wobei sich deren praktische Umsetzung nach ENGLER (1999) als zu kompliziert erweist.

Die Arbeitsstufen sind wie folgt:

- Mischen des luftgetrockneten Rotschlammes (30 bis 35 % Wasser) mit Kalkstein und Koksgrus, Brikettieren.
- Schmelzen im Elektroofen, Erzeugung eines Spezialroheisens sowie einer granulierten Schlacke.
- Laugen der Schlacke mit 30%-iger Schwefelsäure ($\approx 1,2$ t Schwefelsäure je t Schlacke), Filtrieren.
- Mischen des Laugungsrückstands mit Rohphosphat (1,2 t Phosphat je t Rückstand) und Absatz der Mischung als Düngemittel.
- Fraktionierte Gewinnung von Verbindungen des Titans, Zirkons, Urans, Thoriums, Yttriums, Scandiums sowie weiterer Spurenelemente über Flüssig-Flüssig-Extraktion, Rückextraktion, Hydrolyse- und Fällprozesse.
- Mehrstufige Gewinnung von Aluminiumverbindungen aus der Restlösung.

Literatur

ENGLER, S. (1999): Untersuchungen zur Verwertung von Rotschlamm aus der Aluminiumindustrie. Diplomarbeit, Institut für Aufbereitung und Deponietechnik, Technische Universität Clausthal.

HEGENBARTH, R. (1972): Verwertung von Rotschlamm. In: *Aluminium*, 48. Jahrg., 11.

ZIMMER, E. (1980): Verfahren zur Verwertung von Rotschlamm als sekundäre Rohstoffquelle. In: *Aluminium*, 56. Jahrg., 10.

<http://www.fh-aalen.de/sgv/rennfeuer/rennofenfh/prinzip.htm>
am 20.11.2002.

<http://www.agstuttgart.de/referate/neuzeit.htm>
am 20.11.2002.

http://sfb525.rwth-aachen.de/sfb/subpro/sub_pro2/entsorg/rots6ade.htm
am 20.11.2002.

4. Geologisch-technische Eigenschaften und die kompletten Anwendungen des Feststoffabfalls Rotschlamm in der Aluminiumindustrie Chinas

4.1. Einleitung

Als ein Ergebnis der extensiven Ausnutzung der Ressourcen in China fallen enorme Mengen von Industrieabfällen an. Diese Abfälle können, wenn sie nicht effektiv beseitigt werden, den ökologischen Lebensraum schädigen, in dem die Menschen leben. Folglich sind dessen ökonomische Behandlung und Anwendung in zahlreichen Ländern der Welt dringend geworden und bildet neue Forschungsgebiete für angewendete geologische Technik und Umweltgeotechnologie aus. Die Aluminiumindustrie in China hat sich in den letzten Jahren rasant entwickelt. Der Prozess der Aluminiumproduktion kann wie folgt beschrieben werden: Bauxit wird zu Tonerde (Aluminiumoxid Al_2O_3), Weiterverarbeitung zu elektrolytischem Aluminium, woraus letztendlich zu Aluminiummaterialien hergestellt werden. Einer der Hauptrückstände der Aluminiumindustrie ist Rotschlamm, eine Art sandig-schlammiger alkalischer Feststoff, der einen hohen Wassergehalt nach verschiedenen physikalischen und chemischen Behandlungen aufweist.

Entsprechend unvollständigen statistischen Daten von 19 Aluminiumfabriken in China, betrug der Rotschlammanfall in den frühen neunziger Jahren über 300.104 t/Jahr. Der Rotschlammabfall (1) belegt große Teile der Kulturfläche, (2) verschmutzt die ökologische Umwelt wie Boden, Oberflächenwasser und Grundwasser und (3) bedroht die Sicherheit von Leben und Boden, sollte ein Deich eines Rotschlammreservoirs bersten. Auf der Grundlage einer kompletten Studie seiner Zusammensetzung und seinen technischen Eigenschaften erfolgt in diesem Papier eine Diskussion über die Beseitigung und die Anwendung des Rotschlammes anhand einer Aluminiumfabrik in der Shanxi Provinz von China.

4.2. Physikalische Eigenschaften und Aufbau des Rotschlammes

4.2.1. Physikalische und hydrophile Eigenschaften

Der Rotschlamm mit seinem hohen Wassergehalt ist zunächst klebrig, kann aber in Abhängigkeit nach Herkunft und Lagedauer in seinen typischen Eigenschaften variieren.

Hoher Wassergehalt: Fünf Proben ergaben eine Wassergehaltsspanne 85,79% - 89,97%, die höher als üblicher Lehm- und sogar lehmiger Küsteboden ist. Das

Überschreiten seiner Fließgrenze (71,0 %-78,0 %) zeigt an, dass Rotschlamm instabil ist und freies Wasser nach geringfügigem Rütteln freigeben wird.

Niedrige Dichte: Die Dichte, welche mittels Schneidringen (ring cutting) ermittelt wurde, reichte von 14,73 bis 15,06 kN/m³; lag bei trockenen Proben bei niedrigen 7,90-8,10 kN/m³ und nahm bei dem Vorhandensein von Hohlraumanteilen (void ratio) auf 2,45 bis 2,61 kN/m³ ab. Der hohe Wassergehalt und die niedrige Dichte wurden hauptsächlich durch die hohe Porosität des Rotschlammes verursacht (vgl. Bild 1).

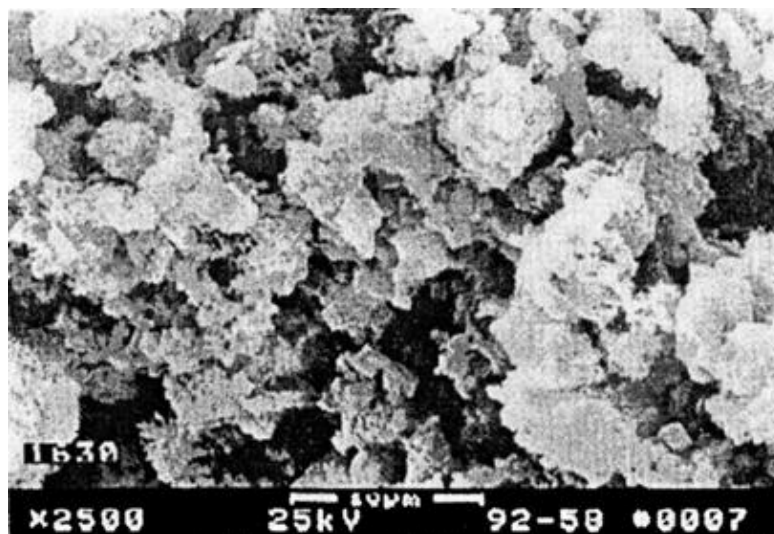


Bild 1: REM-Aufnahme der Mikrostruktur von Rotschlamm, die die Anhäufungen von sehr feinem Karbonat (Aragonit und Calcit) zeigt.

Hohe Konsistenz: Die Konsistenz ist ein Maß für die Härte des lehmigen Bodens. Der Rotschlamm hat eine Fließgrenze, die von 71,0 % bis 78,0 % reicht, und eine Plastizitätsgrenze von 44,5%-51,0%, wenn beide verhältnismäßig hoch sind. Der Plastizitätsindex liegt allerdings bei verhältnismäßig niedrigen 24 bis 30 auf Basis einer Technikklassifikation für lehmigen Boden durch die Technikklassifikation. Der hohe flüssige Index (1,31-1,56) und das hohe Verhältnis des Wassergehalts zur Fließgrenze (1,10-1,15) sind für das plastische Fließen verantwortlich und zeigen an, dass Rotschlamm zu den Industrieabfällen gehört.

Eigenschaften der Wassereinlagerung (water-bearing) und Verflüssigung des Rotschlammes: Experimente durch die Autoren haben gezeigt, dass frische Rotschlammproben durch Verdichtung/Stoss/Schlag Wasser freigeben werden, was eine Verflüssigung verursacht. Die des Rotschlammes wurde mit frischen pulverisierten Proben unter Schwerkraft gemessen und lag mit 79,03 %-93,32% sehr nah an dessen natürlichem Wassergehalt von 85,79 %-89,97 %. Das freigegebene Wasser während des Rüttelns reichte von 4,37-14,91%, abhängig von der Wassereinlagerungskapazität. Damit deutet sich an, dass frischer Rot-

schlamm, wenn er als Rückstand für Lagerverdammungen verwendet wird, infolge mechanischer Erschütterung verflüssigen und zum Versagen der Erdmassen führen könnte; was als Dammbbruch bekannt ist.

Chemischer Aufbau des roten Schlammes: Die spezifischen Technikeigenschaften und die dazugehörigen Umweltprobleme des Rotschlammes resultieren aus seinem chemischen und mineralischen Aufbau, sowie der Änderung, die während der Lagerung eintritt. Chemische Analysen erfolgten mit drei Arten von Proben: ursprünglicher, kolloidaler⁵ (< 0,002 Millimeter) und eine grobe Probe (> 0,002 Millimeter; Tabelle 2) von Rotschlamm.

Table 2. Gross analysis results of red mud wastes

Sample number	Sample type	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	H ₂ O	CO ₂	Total	CaCO ₃ (%)
1627	Original	16.40	2.50	6.84	6.91	0.73	33.07	1.67	0.17	3.00	3.05	26.58	100.92	60.35
1628	Original	14.10	2.50	6.94	6.78	0.66	33.59	1.29	0.17	3.25	3.42	27.81	100.51	63.17
1629	Original	12.80	2.75	7.74	6.54	0.82	34.16	1.11	0.19	3.00	3.48	27.01	99.60	61.35
1630	Original	12.43	2.25	7.40	7.04	0.66	34.11	1.15	0.17	3.00	3.27	28.14	99.62	63.92
1635	Original	13.70	2.25	7.51	6.97	0.59	34.37	1.52	0.15	1.42	3.38	26.35	99.11	59.85
1627-1	<2 µm	24.20	1.25	14.23	10.88	0.66	18.01	1.49	0.27	2.95	5.41	15.45	94.80	35.09
1628-1	<2 µm	21.10	1.50	15.36	10.46	0.44	20.05	1.30	0.27	3.07	5.10	17.03	95.58	38.68
1635-1	<2 µm	21.30	1.25	16.51	11.00	0.52	17.44	1.30	0.26	2.45	5.71	15.25	92.99	34.40
1627-2	>2 µm	16.30	2.50	6.83	6.60	0.66	33.59	1.49	0.16	1.35	2.58	27.44	99.50	62.33
1628-2	>2 µm	16.95	2.50	7.06	6.75	0.69	34.40	1.52	0.15	1.38	2.91	25.22	99.52	57.28
1635-2	>2 µm	15.00	2.25	7.17	6.91	0.62	34.52	1.67	0.15	1.42	2.94	26.92	99.57	61.15

Chemische Zusammensetzung des ursprünglichen Rotschlammes

1. Die Hauptbestandteile von ursprünglichem Rotschlammes bilden CaO und CO₂, deren Gehalt reicht von 33,07 % bis 34,37 % bzw. 26,35 % bis 28,14 % bei einem entsprechenden Mineralaufbau aragoniten⁶ (CaCO₃) oder Calcit (CaCO₃). Der Inhalt von CaCO₃ reichte von 59,85 bis 63,92%, das für mehr als die Hälfte des Rotschlammes steht. Die Ausscheidung/Ablagerung und die Kristallisation von CaCO₃ wird durch die Hinzufügung von Ätzkalk (CaO) und Kohlendioxyd (CO) während der Aluminiumproduktion hervorgerufen, wobei die grobkörnigen Bestandteile (Skelett) und die zementierende Materialien herausgebildet werden.
2. Der Gehalt an SiO₂ im Rotschlamm reicht von 12,43 % bis 16,40 %, welches von Kaolinit [Al₂SiO₅(OH)₄] getrennt wird und sich mit während der Aluminiumoxidproduktion aus hydrophane (SiO₂ · nH₂O) und Natrium-

⁵ Kolloid: Stoff, der sich in feinsten, mikroskopisch nicht mehr erkennbarer Verteilung in einer Flüssigkeit oder einem Gas befindet (Chemie).

⁶ Aragonit: nach der spanischen Landschaft Aragonien; ein Mineral aus der Gruppe der Karbonate (kohlensäure Salze)

- kieselsäure (Na_2SiO_3) verbindet, was die irreversible Zementierung während des Alterns und des Verhärtens des Rotschlammes bewirkt.
3. Der Gehalt von Aluminiumoxid Al_2O_3 bewegt sich in einer Spanne von 6,84% bis 7,74%, der üblicherweise in Form von NaAlO_2 und $\text{Al}(\text{OH})_3$ existiert; in Anwesenheit des starken alkalischen Milieus NaOH .
 4. Fe_2O_3 , ein Kolloid von $\text{Fe}(\text{OH})_3$, gebildet durch Oxidation und Hydratation des dazugehörigen FeS_2 im Bauxit, reicht von 6,54 % bis 7,04 % (während der Gehalt an FeO nur zwischen 0,59% und 0,82% liegt). Das Kolloid von $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ist unter stark alkalischen und aufgeheizten Bedingungen instabil und neigt dazu, in Goethite $\text{FeO}(\text{OH})$ umzuwandeln, das mit dem Kolloid $\text{Fe}(\text{OH})_3$ im frischen Rotschlamm koexistieren kann, während FeO als Form von Siderite (FeCO_3) bestehen kann.
 5. Der Na_2O -Anteil im Rotschlamm war verhältnismäßig hoch, im Allgemeinen zwischen 3,0 % bis 3,25 % und besteht in gelöster Form, wie Na^+ . Deren Menge wird durch die in der Aluminiumproduktion exzessive Verwendung von NaOH verursacht. Zusätzlich werden eine Reihe salziger Ablagerungen oder kolloidale Produkte, wie Na_2CO_3 , NaHCO_3 , Na_2SiO_3 , NaAlO_2 , während der Trocknung gebildet, die an Umgestaltung der Struktur des gealterten Rotschlammes mitwirken.
 6. Der TiO_2 -Gehalt ist auch verhältnismäßig hoch und reicht von 2,25% bis 2,75%, im Bauxit als Bestandteil des Rutil⁷ und des Anatas⁸ vorhanden.

Chemischer Aufbau von Rotschlamm <0,002-Millimeter

Die chemischen Analysen von feinem Rotschlamm <0,002 Millimeter, verglichen mit dem des ursprünglichen Rotschlammes und grobem Rotschlamm >0,002 Millimeter zeigen, dass SiO_2 , Al_2O_3 und Fe_2O_3 bestehen in der Fraktion <0,002 Millimeter hauptsächlich als Kolloide. Verglichen mit der Originalprobe lag der Gehalt an SiO_2 um 60 % höher, Al_2O_3 bis zu 110,7% und Fe_2O_3 bis 57,4%, während sich der CaCO_3 -Gehalt um 41% verringerte.

Chemischer Aufbau des leicht löslichen Salzes im Rotschlamm

Die Ermittlung der durchdringenden Lösung im Durchdringungstest zeigte, dass große Mengen der leicht löslichen Salze im Rotschlamm aus der Hinzufügung von NaOH , CO_2 und von CaO anwesend waren, resultierend aus der Tonerdeproduktion. Die Resultate zeigen, dass der chemische Aufbau hauptsächlich aus dem leicht löslichen Salz Na_2CO_3 bestand (bis zu 60 % der Gesamtmenge). Weitere Salze waren Na_2SO_4 , $10 \text{ H}_2\text{O}$, NaHCO_3 , NaAlO_2 . (Tabelle 3) Diese leicht löslichen Salze existieren im Rotschlamm zu Beginn der Einlagerungsphase in

⁷ Rutil: In Form prismatischer, gestreckter oder säuliger Kristalle oder feinsten Nadeln auftretendes, metallisch glänzendes, rötliches Mineral; chemisch TiO_2 ; synthetische Rutilkristalle als Schmucksteine.

⁸ Anatas: Verschiedenfarbiger Schmuckstein.

gelöster Form. Die Dehydratisierung, besonders während der Trocknung, verursacht die Anordnung des festen Salzes auf der Oberfläche.

Table 3. Results of chemical analyses of easily soluble salt in red mud

Sample number	pH value	Residue after drying	Cations (mg 100 g ⁻¹)					Anions (mg 100 g ⁻¹)						
		(mg 100 g ⁻¹)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Total	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	AlO ₂ ⁻	OH ⁻	Total
1627	11.25	1,880	1.85	35.37	607.07	13.44	657.73	187.01	547.86	305.89	29.46	72.42	-	1,142.64
1628	11.50	1,849	0.74	9.52	720.73	16.43	747.42	119.37	675.04	271.91	34.37	85.58	1.11	1,187.38
1635	11.25	1,340	0.37	4.48	661.19	15.97	682.01	136.98	567.42	253.78	36.83	84.27	12.2	1,091.48

4.2.2. Mineralischer Aufbau des Rotschlammes

Nachdem der Rotschlamm mittels Röntgenstrahl-Beugungsanalyse, chemische Analyse des Felsens, Differentialthermoanalyse (DTA), Infrarotabsorptionsspektroskopie, Mössbauer-Spektrometrie und Rasterelektronenmikroskop (SEM) studiert wurde, waren die Resultate wie folgt:

1. Die Mineralien des Rotschlammes sind Aragonit⁹ und Calcit¹⁰ (Kalkspat), die beide polymorphe Körper von CaCO₃ sind. Wegen der Instabilität von Aragonit unter normaler Temperatur und Druck hat es die Tendenz, sich in Calcit umzuwandeln; darüber hinaus enthält es ein wenig Siderit¹¹ (FeCO₃).
2. Die untergeordneten Mineralien des Rotschlammes sind hydratisierte freie Oxide wie hydrophane (SiO₂·nH₂O), Goethit (Nadeleisen) oder hydrohematite β-FeO(OH) und das Aluminiumhydroxid Gibbsite [Al(OH)₃]. Goethit besteht normalerweise in Form einer dünnen Kruste, welche die Oberfläche der Körner beschichtet und als ein zementierendes Material fungiert.
3. Eine Schicht von weißem Puder wurde im allgemeinen auf der Oberfläche der regelmäßigen Testproben des Rotschlammes gebildet, der im Labor getrocknet wurde. Entsprechend der Resultate der Röntgenstrahlbeu-

⁹ Aragonit = Kalziumcarbonat (CaCO₃): Benannt nach der spanischen Landschaft Aragonien. Chemische Kalkfällungen aus heißem Wasser bilden meist dieses Mineral. Stützskelett und Schalen vieler Tiere (der meisten Muscheln und Schnecken, mancher Korallen, u.a.) bestehen aus Aragonit, ebenso die Perlen (die ja nichts anderes sind als Schalenmaterial der Flussperlmuschel).

¹⁰ Calcit = Kalkspat = Kalziumcarbonat (CaCO₃): Die chemische Zusammensetzung gleicht dem des Aragonits, besitzt aber ein anderes Kristallgitter. Calcit ist der Hauptbestandteil des Kalksteins. Er wird von Salzsäure rasch, von Humussäuren oder Kohlensäure langsam gelöst. Das Mineral verhält sich genau umgekehrt wie andere Stoffe: Es ist in kaltem Wasser leichter löslich als in warmem.

¹¹ Siderit: Spateisenstein, Spateisenerz; hellgelbbraunes Mineral, wichtiges Eisenerz in sedimentären Lagerstätten.

gungsanalyse besteht die Schicht aus einer Mischung von Trona (Natriumhydrogencarbonat) $[\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$ und von Thermonatrit ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Die Salzablagerungen sind durch Verdampfung und Kondensation auf der Oberfläche gebildet worden, bzw. durch Kapillarkwirkung der Na^+ -, HCO_3^{3-} -, und CO_3^{2-} -Ionen unter Trocknungsbedingungen. Obgleich deren Anteil kleiner als 2 g pro 100 g ist, sind sie wegen ihrer Ansammlung und der Anordnung in Form einer weißen Kruste auf der Oberfläche ernsthaft schädlich für die Umwelt.

4. Entsprechend den chemischen Analysen finden sich einige instabile Komponenten, wie Na_2SiO_3 , NaAlO_2 , NaOH und $\text{Fe}(\text{OH})_3$, im Rotschlamm (pore fluids). Im Allgemeinen können Aragonit, Calcit und Siderit nicht nur als die Skelette des Rotschlammes dienen, sondern zementieren sich gegenseitig durch Phasenumwandlung und Rekristallisation unter trockenen Bedingungen. Kolloide der freien Oxide wie hydrophane ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), Natriumkieselsäureverbindung (Na_2SiO_3), Goethit [$\beta\text{-FeO}(\text{OH})$] und Gibbsit [$\text{Al}(\text{OH})_3$] werden irreversible Klebmaterialien des getrockneten Schlammes dessen Transformation zu einem Festkörper.

Partikel- und Gesamtbeschaffenheit des Rotschlammes

Übermäßige Hinzufügung von NaOH , CaO und CO_2 im Rahmen der Tonerdeproduktion spiegeln sich in Anwesenheit der reichlich vorhandenen Elektrolyte (Dispersionsmittel), wie NaOH und NaHCO_3 im roten Schlamm wieder und sind dafür verantwortlich, dass Rotschlamm unter natürlichen Bedingungen in hohem Grade im Dispersionszustand auftritt. Die Partikelbeschaffenheit wird mit einem flüssigen Extrakt des Rotschlammes mit einem Schlamm/Wasser-Verhältnis von 1:10 gemessen: Suspensionen solch eines Extraktes sind ohne Flockenbildung sehr beständig. Der Partikelbruch von $<0,005$ Millimeter reichte von 19,6 % bis 26,8 %, der Partikelbruch $<0,002$ Millimeter lag zwischen 15,2 % bis 23,6 %. Die Hauptteilchengröße betrug $>0,01$ Millimeter. So gehörten die meisten Proben schwerem Lehm, einige schwerem sandigem/schlammigem Lehm an. Es muss unterstrichen werden, dass der Inhalt des feinen Lehmes von $>0,1$ Millimeter mit Werten zwischen 28,91 % und 35,37 % sehr hoch war; im Allgemeinen >30 %. Braune Sandpartikel und grobe Siltpartikel können von Hand in sehr feine Partikel gerieben werden. Damit zeigte sich, dass die stark integrierte Gesamtheit von hoher Stabilität ist. Jedoch zeigten mit Ultraschall behandelte Suspensionen unter Verwendung von HCO_3^{3-} und Ca^{2+} -haltigem Leitungswasser auch eine beträchtliche Instabilität; die Suspension fällte nach dem Schütteln schnell aus. Dieses zeigte an, dass die Dispergierung zur Verflüssigung des Rotschlammes unter den Auswirkungen eines HCO_3^{3-} und Ca^{2+} -haltigen Oberflächen- oder Grundwassers nach der Lagerung beträchtlich gesenkt würde (Tabelle 4).

Table 4. Granulometric analysis results of red mud in different dispersing media

Sample number	Dispersing media	Particle composition (mm, %)						Structural coefficient ^a
		>0.1	0.1 to 0.05	0.05 to 0.01	0.01 to 0.005	<0.005	<0.002	
1627	Distilled water	35.28	11.12	26.0	8.0	19.6	15.2	5.43
	Tap water	20.61	25.79	35.6	12.8	5.2	2.8	
1628	Distilled water	28.91	4.29	31.2	10.0	25.6	21.2	6.63
	Tap water	15.51	20.88	48.8	9.6	5.2	3.2	
1629	Distilled water	35.24	3.16	26.4	8.8	26.4	23.6	2.81
	Tap water	37.44	16.16	23.6	9.2	13.6	8.4	
1630	Distilled water	30.23	5.77	26.0	11.2	26.8	22.4	6.22
	Tap water	57.2	12.18	20.8	6.0	4.0	3.6	
1635	Distilled water	35.37	6.63	22.8	10.0	25.2	19.6	12.30
	Tap water	45.92	4.03	38.0	7.6	4.4	1.6	

^aStructural coefficient is the ratio of the content of <0.002 mm particle fraction measured by distilled water to that measured by tap water

4.3. Technische Eigenschaften des Rotschlammes

4.3.1 Permeabilität und auslaugende Eigenschaften

Das Inkohärenz sowie der hohe Gehalt an feinen Sanden und grobkörnigen Silts bestimmen die Permeabilitätsforschung des Rotschlammes. Unter Verwendung eines Nan-55-lysimeters und Leitungswasser als Durchdringungsflüssigkeit, haben die Autoren die Permeabilität und Auslaugeeigenschaften der ursprünglichen Rotschlammproben analysiert (Tabelle 5).

Table 5. Test results of permeability and leaching property of red mud. The results of chemical analysis for tag water: pH=7.62, degree of mineralization=240.9 mg/l, the type of water quality belongs to HCO_3^- - Ca^{2+}

Sample number	Duration of time	Filtration coefficient	pH value	Na ⁺	K ⁺	Salt content	Natural density	Dry density	Water content
	(h)	($\times 10^{-5} \text{ cm s}^{-1}$)		(mg l ⁻¹)	(mg l ⁻¹)	(mg l ⁻¹)	(kN m ⁻³)	(kN m ⁻³)	(%)
1632-1	2.00	2.36	12.6	2,500.0	116.2	9,848	15.3	76.7	8.7
1632-2	3.40	3.40	12.3	857.0	60.0	2,732			
1632-3	4.50	3.62	11.96	340.0	21.1	1,192			
1632-4	5.75	3.48	11.87	290.0	15.0	956			
1633-1	2.20	1.86	12.56	2,307.7	80.0	7,980	14.9	74.6	8.5
1633-2	3.50	2.36	12.22	660.0	31.0	2,048			
1633-3	4.70	2.59	12.08	469.9	25.7	1,456			
1633-4	5.92	2.57	11.85	285.0	4.3	868			

1. Rotschlamm ist mit einem Filtrationskoeffizienten zwischen $2,57 \cdot 10^{-5}$ Zentimeter s^{-1} und $3,62 \cdot 10^{-5}$ Zentimeter s^{-1} schwach durchlässig. Der Filtrationskoeffizient liegt nahe an jenem von Löss¹².
2. Der Filtrationskoeffizient des Rotschlammes wird von dem Durchdringungswasser beeinflusst und neigt zu einer stufenweisen Erhöhung, weil das Auslaugen der leicht löslichen Salze und die Flockenbildung von Ca^{2+} zu einer schnellen Abnahme der Salze führen. Der ursprüngliche Gehalt an Salzen verringerte sich innerhalb von sechs Stunden auf ungefähr ein zehntel, von 8-10 g/l auf 0,87-0,96 g/l. Folglich tritt unvermeidlich nach der Lagerung von Rotschlamm eine Alkalisierung des Grundwassers und des Bodens ein. Es sollte unterstrichen werden, dass die starke Alkalität (mit einem pH-Wert von $>12,5$ und einem pH-Wert der auslaugenden Lösung von bis zu 11,7, nachdem das Residuum für sechs ausgelaugt wurde) für die ökologische Umwelt schädlich ist.

Verdichtbarkeit des Rotschlammes

Der in hohem Grade poröse, nasse Rotschlamm wird stufenweise im Rahmen des Deponierens in der Rückstandverdammung verdichtet und verfestigt. Seine Kompressibilität wird mit der Dauer seiner Ablage reduziert, resultierend aus der Kristallisation der löslichen Salze von den pore solutions durch Trocknung und die Zementierung, die durch das Mineral Hydrophan ($SiO_2 \cdot nH_2O$), Goethit $[FeO(OH)]$, Gibbsit $[Al(OH)_3]$ und Natriumkieselsäureverbindung (Na_2SiO_3) verursacht wird, damit wird es ein weniger zusammenpressbares nicht-metallisches Material (Tabelle 6).

Table 6. Results of compressibility test of red mud

Sample number	Water content	Natural density	Dry density	Void ratio	Subsidence rate (mm m^{-1})		Modulus of compressibility	Compression coefficient
	(%)	($kN m^{-3}$)	($kN m^{-3}$)		0.1 MPa	0.2 MPa	(MPa)	(MPa^{-1})
1637-1	80.39	14.4	8.0	2.57	14.0	20.0	16.67	0.218
1637-2	80.39	15.3	8.5	2.37	6.0	12.5	15.39	0.223
1638-1	87.08	15.5	8.3	2.44	6.5	17.8	8.89	0.395
1638-2	87.08	13.8	7.4	2.85	19.0	30.0	9.09	0.433

Die Verdichtbarkeitstestergebnisse der ursprünglichen Rotschlammproben stammen von einer Aluminiumfabrik aus der Provinz Shanxi. Die Senkungsrate lag in einer Spanne von 6,0 bis 19,0 mm/m unter einer Last von 0,1 MPa, sowie von 12,5 bis 30,5 mm/m unter einer Last von 0,2 MPa, ferner einem Verdichtbarkeitsfaktor (1-2) von 0,218 bis 0,433 MPa^{-1} . Diese Werte zeigen eine mittlere Kompressibilität, die nicht ganz mit ihrer hohen Porosität ($e > 2.0$) und einem ho-

¹² Löss: aus Trocken- oder Kältewüsten ausgewehtes Lockersediment, besteht aus durchschnittlich 60–70 % Quarz, 10–30 % Kalk, 10–20 % Tonerdesilicaten. L. umgibt gürtelartig die im Pleistozän vergletscherten Räume; er ist sehr standfest, daher sind hier tiefe Schluchten und Hohlwege typ., ebenso Höhlenwohnungen und Vorratsräume.

hen Wassergehalt ($w > 80\%$) kompatibel ist, die aus der Rekristallisation der Karbonate entstehen können.

4.3.2. Festigkeit des Rotschlammes

Mit vier Originalproben wurde ein direkter Schertest durchgeführt (Tabelle 7). Trotz des hohen Wassergehalts und der niedrigen Dichte war die Scherstärke nicht niedrig, mit einem internen Reibungswinkel von $29-31^\circ$ (höher als der von Löss) und keiner niedrigen Kohäsion (c). Die wird dem hohen Gehalt an groben Silt-Partikeln $> 0,01$ Millimeter und den feinen Sandpartikeln ($> 60\%$), sowie den zuvor dargestellten Rekristallisations- und Zementierungsprozessen zugeschrieben.

Table 7. Results of quick shear test of red mud

Sample number	Water content	Natural density	Dry density	Cohesion	Angle of internal friction	Remarks
	(%)	(kN m^{-3})	(kN m^{-3})	(MPa)	($^\circ$)	
1627	88.1	15.0	8.0	0.0125	30	The results of no. 1636 are obtained by the sample conserved for 100 days
1629	87.2	14.9	7.9	0.04	29	
1635	89.4	15.0	7.9	0.005	31	
1636	84.3	14.8	8.1	0.075	29	

Außerdem kann für die hohe Scherstärke auch die Trockenlegung der Proben während der Tests verantwortlich sein. Rotschlamm bildet ein ähnliches Verhalten wie gesättigter Lehm aus. Bei Verformung schwankt die Scherbelastungsrate mit der Zunahme der Scherbeanspruchung. Lange konservierte Proben haben diesbezüglich einen bemerkenswert höheren Zusammenhang als unkonservierte Proben. Folglich kann eine diskontinuierliche Füllung des Rotschlammabfalls helfen, die Stabilität der Verdammung zu verbessern.

Kontraktion- und Zerfallbeständigkeit des Rotschlammes

Die volumetrische Schrumpfung von Rotschlamm erfolgt nicht infolge dessen Freilegung, jedoch tritt mit der schrittweisen Trocknung eine Verhärtung ein. Untersuchungen an verhärtetem Rotschlamm zeigen auf der Basis von Erfahrungen keinen Zerfall, wenn er getränkt wird. Selbst eine erneute Trocknung nach einer Wasserbehandlung, die für eine bestimmte Zeit erfolgte, zeigen weder Expansion noch Zerfall. Der Grund hierfür liegt in der Rekristallisation von CaCO_3 und der Zementierung des Rotschlammes.

Korrosion des Rotschlammes

Neben dem hohen Wassergehalt enthalten Industrieabfälle große Mengen der stark alkalischen Materialien wie NaOH , NaHCO_3 , Na_2CO_3 , Na_2SiO_3 , NaAlO_2 , sodass Rotschlammabfall verschiedene Formen von Korrosion ausübt. Einige Beispiele, die während des Experimentierens erschienen, waren (1) die Kästen für den zu messenden Wassergehalt wurden beträchtlicher Korrosion unterworfen, hervorgerufen durch die Reaktion des Aluminiums mit NaOH zu NaAlO_2 zu bilden. (2) Quarz und Glas sind üblicherweise außerordentlich resistent, wenn beide Werkstoffe neutralen oder säurehaltigen Mitteln ausgesetzt werden; jedoch scheint es umfangreiche Auflösungen zu geben, wenn der pH-Wert des Wassers 11 übersteigt. In den Zerfalltests trennten sich die weißen Salzablagerungen heraus, wenn das destillierte Wasser gegen eine stark alkalische Lösung ausgetauscht wurde. Darüber hinaus verwandelte sich die innere Wand des Bechers in eine halb-transparente raue Oberfläche. (3) Der direkte Hautkontakt mit dem Rotschlammes für eine kurze Zeit führt zu Schmerzen, die Haut wurde wegen der alkalischen Bedingungen empfindlich. Die Entwässerung des Rotschlammes führt zu einer Reihe Umweltproblemen, wie der Bedrohung des Wachstums von Getreide und Bäumen sowie die Sicherheit von Menschen und Tieren.

4.4. Verstärkung des Rotschlammabfalls

4.4.1. Experiment von Rotschlammverstärkung mittels Ätzkalk

Ätzkalk wird normalerweise zur Verstärkung von Dämmen in der Provinz Shanxi in China angewendet, die aus Rotschlammabfällen bestehen – ebenso wie in der westlichen Ebene von Deutschland (chinesisches Zustand-Büro Umweltschutz 1992; Chen 1999). Im Labor durchgeführte Experimente zeigen, dass die Festigkeit des Rotschlammes stieg, nachdem Ätzkalkanteile von 6, 10, 15 und 20 % zugemischt und anschließend für 10 Tage aufbewahrt wurde. Diese Erkenntnis spiegelt in einer Zunahme der Kohäsion und des internen Reibungswinkels zu einem sanften/nachgiebigen Hügel wieder (Tabelle 8).

Table 8. Test results of red mud reinforcement by quicklime

Test order	Method of reinforcement	Duration of time	Water content	Natural density	Dry density	Special gravity	Shear strength	
		(day)	(%)	(kN m^{-3})	(kN m^{-3})		(c/MPa)	φ ($^{\circ}$)
1	Simply conserved	5	51.43	13.3	8.8	2.811	0.075	28.0
2		10	55.81	13.7	8.8		0.068	28.0
3		20	57.2	13.2	8.4		0.035	26.0
4		40	57.82	13.2	8.4		0.085	27.0
5	Mixed with quicklime in the ratio 6%	5	61.61	12.9	8.7	2.785	0.046	13.8
6		10	62.46	12.8	7.9		0.055	26.6
7		20	60.63	12.9	8.0		0.035	33.5
8		40	69.64	12.8	7.5		0.020	31.5
9	Mixed with quicklime in the ratio 10%	5	47.10	11.1	7.5	2.733	0.015	24.0
10		10	65.68	12.4	7.5		0.030	31.3
11		20	63.03	12.5	7.7		0.094	31.0
12		40	63.18	12.2	7.5		0.110	37.0
13	Mixed with quicklime in the ratio 15%	5	66.37	12.4	7.5	2.701	0.090	21.0
14		10	69.62	11.0	6.8		0.080	23.6
15		20	68.45	12.2	7.2		0.105	32.5
16		40	62.50	10.8	6.6		0.105	34.5
17	Mixed with quicklime in the ratio 20%	5	49.13	12.9	8.6	2.683	0.240	49.0
18		10	50.39	12.4	8.3		0.210	52.5
19		20	46.03	12.6	8.6		0.120	37.5
20		40	50.81	12.7	8.4		0.110	58.0

Verstärkungsmechanismen

Die oben genannte Zunahme der Festigkeit wird mit den folgenden Mechanismen erklärt:

1. *Erwärmungseffekt.* Die Reaktion des Ätzkalks mit dem Rotschlamm führt zur Entstehung von $\text{CaC}(\text{OH})_2$, was mit einer umfangreichen Emission exothermer Wärme verbunden ist. Die Folge dessen ist die Verdampfung des Wassers in den Zwischenräumen des Rotschlammes, was wiederum die Ursache für das Entstehen enormer Aushöhlungen ist (Bild 2). Der Verlust des Wassers erhöht damit die Festigkeit des Rotschlammabfalls. Die Verteilung der unterschiedlichen Porengrößen der Proben (infolge der unterschiedlichen Anteile an Ätzkalk) wurde ermittelt, indem man Quecksilber hineinpumpt (Tabelle 9). Der Überfluss an Hohlräumen erhöht die Permeabilität des Rotschlammes.

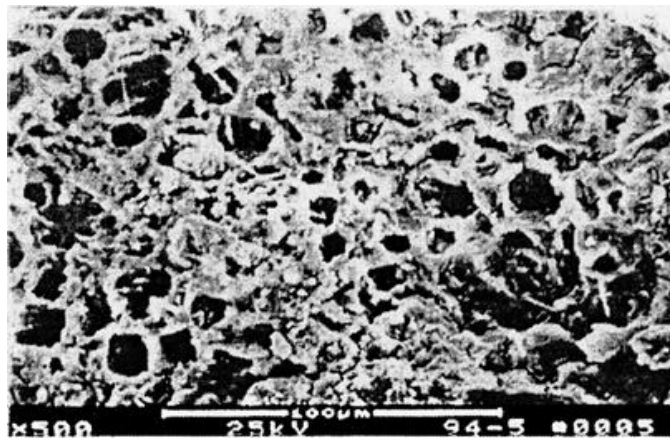


Bild 2: REM-Aufnahme von Rotschlamm mit einer 10%-igen Beimischung von Ätzkalk

Table 9. Measurement results of pore size distribution in red mud and consolidated red mud by quicklime

Sample number	Quicklime supplement	Bulk density	Skeleton density	Total volume of pores	Total area of pores	Median of pore size	Average of pore size	Distribution of pore size/ μm , %				
	(%)	(g ml^{-1})	(g ml^{-1})	(ml g^{-1})	($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	(μm)	(μm)	>200	200±20	20±2.0	2.0±0.2	<0.2
2050	0.0	1.134	2.269	0.441	6.747	0.691	0.262	3.40	7.93	20.40	40.80	27.47
2054	6.0	0.995	2.382	0.585	7.365	0.957	0.318	0.86	12.47	23.42	41.88	21.37
2053	10.0	1.014	2.456	0.579	12.057	0.537	0.192	2.59	21.57	12.95	25.02	37.87
2052	15.0	0.895	2.159	0.654	9.203	1.124	0.284	3.06	30.56	10.70	30.57	25.11
2051	20.0	1.056	2.298	0.512	13.770	0.191	0.149	0.98	2.92	10.74	34.16	51.20

2. *Entstehung und Zementierung der Karbonate.* Sekundärarcalcit und nadelförmige Aragonit-Kristalle, die durch die Reaktion des $\text{CaC}(\text{OH})_2$ (gebildet durch die zuvor angeführten Prozesse) mit Kohlendioxyd aus der Luft entstehen, erhöhen die strukturelle Festigkeit des Rotschlammes. Die Hinzufügung von mehr Ätzkalk führte zu einer stärkeren Zementierung.
3. *Entstehung und Zementierung der Mineralien der wasserhaltigen Aluminium-Kieselsäureverbindung.* Authigenic platy Mineralien der wasserhaltigen Aluminium-Kieselsäureverbindungen, die durch die Reaktion von $\text{CaC}(\text{OH})_2$ mit freien Oxiden wie SiO_2 und Al_2O_3 gebildet werden, führen zu einer irreversiblen Zementierung der Schlammabfälle.

4.5. Steuerung und Anwendung der Rotschlammabfälle

4.5.1. Verstärkungsgegenmaßnahmen für eine Rotschlammverdammung

Zurzeit werden die Rotschlammabfälle, die in der Welt produziert werden, entweder in das Meer entleert oder auf dem Land angehäuft. In China werden sie hauptsächlich in einer Rotschlammverdammung gelagert. Mit den schnell ansteigenden Mengen von Schlammabfällen, die von der Entwicklung der Aluminiumindustrie begleitet werden, können unvorhergesehene Unfälle auftreten. Um die Sicherheit der Verdammungen zu gewährleisten werden Gefahrkontrollen, zum Schutz der Umwelt die folgenden technischen Gegenmaßnahmen vorgeschlagen:

1. *Trockenlegung*. Das Wasser, das im frischen Rotschlamm zurückbehalten wird, ist eine porige Lösung der verschiedenen Salze wie Na_2CO_3 und Na_2SO_4 , die durch Rütteln und Unterdruck pumpen entfernt werden können, indem es von kapillarem Wasser in freies Wasser umgewandelt wird. Unterdessen kann die gepumpte Lösung aufbereitet werden.
2. *Festigung/Verdichtung durch die Trockenlegung*. Eine schnelle Verdichtung der Schlammverdammung ist elementar für deren Stabilität. Folglich ist es notwendig, Entwässerungsbrunnen zu bohren und eine Sandschicht als Entwässerungspuffer unter dem Abfall anzulegen, um die Entwässerung gewährleisten zu können. Der Abfall kann folglich um die Hälfte verfestigt/verdichtet werden.
3. *Verstärkung durch Trocknung*. Die Trocknung des Rotschlammes kann nicht nur eine Verkleinerung des Wassergehalts nach sich ziehen, der die Festigkeit des Abfalls erhöht, sondern auch die Umwandlung von Aragonit zu einer festen Kruste Calcit beschleunigen. Dadurch ist es am Besten, den Abfall im Reservoir in bestimmten Zeitabständen zu schichten, wobei in der regnerische Jahreszeit andere Zeitintervalle gelten. Diese Vorgehensweise liefert die bequemste Weise der Verstärkung, ohne Einbeziehung irgendeiner zusätzlichen Investition.

Anwendung des Rotschlammabfalls

Diese Art von zusammengesetztem Material bestand hauptsächlich aus sehr feinen Körnern Kalziumkarbonat, sowie einigen weiteren Arten von Mineralien. Rotschlamm hat ausgedehnte Aussichten der Anwendung, besonders nach dem Pumpen der Residuumlösung und dem Recycling.

1. Der Rückstand kann aufgrund seiner hohen Lagerstärke und -haltbarkeit im normalen Bereich zur Straßen-/Bahnkörperbettung anstelle von Kalkboden verwendet werden.
2. Aus Rotschlamm hergestellter Silikat-Zement (Binder) ist kräftig, Sulfat und Frost beständig und billig.

3. Aus Rotschlamm hergestelltes Silikat-Düngemittel ist besonders für sauren roten Boden, gelben Boden und Reisboden in Südchina verwendbar, weil es viele Spurenelemente enthält, darüber hinaus einen hohen Gehalt an Kalium und Phosphat aufweist.

4.6. Zusammenfassung

Frischer Rotschlamm ist eine Art weiches, loses, erdiges Material, das nicht erwünschte Technikeigenschaften wie hohen Wassergehalt aufweist, der für dessen Deformation und Verflüssigung verantwortlich ist. Dennoch kann die Festigkeit offensichtlich während einer langen Periode des Konservierens oder Trocknens erhöht werden. Wegen des spezifischen chemischen und mineralischen Aufbaus erfährt der Rotschlamm keine Schrumpfung oder Zerfall; der Grund hierfür liegt in der irreversiblen strukturellen Zementierung, die während des Alterns und des Trocknens gebildet wird. Durch Experimente konnte nachgewiesen werden, dass die Anwendung von Ätzkalk bei der Rotschlammverdichtung eine wirkungsvolle Methode darstellt. Außerdem kann die komplette Anwendung des Rotschlammes neue Wege zum Nutzen der Gesellschaft eröffnen, um ein schädliches in ein sicheres Material zu überführen.

Table 2. Gross analysis results of red mud wastes

Sample number	Sample type	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	H ₂ O	CO ₂	Total	CaCO ₃ (%)
1627	Original	16.40	2.50	6.84	6.91	0.73	33.07	1.67	0.17	3.00	3.05	26.58	100.92	60.35
1628	Original	14.10	2.50	6.94	6.78	0.66	33.59	1.29	0.17	3.25	3.42	27.81	100.51	63.17
1629	Original	12.80	2.75	7.74	6.54	0.82	34.16	1.11	0.19	3.00	3.48	27.01	99.60	61.35
1630	Original	12.43	2.25	7.40	7.04	0.66	34.11	1.15	0.17	3.00	3.27	28.14	99.62	63.92
1635	Original	13.70	2.25	7.51	6.97	0.59	34.37	1.52	0.15	1.42	3.38	26.35	99.11	59.85
1627-1	<2 µm	24.20	1.25	14.23	10.88	0.66	18.01	1.49	0.27	2.95	5.41	15.45	94.80	35.09
1628-1	<2 µm	21.10	1.50	15.36	10.46	0.44	20.05	1.30	0.27	3.07	5.10	17.03	95.58	38.68
1635-1	<2 µm	21.30	1.25	16.51	11.00	0.52	17.44	1.30	0.26	2.45	5.71	15.25	92.99	34.40
1627-2	>2 µm	16.30	2.50	6.83	6.60	0.66	33.59	1.49	0.16	1.35	2.58	27.44	99.50	62.33
1628-2	>2 µm	16.95	2.50	7.06	6.75	0.69	34.40	1.52	0.15	1.38	2.91	25.22	99.52	57.28
1635-2	>2 µm	15.00	2.25	7.17	6.91	0.62	34.52	1.67	0.15	1.42	2.94	26.92	99.57	61.15

Literatur

<http://link.springer-ny.com/link/service/journals/00254/contents/01/00399/s002540100399ch002.html>

am 06.08.2002.

<http://link.springer-ny.com/link/service/journals/00254/contents/01/00399/paper/s002540100399ch000.html>

am 06.08.2002.

<http://mineral.galleries.com/minerals/carbonat/aragonit/aragonit.htm>

am 14.08.2002.

<http://www.naturschau.at/mineralien/mineralien-4.html>

am 14.08.2002.

http://www.geo.tu-freiberg.de/~merkel/hgcss/hgcss_1/elemente/al/al.htm

am 14.08.2002.

<http://www.mineralogie.ch/db/mindat.asp?ID=4274&sort=mineral>

am 15.08.2002.

5. Herstellung von Baumaterial aus Rotschlamm in Jamaika

5.1. Einleitung

Parallel zu den Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten bezüglich Rotschlamm, den die in Jamaika ansässigen Bauxitminenbetreiber bzw. –weiterverarbeiter durchführten, wurden Organisationen des öffentlichen Rechts, wie beispielsweise das Jamaica Building Research Institute (BRI), auf diesem Gebiet tätig. In den achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts unternahm das Physics Department of the University of the West Indies (LJWI) eigene vorbereitende Untersuchungen an Rotschlamm mit den identischen Zielen, zumindest einer industriellen oder kommerziellen Anwendung dessen.

1986 gelang eine Allianz zwischen der jamaikanischen Regierung, repräsentiert durch das Jamaica Bauxite Institute (JBI), Sicherungsfonds des International Development Research Centre (IDRC) in Ottawa zur Unterzeichnung eines Forschungs- und Entwicklungsprojekts in Kooperation mit der University of Toronto (UT). Die Hauptziele waren die Methoden- bzw. Verfahrensentwicklung über die Verwendung von jamaikanischem Rotschlamm als Baustoff (JBI/IDRC red mud project).

Das Projekt lief von 1987 bis 1995 und beinhaltete zwei wesentliche Phasen auf dem Weg zur Produktentwicklung: Die erste Phase bildete die Herstellung von Ziegelsteinen, welche vollständig aus Rotschlamm bestanden, sowie deren anschließendes Tränken in Natriumsilikatlösung. Während der zweiten Phase folgte die Herstellung von red mud pozzolanic¹³ cement¹⁴, der zur Herstellung von Back-/Ziegel- und Hohlblocksteinen notwendig ist. 1998 wurde ein Musterhaus (Sportpavillon) der JBI errichtet, das Wände aus Silikat gebundenen Ziegelsteinen besitzt. Wie frühere Demonstrationsgebäude der BRI auch, die mit zementierten Rotschlammsteinen konstruiert wurden, folgt eine ständige Bewertung der Konstruktion.

¹³ Puzzolan bedeutet ursprünglich hydraulisches Bindemittel für Zement aus Puzzolan, einem aus Italien stammenden, vulkanischen Tuff.

¹⁴ In der deutschen Übersetzung steht cement für Bindemittel, Bindesubstanz, Zement und auch für Gips.

5.2. Vorbereitende Untersuchungen

Bereits vor der Unterzeichnung des Kooperationsvertrages charakterisierte Dr. Arun Wagh von der University of the West Indies den Rotschlamm aus hiesigen Lagerstätten. Diese Ergebnisse bildeten eine gesicherte Grundlage für das F&E-Projekt sowie einer von niedriger oder unbedeutender Wirkung auf die Umwelt gekennzeichneten erwarteten Entwicklung des verkäuflichen Produktes, trotz der Verwendung großer Mengen von Rotschlamm. Einige dieser ermutigenden Ergebnisse sind nachfolgend dargestellt:

- Jamaikanischer Rotschlamm beinhaltet ungefähr 1,5% Ätznatron.
- Der Rotschlamm aller Betriebe weist eine sehr feine Körnung auf; durchschnittlich sind 60 % der Partikel kleiner als 1 μm .
- Die feine Kornfraktion nützt bei der Herausbildung von regellosen großen Mengen von präzisen Flächen bei der Zusammenballung/Anhäufung (Pressen) oder dem Binden in beliebigen Formen.
- Primär setzt sich der Schlamm aus einer kristallinen Phase zusammen, besitzt darüber hinaus jedoch eine wichtige, erheblich geringere amorphe Phase, charakterisiert durch extrem feines oder puderförmiges Material, das zur Umhüllung der größeren Partikel neigt. So betrachtet stellt es in Verbindung mit einem externen Mittel Natriumsilikat (sodium silicate) ein ideales Medium für die Vorbereitung des Bindungsprozesses dar.
- Nahezu 50 % aller Schlämme bestehen aus Eisenoxid (Fe_2O_3), welche sicherstellt, dass eine Veränderung die tiefrote Färbung des Schlammes im Laufe der Zeit unwahrscheinlich erscheint.
- Ungefähr 15 % eines jeden Schlammes bestehen aus Aluminiumoxid, das im Bayer-Prozess nicht herausgelöst werden konnte. Ein großer Teil dessen weist eine amorphe Struktur auf.
- Wird der Rotschlamm von einer Raffinerie gepumpt, ermöglicht dies eine natürliche Trocknung; es entwickelt sich eine vergleichsweise hohe Kompressionskraft (Druck) in einer Größenordnung von 2,8MPa (N/mm^2).

Diese Faktoren sind aus verschiedenen Gründen bedeutend für die Entscheidung, beide Wege des Silikat (silicate) gebundenen als auch des pozzolanic cement weiter zu verfolgen.

5.3. Silikat (silicate) gebundene Back-/Ziegelsteine

Back-/Ziegelsteinherstellung

Laboruntersuchungen zwangen vor der Herstellung, getrockneten Rotschlamm aus dem Alcan-Trockengebiet mit naturbedingtem Material der Größe von 5cm bis 0,6cm zu einer feineren Fraktion zu zermahlen; es schien praktikabel, dies zu tun. Wie auch immer, es wurde vereinbart, für den Zeitraum der Anwendung von möglichen kommerziellen Unternehmungen könnte es in der Zukunft vorteilhaft sein, das Zerkleinern bei 40 Maschen zu begrenzen.

Der zermalmte Rotschlamm wurde ausschließlich mit Wasser gemischt, bevor dieser mit einer halbautomatischen Presse zu Back-/Ziegelsteinen geformt wurde. Das Pressen wurde beendet, nachdem sich ungefähr 18% w/w Wasser in dem trockenen Schlamm befanden. Nach dem Pressen konnten ungefähr 15% des Materials ohne die Notwendigkeit der Regulierung des Wasserniveaus aufbereitet werden; verursacht durch den Verlust infolge des Händelns. Jedoch erwies sich eine Periode von anfänglicher Zerbrechlichkeit der Steine im Allgemeinen als kurz, am nächsten Tag konnten diese Back-/Ziegelsteine leicht gehandelt und gestapelt werden. Die hergestellten Steine wiesen die Maße 20 cm x 10 cm x 10 cm auf. Nach einer dreitägigen Lufttrocknung konnte die Behandlung mit einer Kieselsäureverbindung (silicate solution) angewendet werden.

Parameter	Gemessene Daten
Mittlere Volumenporosität	37%
Druckfestigkeit	5 MPa (725 psi)
Effloreszenz (Ausschwitzung)	Geringfügig von der Null
Silikatabsorption	7% w/w
Auslaugen mit Wasser	pH > 10

Tabelle 1: Eigenschaften von Silikat gebundenen Back-/Ziegelsteinen
aus Rotschlamm

Anwendung der Natriumkieselsäureverbindungslösung (sodium silicate solution)

Natriumsilikat wird kommerziell in vielen Varianten abhängig von der Konzentration und Viskosität verkauft, jedoch in Jamaika nicht selbst produziert. Auf der Grundlage früheren Experimentierens wurde vereinbart, dass eine bestimmte Marke der niedrigviskosen Natriumkieselsäureverbindungslösung, bekannt als N-Kieselsäureverbindung, das Verwendbarste war und folglich aus den USA importiert wurde.

Die Kieselsäure-Anwendungstechnologie wurde in diesem Projekt wie folgt entwickelt: Die Natriumkieselsäureverbindungslösung (in 20%-iger Lösung/Verdünnung) wird bei jedem Stein angewendet, indem diese in einem offenen Ablagekorb in ein mit Kieselsäureverbindung gefülltes Bad getaucht wird, bis ungefähr 50% des Back-/Ziegelsteines in die Kieselsäureverbindungslösung eingetaucht ist. Nach etwa 10 Minuten werden die Steine aus dem Behälter genommen; die untere Hälfte ist nun ausreichend mit Silikat durchtränkt. Es folgt umgehend deren Wendung, damit die andere Hälfte in die Lösung eingetaucht werden kann.

Nach 20 Minuten sollte jeder Back-/Ziegelstein vollständig mit Kieselsäureverbindungslösung getränkt sein. In einem effizienten Prozess ist ein Arbeiter in der Lage, 40 Ziegelsteine in weniger als 15 Sekunden in das Bad einzutauchen; pro Arbeitsgang werden also 40 Steine behandelt. Im Anschluss an den Tränkvorgang wird jeder getränkte Stein für einen Tag auf einer ebenen Fläche platziert, wo sie einen Tag lang verbleiben. Nach dieser Zeitperiode können die Back-/Ziegelsteine so lange es notwendig ist, gestapelt werden. Nach drei Wochen Trockenzeit ohne Wasserbehandlung sind die Steine gebrauchsfertig. Es ist bemerkenswert, dass die Steine in den ersten zwei bis drei Wochen nach der Silikat-Behandlung wegen des Vorhandenseins der Kieselsäureverbindung etwas belichteter erscheinen; aber einmal vollständig trocken, sind keine unterscheidbaren Oberflächenmerkmale offensichtlich.

Ende der Phase I des Projekts

Nach dem Beginn des Projekts stellte die ausschließlich importierte und kreditfinanzierte Kieselsäureverbindungslösung im Vergleich zur Materialkostenbeschaffung des Rotschlammes, der Vorbereitungsarbeit, der Herstellung der Steine sowie einer realistischen Rate der Leihmiete der Presse, einen bedeutungslosen Kostenfaktor dar.

Innerhalb von drei Jahren der Projektdurchführung änderten sich die nackten Tatsachen, welche sich direkt auf die jamaikanische Wirtschaft bezogen erheblich. Die Berechnungen für mit Kieselsäureverbindung abgebundenen Back-/Ziegelsteinen aus Rotschlamm wurden als nicht mehr entwicklungsfähig angesehen, um direkt mit aus Beton hergestellten Baumaterialien zu konkurrieren.

Diese Kehrtwendung resultiert aus der Tatsache, dass der jamaikanische Dollar (J\$) um mehr als 300 Prozent abgewertet wurde. In weniger als zwei Jahren stiegen die Kosten für die importierte Kieselsäureverbindungs-lösung kontinuierlich an. Nach dieser Erkenntnis, wurden weitergehende Studien an diesem Material unterbrochen und ein neues Projekt initiiert, namentlich *the production of pozzolanic cement based on red mud*. Diese Phase des Projekts wurde teilweise durch die Alcan Jamaica Ltd. finanziert; der einzigen Gesellschaft, die zwei voneinander getrennte Aluminiumraffinerien auf der Insel betreibt.

5.4. Red mud pozzolanic cement

Dieses Projekt setzt im Wesentlichen auf den Kenntnissen auf, welche in der Zeit erworben wurden, als die Bauxite-/Aluminiumoxidindustrie in Japan einen pozzolanic cement aus Rotschlamm der dortigen Industrie entwickelte. Dies wurde weiterhin durch eine Reihe von Papieren untermauert, welche von Ko Ikeda, einem japanischen Forscher auf diesem Gebiet von der University of Yamaguchi, zur Verfügung gestellt wurden.

Das Wesentliche in diesem Projekt in die Verwendung von Gips und Kalziumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), auch Kalkhydrat oder gelöschter Kalk, (portlandite/hydrated lime) als Aktivator zum Ausbilden von zementartigem Verhalten des Rotschlammes, sowie der Verwendung von Flugasche zum Stabilisieren des Produkts. Das jamaikanische Projekt wurde so verfolgt, weil jamaikanische Schlämme wie japanischer Rotschlamm, Resttonerde in der Größenordnung von 15% besitzen. Zusätzlich sind die anderen Bestandteile, nämlich Gips und hydratisierter Kalk als Aktivator und Flugasche als Stabilisator, zu niedrigen Kosten in Jamaika vorhanden.

Bagasse-Asche

Bagasse Asche ist das jamaikanische Gegenstück von zeitgenössischer Flugasche. Dieses Material resultiert aus der Verbrennung von Bagasse (Zuckerrohrplantagen, von denen der Saft extrahiert wird) als Brennstoff der Zuckerindustrie. Bagasse ist reicher an Kieselsäure (SiO_2) (silica) als erwartet, weicht aber von den Erwartungen ab, nur weil es eine beträchtliche Menge organische Produkte enthält, die allerdings in keiner Weise seine Verwendungsfähigkeit im pozzolanic Binder beeinflussen. Ebenso wie beim Rotschlamm fällt jedes Jahr eine beträchtliche Menge von Bagasse als Abfall an, in diesem Fall von der heimischen Zuckerindustrie, welcher, wie sich zeigt, einer kommerziellen Weiterverwendung zugeführt werden kann. Zurzeit wird Bagasse zu Dumpingpreisen von den Zuckerrohrplantagen verkauft, wo die Asche angeblich den Zweck eines Düngers unterer Qualität erfüllt. Sprecher der Zuckerindustrie erwähnten die Klima- und andere dazugehörige Probleme, die eingeschränkt werden könnten, wenn sich alternative Wege gefunden werden könnten, sich der Asche zu entledigen.

5.5. Gips fines

Gips kommt in natürlicher Weise in Ostjamaika vor; es hat sich in den letzten 50 Jahren ein bedeutender Exportmarkt entwickelt. Dazu kommt, dass allein die Portland-Zementfabrik jährlich mehr als 100.000 Tonnen, die lokalen Produzenten von Gips eine analoge Menge umsetzen. Der unterschiedliche Export und die lokalen Märkte für Gips spezifizieren den Umfang des angeforderten Materials, wodurch die Gypsum Company genötigt wird, den Spezifikationen nachzukommen.

In allen Fällen verlangt der Markt nach Material gröber als 10mm (3/8“), was bedeutet, dass feinere Bestandteile separiert werden müssen. Dieser feine Gips ist bekannt als gypsum tailings oder Feingips, wofür bis heute keine Weiterverwendung gegeben ist. Dieser wertlose Feingips wurde in diesem Projekt verwendet und es wird erwartet, dass dieses Material unentgeltlich zur Verfügung gestellt wird, sobald sich kommerzielle Geschäftsbeziehungen ergeben haben.

Parameter	Durchschnittswert
Dicht (g/cc)	1,49
Porosität (Vol. %)	≈18,00
Druckfestigkeit (MPa)	5,17

Tabelle 2: Einige physikalische Eigenschaften von Red Mud Pozzolan Cement

Kalkbinder (Löschkalk – Ca(OH)_2)

Das in diesem Projekt verwendete Material ist ein Nebenprodukt der Acetylenherstellung¹⁵ von industriellen Produzenten. Kalkbinder ist eine Form von Löschkalk, der als Flüssigkeit produziert und in speziellen Lagerteichen verfügbar gemacht wird, welche nah an den Betrieben liegen. Ähnlich dem Feingips ist dieses Material ohne Kosten verfügbar. Für sich betrachtet, existieren in Jamaika weitere Binderquellen.

¹⁵ Nach DIN 1060 gehört der bei der Herstellung von Acetylen anfallende Kalk zur Gruppe der Luftkalke; Abfall als Kalziumkarbid, Karbidkalkteig, Karbidtrockenkalk.

5.6. Herstellungstechnologie für red mud pozzolanic cement

Die Materialzusätze für jamaikanischen Rotschlamm binder beinhalten 40-45% Rotschlamm, 35-40% Flugasche sowie einen geringeren Anteil an Kalkbinder und Feingips. Im Laufe des Projekts hat sich herausgestellt, dass die Bindephase im Bindemittel (cement) durch eine pozzolanic-Reaktion zwischen der Aluminiumoxidphase (Boehmite und Gibbsite), Kalk sowie dem zugesetzten Gips hervorgerufen wird und ein Bindematerial namens *Ettringite* zu Folge hat. Begasungs-Asche ist also bekannt für deren praktikable Verwendung in getrennten chemischen Reaktionen der Silikatverbindungsphase (silicate bonding), welcher hinzugefügt die Stärke des Binders hervorruft. Heute sind diese sekundären silikaten Reaktionen eine bekannte Größe, seit sie in der nichtkristallinen Phase vorkommen. Die Reaktionen können aber nicht mittels vorhandener Routineanalysetechnik, wie bspw. mit der Röntgenstrahlbeugung, ermittelt werden.

Bedeutsam für die Ausbildung von *Ettringite*, dem Hauptbindungsmechanismus, ist dessen Verbundenheit/Verknüpfung mit dieser Technologie. Zwar kommt dieser Prozess ebenfalls bei der Herstellung vom typischen Portland-Zement vor und zwar an dem Punkt, wo Gips hinzugefügt wird, allerdings prinzipiell gehemmt. In diesem speziellen Fall ist dies lediglich ein Sekundärprozess, der sich völlig von jenem unterscheidet, der bei der Herstellung von Rotschlamm bindemittel abläuft.

Mischen der Rohmaterialien und Herstellung von Rotschlamm bindemittel für Baumaterialien

Alle Materialbestandteile werden nach dem Wiegen trocken gemischt, später wird Wasser hinzugeben. Ähnlich wie im BRI-Projekt wurde eine Menge von 60 kg (Trockenmasse) praktischerweise mit Schaufeln auf einer betonierten Oberfläche gemischt. In den meisten Fällen ist es praktischer, den Kalkbinder in flüssiger Form zu beziehen. Dabei wird der Prozentsatz fester Anteile errechnet und ein entsprechendes spezifisches Volumen zur Bindermixtur hinzugegeben. Zum Abschluss wurde eine definierte Menge Wasser hinzugefügt und sehr gut gemischt, bevor es zu:

- Backsteinen gepresst oder
- zu Hohlblocksteinen geformt wird.

Im Gegensatz zu anderen aus Rotschlamm hergestellten Baumaterialien in Jamaika, ermöglicht der Binder die Herstellung von Hohlblocksteinen in gängigen Formaten. Die Rotschlammderivate können mit denselben Gerätschaften hergestellt werden, wie sie bei der Herstellung konventioneller Hohlblocksteine Verwendung finden. Für Backsteine wurden 17 % Wasser zugegeben, für Hohlblocksteine 29-31 % zur Herstellung einer Paste. In diesem Projekt wurden

Muster dieser Steine handgeformt, was die Normalität bei der Herstellung von Steinen im inoffiziellen Sektor darstellt.

Mittels Binder hergestellte Backsteine sind im Aussehen ähnlich zu anderen aus Rotschlamm hergestellten Steinen. In der Summe werden sie gut durch das Verfahren ausgehärtet, das verwendet wird, um mit Binder stabilisierte Back-/Ziegelsteine aus Rotschlamm auszuhärten (cement stabilized red mud bricks) (vgl. Tabelle 2).

Bezüglich der Pressen wurden die Cinva-Ram, die Bre-Pak und die Platbrood Semi-Automatic Press zur Verwendung von Back-/Ziegelsteinen aus Rotschlamm eingesetzt. Die Cinva-Ram ist vielleicht die älteste bekannte, manuell betätigte Presse, die im Zusammenhang mit stabilisierten Erd-/Bodenpresstechnologie (soil bricks) genannt wird. Verwendet wurde diese Pressenbauform in Jamaika erstmals um 1950, lange bevor ein koordiniertes Baumaterialentwicklungsprogramm in diesem Land gestartet wurde. Eingesetzt wurde die Presse für die Herstellung von Steinen mit den Maßen 10cm x 15cm x 30cm (4“ x 6“ x 12“) mit einem festgelegten Druck (Bild 1).



Bild 1: Hohlblockstein aus Red Mud Pozzolan Cement

Die Bre-Pak-Presse produziert Steine in den Dimensionen 29cm x 14cm x 8cm (11 ½“ x 5½“ x 3½“) und hat den erleichternden Vorteil eines ansteigenden Formdruckes bei der Verwendung eines angebrachten Hydraulikwagenhebers, nachdem der Anfangsdruck aufgebracht wurde. Ein Ergebnis bei der Herstellung von Rotschlammsteinen stellt ein Druck von rund 40 MPa (N/mm²) dar; größtenteils wurde der Verdichtungsdruck um 5 MPa überschritten. Das Problem mit dieser Maschine, wie das der Cinva-Ram-Maschine, ist das Fehlen jeder möglichen Form der Automatisierung, sodass deren Betrieb in einem produktiven Klima unpassend ist.

Die Platbrood Semi-Automatic wurde in Belgien hergestellt. Diese Pressenbauform ermöglicht die Herstellung von über 100 Steinen pro Stunde, welche von zwei Akteuren bedient wird, die darüber hinaus abmessen und mischen, bevor gepresst wird. Diese Maschine demonstrierte in diesem Projekt die Herstel-

lung von 720 Steinen an einem Acht-Stunden-Tag, wenn sie von zwei untrainierten und unerfahrenen Personen bedient wird. Bei jedem Pressvorgang werden zwei Steine in der Dimension 20cm x 10cm x 10cm (8" x 4" x 4") hergestellt. Der Pressdruck wird auf mehr als 27 MPa geschätzt. Diese Maschine besteht im Wesentlichen aus einem kompakten Dieselmotor mit einem einfachen Kupplungssystem, was das Pressen und Lösen der Steine erleichtert. Die Maschine wurde sowohl im BRI- als auch JBI-Projekt verwendet, mit der Folge, dass die Herstellung von einigen tausend Steinen zum Bau von zwei verschiedenen Demonstrationsgebäuden erleichtert wurde. Die Boshaftigkeit der staubigen Natur des trockenen Schlammes verbindet sich mit der relativ hohen alkalischen Wirkung bei der Steinherstellung aus Rotschlamm; die Maschine erfordert jedoch nur sehr wenig Wartung und Instandhaltung. Im Allgemeinen funktioniert es in den beiden jamaikanischen Projekten exzellent und ist damit empfehlenswert für andere Staaten, die möglicherweise in Zukunft ein kommerzielles Projekt von gebundenen Steinen aus Rotschlamm übernehmen möchten.

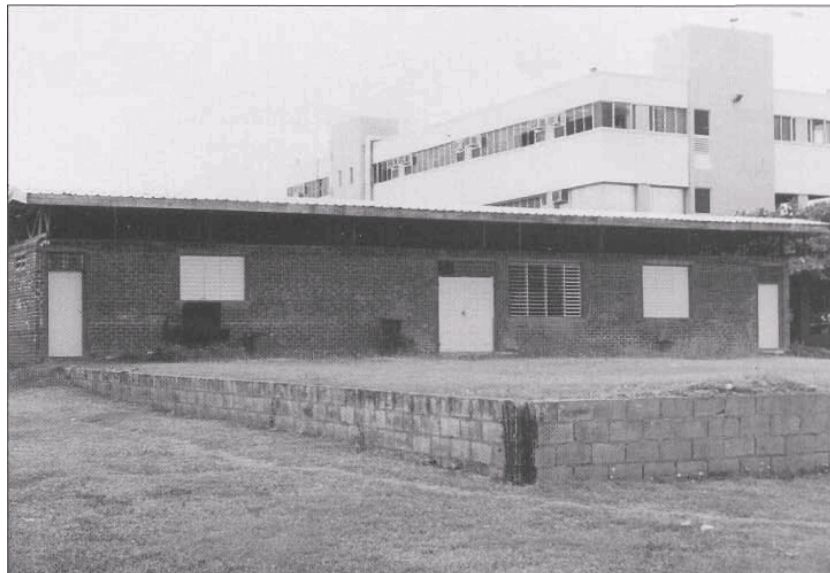


Bild 2.: Vorderansicht des Rotschlamm demonstrationsgebäudes
beim Jamaica Bauxite Institute (Sports Pavillon)

5.7. Mischen und Herstellung

In der Herstellung von Steinen aus Rotschlamm ist es wie bei der anderen Baumaterialien auch notwendig, Primärvorbereitungen zu den unterschiedlichen Bestandteilen der abschließenden Mischung zu treffen. Die Vorbereitung der einzelnen Komponenten als letztendliche Mischung erfolgt, bevor der Produktionsprozess der Steine begonnen werden kann. Der Rotschlamm erfordert Trocknung und Mahlen; der Flusssand erfordert Sieben, aber alle anderen Komponenten, Binder, benötigen keine spezielle Behandlungen, seit diese als raffinierte Produkte eingekauft werden.

Während des Projektes wurde entdeckt, dass es für die beiden Bediener der Presse vorteilhaft war, das Material in 60kg-Chargen (Trockenmasse) zu mischen, bevor es gepresst wird. Der im Mischprozess verwendete Rotschlamm, Sand, Binder wurden zunächst trocken mit der Schaufel vermischt, anschließend, während des Weiteren Mischens wurde Wasser hinzugegeben bis sich eine konsistente Mischung um 18% w/w eingestellt hatte. Besondere Sorgfalt musste angewendet werden, um das Klumpen zu vermeiden, was gegen das reibungslose Durchführen des Pressens spricht.



Bild 3: Nassmischen des Ausgangsmaterials vor dem Pressen

Nach dem Wiegen und Mischen der ersten neuen Charge von Rohmaterial und Wasser ist der Bediener mit den Mengen vertraut und verteilt anschließend die unterschiedlichen Bestandteile auf der Volumengrundlage, basierend auf seinen eigenen Erfahrungen. Im Allgemeinen sind die Werker zur Entwicklung einer bestimmten Beurteilung der korrekten Beschaffenheit des Mischmaterials fähig. Die davon abhängige Justage der Wassermenge ist notwendig, damit die über den Tag veränderten klimatischen Verhältnisse ausgeglichen werden. Aus einer 60kg-Mischung können normalerweise 28-30 Steine hergestellt werden; bezeichnend war für fast alle produzierten Steine mit einer festen Zusammenset-

zung aus 50% Rotschlamm, 43% Sand und 7% Binder, dass sie völlig unbeschädigt waren; es war sehr wenig Recycling notwendig. Dies war bei stabilisierten Erdback-/Ziegelsteinen (stabilized soil bricks) nicht der Fall, wo selbst bei den besten Erdsteinen etwa 15% während des Handlings zerfielen und recycelt wurden.

Nach dem Trocknen bekamen die Steine einen leuchtenderen Farbton und ähnelten Terracotta-Lehm/Tonziegeln in ihrem Äußeren, sodass ungeübte Blicke keinen Unterschied zwischen beiden Steinformen ausmachen würden. Trotz der relativen Feuchte unmittelbar nach dem Entformen, sind sie generell fest genug gebunden, um die Steine zweifach stapeln zu können; nach weiteren 12 Stunden dreifach. Beim Stapeln der Steine ist zu beachten, dass alle Flächen der Luft oder direktem Sonnenlicht ausgesetzt sind, um ein unsachgemäßes Trocknen zu vermeiden. Unter idealen Bedingungen kann ein vollständiges Trocknen innerhalb von drei Wochen erreicht werden.

Komplettiert wird die dreiwöchige Behandlung durch ein regelmäßiges Besprühen der Steine mit Wasser von mindestens 10 Tagen nach dem Pressen; idealer Weise jeden an Tag dieser Periode. Ein Gartenschlauch mit einem geeigneten Sprühkopf ist die beste Lösung für diesen Vorgang. Ist der Wasserdruck nicht besonders hoch, dürfte es empfehlenswert sein, die Steine mit Säcken, Fabrikmaterial oder sogar Zeitungspapier abzudecken, bevor der Wasserstrahl angewendet wird. Diese Maßnahme verhindert Pitting oder andere Formen der Oberflächenzerstörung, die infolge eines direkten Kontakts des Wasserstrahls auftreten können.

5.8. Testen der Steine

Das Jamaica Bureau of Standards (JBS) hatte vor vielen Jahren jamaikanische Standards für in Jamaika verwendete Baumaterialien entwickelt. Einer von diesen in letzter Zeit fertiggestellten Standards ist namentlich der Standard für Ton-/Lehmsteine, welcher wesentlich vom ASTM-Standard abgeleitet wurde. Einige dieser Parameter wurden mühelos von mit Binder stabilisierten Steinen aus Rotschlamm erreicht. Ein Hauptproblem betrifft jedoch die Druckfestigkeit. Interessierte Gruppen befürworten für die bestimmenden Autoritäten eine notwendige Forschung, um weiter nach etablierten jamaikanischen Standards zu verfahren, die nicht allein Steine aus Rotschlamm abdecken könnten, sondern auch stabilisierte Erdsteine. Es wird vermutet, dass die Ergebnisse auf mittlere und lange Sicht von Resultaten abhängen werden, die von existierenden Gebäuden aus eben diesen Materialien stammen. In vielen Staaten, in denen über stabilisierte Erdtechnologie (stabilized soil technology) nachgedacht wird, wird für die Druckfestigkeit ein Wert in der Spanne von 4-5,5 MPa als akzeptabel betrachtet.

Viele Wirtschaftsführer in der Bauindustrie des Landes betrachten dies als zufriedenstellend, aber es besteht die Notwendigkeit, dass die relevanten Regierungsstellen die Industriellen in Form eines Konsenses verbinden. Beim Testen

der Steine wurden mehrere Parameter erforscht, die wichtigsten von ihnen waren die Wasseraufnahmefähigkeit, Druckfestigkeit, Haltbarkeit (nass und trocken) sowie die Rechtwinkligkeit.

Einige der bemerkenswerten Eigenschaften von jamaikanischen zementstabilisierten Steinen aus Rotschlamm waren folgende:

- Massendichte: 1380 kg/m³
- Gewicht des Steines: 4 kg
- Wasseraufnahmevermögen: 18 % - 20 %
- Verlust infolge Abrieb: 0,78 %
- Druckfestigkeit: 4,7 MPa (690 psi)
- Abmaße der Steine: 20cm x 10cm x 10cm.

5.9. Errichtung von Demonstrationsgebäuden

Mehr als 6000 Binder stabilisierte Steine aus Rotschlamm wurden mit der halb-automatisierten Steinherstellungsmaschine produziert und über einen Zeitraum von einem Monat ausgehärtet, bevor die Errichtung des Demonstrationsgebäudes begann. Das Gebäude, welches zurzeit besteht, ist über 37 m² groß und verfügt über zwei Räume unterschiedlicher Größe. Der größere Raum verfügt über drei Metallluftschlitzfenster, die, wenn sie geöffnet werden, einen wirksamen Sonnenschutz zu jeder Tageszeit bieten, darüber hinaus eine enorme Belüftung sicherstellen. In dem zweiten Raum befinden sich kleine Metallluftschlitzfenster, die tagsüber eine künstliche Beleuchtung erfordern. Diese gegensätzlichen Merkmale in der Auslegung der Räume wurden absichtlich durchgeführt, um die verschiedenen Tests zu erleichtern, die für folgende Jahre geplant wurden.

Darüber hinaus wurde das Gebäude entworfen, um Mauerwerksblöcke (stone masonry blocks) und konkrete Draht-Oberteile/Schalen (funicular shells) unterzubringen, andere verhältnismäßig neue Baumaterialien, deren Baumaterialtechnologien kurz zuvor aus Indien transferiert wurden.

Während der Errichtung der Gebäude wurde das Streifenfundament bis zu einem Niveau von einem halben Meter über der Oberfläche mit Mauerwerksblöcke der Abmessungen von 15cm x 15cm x 30cm überlagert. Diese Bauform wurde gewählt, um zu verhindern, dass sich die zurzeit noch ungeprüften Steine aus Rotschlamm mit Wasser voll saugen, was möglicherweise infolge Überschwemmungen passieren könnte.

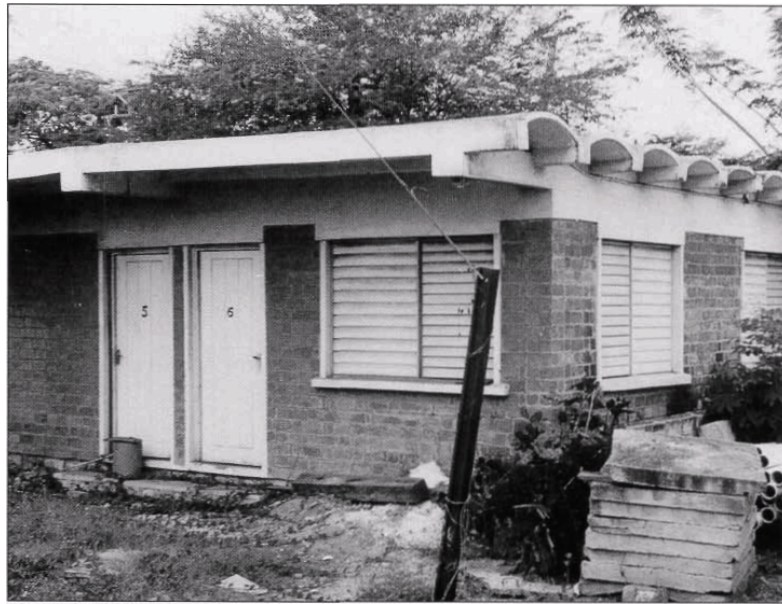


Bild 4: Das BRI-Rotschlamm-Demonstrationsgebäude (1998)

Die Wände des Demonstrationsgebäudes wurden aus stabilisierten Rotschlammsteinen errichtet, während Öffnungen, Stürze, Unterzüge und das Dach aus Beton hergestellt wurden; dies beinhaltete das erstmalige Verwenden von Draht-Oberteilen/Schalen (funicular shells) als Dachmaterial. Der Gebrauch der englischen Bindungsmethode des Back-/Ziegelsteinwandaufbaus erforderte keine Stahlverstärkung beim Aufbau der Wände; jedoch wurden normale Mengen in allen weiteren Bereichen verwendet, die keine Back-/Ziegelsteine einschlossen.

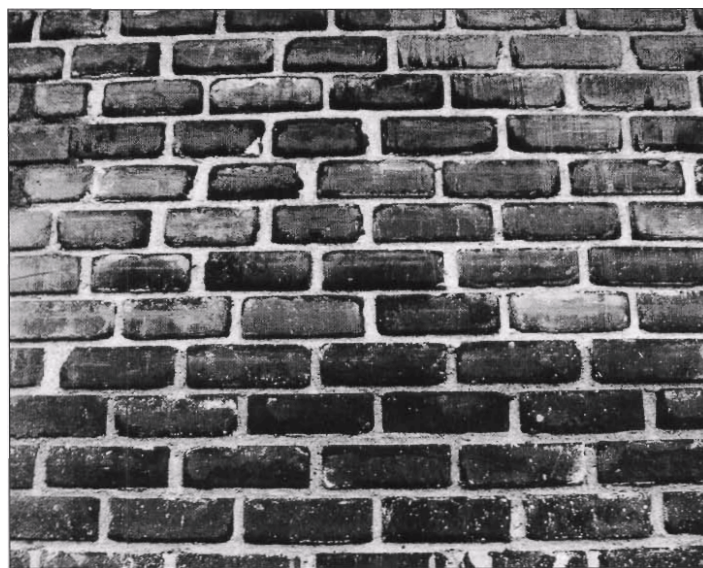


Bild 5: Großaufnahme vom Mauerwerk des BRI-Demonstrationsgebäudes

Sandgebundener Mörtel¹⁶ wurde aus ästhetischen Gründen beim Wandaufbau benutzt (Bild 5). Für die beiden Türen wurde Schnittholz verwendet. Im Inneren wurden Befestigungen angebracht, um den gesamten beabsichtigten Funktionen des Gebäudes entsprechen zu können. Die größere Seite des Gebäudes wurde als Darstellungsbereich für die BRI-Technologie beabsichtigt, weil der andere Teilbereich als Kantinenservice für Arbeiter der Labore und Werkstätten verwendet werden sollte.

Obgleich das Gebäude vollendet wurde, wird es bis heute nicht zum beabsichtigten Gebrauch verwendet; dies ist eine Konsequenz des Schließens des Institutes kurz nach der Fertigstellung. Die Regierung von Jamaika konnte für das Gebäude keine Verwendung finden, obgleich es eine der besseren Immobilien in Kingstons darstellt. Die Gesamtheit der Umstände liegt die Tatsache, was für Resultate bezüglich der Performance des Gebäudes erhalten werden – jetzt oder in unmittelbarer Zukunft – (ausgenommen Studien über Strahlung), die das Äußere des Gebäudes einschränken werden.

Über die Ergebnisse der Strahlungsstudien, die dieses Gebäude austrug, wird in der zweiten Fallstudie berichtet werden, die auf die Produktion der mit Kieselsäureverbindung abgebundenen Rotschlammback-/Ziegelsteinen und des pozzolanischen Rotschlammbinders in einem folgenden Projekt gerichtet ist; aufgenommen durch das Jamaica Bauxite Institute (JBI). Obgleich die Resultate vorläufig sind, scheinen andere Untersuchungen notwendig zu sein. Die vorliegenden Ergebnisse sind ermutigend in dem Maß, soweit geglaubt wird, dass Strahlung kein Faktor auf die Sicherheit im Zuge eines rationalen Gebrauchs von Baumaterialien aus Rotschlamm in Jamaika darstellt.

5.10. Schluss

Nach 11 Jahren des Bestehens – von 1987 bis 1998 – lassen sich die hauptsächlich aus Binder stabilisierten Rotschlammsteinen errichteten Demonstrationsgebäude in Kingston, Jamaika, wie folgt charakterisieren:

- gute Witterungsbeständigkeit der Rotschlammback-/Ziegelsteine, ohne Zeichen der Ermüdung oder des Abblätterns infolge Wassersättigung;
- gute Bindung der Steine und des Bindermörtels (cement mortar);
- hohe Widerstandsfähigkeit gegen das Wachstum von Fungus und anderen Formen von Mikroorganismen;
- kein Nachlassen der anfänglichen roten Farbe;
- kein Reißen, was Stahlarmierungen in den Wänden erfordern würde.

¹⁶ Jeder Mörtel besteht aus einem Bindemittel (Kalk, Zement, Gips, usw.), Zuschlagstoff (Sande usw.) und Anmachwasser.

Diese Ergebnisse wurden ungeachtet der Tatsache erlangt, dass in der Periode 1990-1993 eine Anzahl von Erdbeben mittlerer Intensität mit beträchtlichen Nachbeben Jamaika erschütterte.

Zusätzlich wird international zur Kenntnis genommen, dass Bauxite und Rotschlamm eine über das normale Niveau hinausgehende Strahlung aufweisen. In der frühen Projektphase waren die Forscher über die Sicherheit der Steine aus Rotschlamm besorgt. Aber nach durchgeführten Studien an der University of Toronto entdeckten sie, dass sich die Strahlungsemission infolge der Natriumsilikat-(sodium silicate)-Behandlung um 30% reduzierte. In den Gebäuden über einen Zeitraum durchgeführte Untersuchungen gaben bald die Gewissheit, dass es keine übermäßige Gefahr durch die Strahlenbelastung gibt, wenn solch ein Gebäude dauerhaft als Wohnung genutzt wird.

Neben den obig dargestellten technischen Eigenschaften bietet die Verwendung von Bauxiten und weiterem Abfall zur Herstellung von Ziegel-/Backsteinen und Blöcken nach der Aussage des Jamaica Bauxite Institute und der University of the West Indies viele potentielle Vorteile:

- das Ausgangsmaterial (Bauxite und andere Binder) sind in Jamaika reichlich vorhanden;
- diese benötigen wenig Energie;
- Förderung der lokalen Forschung sowie der Entwicklung von Fertig- bzw. Fähigkeiten;
- die Herstellung ist im Vergleich zu der traditioneller Back-/ Ziegelsteine erheblich preisgünstiger;
- die Abhängigkeit von Importen wie bspw. Stahl und Öl wird verringert;
- es besteht ein geringer Bedarf an Sand und Binder (cement).

Literatur

Bauxite Waste Building Materials.

http://www.idrc.ca/Nayudamma/redmud_54e.html
am 05.08.2002.

GLENNVILLE, JOHN I., WINNIPEG, P. ENG.: *Bauxite Waste Bricks (Jamaica) - Evaluation Report*. International Development Research Centre (IDRC). IDRC File 3-P-86-1039. Ottawa, 1991.

MCLEOD, DAVE W.: *Production of red mud building materials in Jamaica*. In: Wall Building Case Study. The building advisory service and information

network (basin). Published by: German Appropriate Technology Exchange (gate). Eschborn, 1998.

NEWTON, PETER: *Making Bricks with Red Mud in Jamaica*.

<http://www.idrc.ca/books/reports/V212/redmud.html>

am 16.08.2000.

<http://www.b-i-m.de/lexikon/inhalt/zement.htm>

am 30.08.2000.

<http://dict.leo.org/>

am 30.08.2000.

6. Anwendungen von Rotschlamm für Baumaterialien in der Bundesrepublik Deutschland

6.1. Verwertung von Steinkohlewaschbergen und Rotschlamm zur Herstellung von Blähtongranulat

6.1.1. Konventionelles Blähtongranulat

Blähtongranulat ist ein poröses keramisches Produkt, welches sich für die Verwendung im Bauwesen anbietet. In Tabelle 1 sind die positiven bautechnischen Eigenschaften dargestellt.

Einsatzgebiete	Vorteile gegenüber anderen Baustoffen
Zuschlag im Beton	Bauteilgewichtsreduzierung (30-40 Masse-%)
	geringes Transportgewicht von Fertigteilen
	gute Wärme- und Schalldämmfähigkeit
lose Schüttung (Isolier-/ Ausgleichsschicht)	günstiger Formfüllungsgrad
	geringe Schüttdichte
	gute Wärme- und Schalldämmfähigkeit
Gartenbau (Dachbegrünung/ Hydrokultur)	hohe Frost- und Feuerbeständigkeit
	in Grenzen steuerbare Wasseraufnahme
	geringe Schüttdichte

Tabelle 1: Einsatzgebiete und Eigenschaften von Blähtongranulat

Konventioneller Blähton ist ein anorganischer Stoff, der aus Tonperlen hergestellt wird. Die Herstellung gliedert sich in die Phasen Aufbereitung, Formgebung und Brand. Bei einem Brennvorgang von ca. 1200°C werden Tonkügelchen aufgebläht, die anschließend Luftporen aufweisen und gleichzeitig eine in sich abgeschlossene, druckfeste Oberfläche entwickeln. Die Verbrennungsgase werden auf diesem Weg in den Kern eingeschlossen und können nicht entweichen. Meist wird Blähton als Dämmstoff eingesetzt, der in Form von Schüttungen zum Wärme- und Feuchtigkeitsschutz und als Trittschallverbesserung dient. Allerdings verfügt er über keine sehr hohe Wärmedämmfähigkeit und bedarf eines relativ hohen Energieaufwandes bei der Herstellung (425 kWh/m³).

Je nach Anwendungsgebiet werden bei dem Herstellungsprozess die Größe, Porosität, Druckfestigkeit und das Gewicht der Blähtonperlen exakt gesteuert.

Die Kügelchen werden mit Wasser und Zement gebunden und zu Mauersteinen oder massiven Elementen (Blähton-Leichtbeton) geformt.

Eine Wiederverwendung des Blähtons ist möglich, seine Deponierung unproblematisch.

6.1.2. Blähtongranulat aus industriellen Reststoffen

Zur Herstellung von Blähtongranulat aus industriellen Reststoffen wird neben Rotschlamm sogenanntes Bergematerial verwendet. Hierbei handelt es sich um bei der Kohleförderung mit gefördertes Nebengestein. Dabei entspricht der mengenmäßige Anteil in etwa der im gleichen Zeitraum geförderten Steinkohlemenge. Derzeit (1999) werden nur etwa 30 Masse-% des in Deutschland anfallenden Bergematerials wirtschaftlich genutzt. Bergematerial genügt weitgehend den mineralogischen und chemischen Erfordernissen eines Blähtongranulat-Rohstoffes.

6.1.3. Methoden und Vorversuche

Bergematerial ohne Zusätze ist aufgrund seiner hohen Schmelztemperatur für die Blähtongranulatherstellung nicht geeignet. Durch Zugabe von Rotschlamm kann das Viskositätsverhalten jedoch entscheidend beeinflusst werden. Darüber hinaus muss ein Blähtongranulatrohstoff über das notwendige Potential gasbildender Stoffe verfügen. Nur ein hoher Temperaturgradient von >80 K/min während des Aufheizens führt zum Blähen. Unter diesen Voraussetzungen tritt der notwendige Temperaturgradient innerhalb der Probe auf, der eine zähfließende Probenoberfläche bei gleichzeitiger Gasbildung im Probeninneren ermöglicht.

Bei den Untersuchungen im Gradientenofen – der die erforderlichen Temperaturgradienten ermöglicht – kamen unter dem Gesichtspunkt der guten Reproduzierbarkeit zunächst Trockenpresslinge der verschiedenen Mischungen aus <90 μm aufbereitetem Pulver zum Einsatz, die mit Pressdrücken von 45 MPa hergestellt worden waren. Um dem industriellen Brennprozess möglichst nahe zu kommen, wurden neben statischen Bränden auch Brände in rotierenden Probenkammern durchgeführt.

In Bezug auf den maximalen Kohlenstoffgehalt von <5 Massen-% konnte die Literatur bestätigt werden. Da das Bergematerial im Ausgangszustand einen höheren mittleren Kohlenstoffgehalt aufweist, musste die kohlenstoffreichere feinere Fraktion mit Korngrößen $<12,5$ mm abgetrennt werden.

Bestandteil	Anteil (Masse-%)
SiO ₂	58
Al ₂ O ₃	26
Fe ₂ O ₃	6
K ₂ O	6
TiO ₂	1
MgO	1
Na ₂ O	1
P ₂ O ₅	0,2
MnO,Cl,SO ₃	< 0,15
CaO,ZnO,PbO	0,05
GV _{1000°C}	14
C _{org}	5
CO ₂	2

Tabelle 2: Typische chem. Zusammensetzung (geglüht) eines Steinkohlenbergematerials (Ruhr)

Bestandteil	Anteil (Masse-%)
Fe ₂ O ₃	26-34
Al ₂ O ₃	21-25
SiO ₂	13-19
TiO ₂	12-14
Na ₂ O	11-12
CaO	2-5
SO ₃	0,1-0,7
P ₂ O ₅	0,2-0,5
MnO	0,1-0,5
GV _{950°C}	7-10

Tabelle 3: Zusammensetzung (Bandbreite) von Rotschlamm (geglüht)

6.1.4. Viskositätsverhalten (Erhitzungsmikroskop)

Diagramm 1 zeigt die Auswirkungen verschiedener Rotschlammzugaben auf die Lage der charakteristischen Punkte Erweichungs-, Halbkugel- und Fließtemperatur (vgl. DIN 51729). Gegenüber reinem Bergematerial (0% Rotschlammzusatz) senkt der zugesetzte Rotschlamm die charakteristischen Temperaturen um bis zu 220 K.

Dabei ist zu beobachten, dass mit Rotschlammgehalten oberhalb 50 Masse-% die Erweichungstemperatur wieder leicht steigt, aber die Halbkugel- und Fließtemperatur weiter sinkt, sodass das Intervall zwischen Erweichungs- und Fließtemperatur kleiner und damit das Verarbeitungsintervall kürzer, also ungünstiger für die Prozessführung wird. Weiterhin nimmt mit steigenden Rotschlammgehalten die Dichte der Mischung aufgrund der höheren Dichte des Rotschlammes zu, was für ein Leichtprodukt unerwünscht ist.

Ein Rotschlammgehalt von zwischen 20 und 40 Massen-% bewirkt eine Erniedrigung der Fließtemperatur um 150-200 K (vgl. Diagramm 1). Als maßgebliche Ursache der Viskositätserniedrigung ist das Natriumoxid des Rotschlammes anzusehen, wobei sich auch das Eisenoxid günstig auf das Viskositätsverhalten auswirkt.

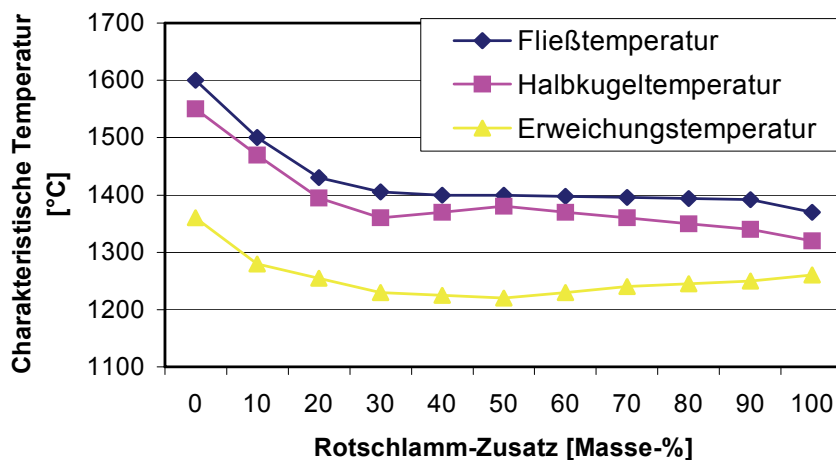


Diagramm 1: Charakteristische Temperaturen (Erhitzungsmikroskop)

6.1.5. Blähverhalten (Gradientenofen)

Bei niedrigen Brenntemperaturen zeigen die verschiedenen Mischungen kaum Unterschiede. Erst ab ca. 1050°C wirken sich die verschiedenen Rotschlammgehalte signifikant auf die Rohdichte nach dem Brand aus. Die aus 75 Masse-% Bergematerial und 25 Masse-% Rotschlamm hergestellten Proben weisen ein besonderes Verhalten auf. Mit steigender Brenntemperatur nimmt die Rohdichte durch die Versinterung zu, wobei die Mischung mit 25 Masse-% Rotschlamm (25%-Mischung) dieses Verhalten als erstes zeigt. Bei 1120°C stellt sich ein Rohdichtemaximum ein, das von den anderen Mischungen nur teilweise bzw. erst bei höheren Temperaturen erreicht wird. Bei weiterer Temperatursteigerung (>1130°C) sinkt durch das Aufblähen der Probe die Rohdichte der 25%-Mischung schon, während die anderen Mischungen zunächst eine noch weiter zunehmende Rohdichte aufweisen. Dieses um ca. 20 K „vorlaufende“ Verhalten ist während des gesamten Blähvorgangs (untersucht bis 1250°C) zu beobachten. Aufgrund des besonders günstigen Verhaltens wurden die verfahrenstechnischen Einflüsse bei der Blähtongranulatherstellung aus industriellen Reststoffen der 25%-Mischung untersucht.

6.1.6. Verfahrenstechnische Einflussgrößen

Kornverteilung der Ausgangsmischung

Es konnte beobachtet werden, dass eine bestimmte Feinheit der Ausgangsmischung besonders günstig für das Blähverhalten war. Sowohl bei einem gröberen als auch bei einem feineren Kornband nahm die Blähfähigkeit deutlich ab.

Formgebung

Die Formgebung hat einen großen Einfluss auf die erreichbare Produktrohdsichte. Bei den trockenverpressten Probekörpern traten teilweise Druckkegel, d. h. eine formgebungsbedingte Gefügeschwächung auf, an deren Verlauf die Proben bevorzugt platzten. Daher ist bei Trockenpresslingen nur ein langsames Aufheizen möglich. Trockenverpresstes Material hat in der Praxis der Blähtongranulatherstellung keine Bedeutung. Demgegenüber ermöglichen feuchte Formgebungsverfahren höhere Aufheizgradienten und somit geringere Produktrohdsichten. Aus der Literatur ist bekannt, dass Grünkörper mit hoher Rohdichte zu Brennprodukten mit geringerer Rohdichte führen.

Brennatmosphäre

Weiterhin kann die Rohdichte durch die Brennatmosphäre beeinflusst werden. So bewirkt eine reduzierende Atmosphäre eine Verringerung der Schmelztemperatur und eine Steigerung der Gasbildung. Eine CO₂-Atmosphäre führt zur Blasenbildung. Die Bereiche der Probekörperoberfläche, in denen es zur Blasenbil-

ung kam, weisen nur geringe Festigkeiten auf, was zu insgesamt geringeren Festigkeitswerten der reduzierend gebrannten Probekörper führt.

Auch bei oxidierender Atmosphäre stellt sich bei höheren Temperaturen im Inneren der Probe eine reduzierende Atmosphäre ein, da durch die Ausdehnung der Gase ein nach außen gerichtetes Druckgefälle vorliegt, sodass der angebotene Sauerstoff das Probeninnere nicht erreicht. Eine O₂-Atmosphäre wirkt sich demnach bei hohen Aufheizgradienten hauptsächlich auf die äußere Schicht aus.

Oxidierend gebrannte Produkte weisen zwar etwas höhere Rohdichten auf, zeigen aber aufgrund der Vermeidung von Blasenbildung an der Oberfläche höhere Festigkeiten im Vergleich zu Brennprodukten gleicher Rohdichte aus reduzierender Atmosphäre.

Ein Zusammenhang wurde – wie zu erwarten war – zwischen Rohdichte und Einzelkorndruckfestigkeit beobachtet. Brennprodukte mit einer Rohdichte von etwa 2,5 g/cm³ führten zu maximalen Festigkeiten von >22 MPa, die dann mit sinkender Rohdichte geringer wurden.

Je nach Einsatzgebiet muss demnach abgeschätzt werden, ob das Produkt besonders geringe Rohdichten oder höhere Festigkeiten aufweisen soll. Beides lässt sich durch Anpassung der Herstellungsparameter gezielt einstellen.

6.1.7. Zusammenfassung

Das Ziel der dargestellten Versuchsreihe war es, mit möglichst geringem Aufbereitungsaufwand und bei niedriger Brenntemperatur aus den Reststoffen Steinkohlenbergematerial und Rotschlamm ein Blähtongranulat herzustellen. Hierzu wurden die Einflüsse von chemisch-mineralogischen, aufbereitungs- und brenntechnischen Parametern systematisch untersucht.

Es konnte aus extrudierten Probekörpern einer Mischung von 75 Masse-% Bergematerial und 25 Masse-% Rotschlamm bei einer Brenntemperatur von ca. 1160°C in oxidierender Atmosphäre im Labormaßstab ein Blähtongranulat mit einer Dichte von <0,7 g/cm³ hergestellt werden. Dieses Produkt ist bezüglich Festigkeit, Gesamtporosität, Auslaugungsverhalten sowie in Form, Farbe und Gefüge sehr gut mit handelsüblichem Blähtongranulat vergleichbar.

Weiterhin besteht die Möglichkeit, durch gezielte Variation der verknüpften Herstellungsparameter die Produkteigenschaften in weiten Grenzen zu steuern und somit die Reststoffe Bergematerial und Rotschlamm für die Verwertung eines Baustoffs zu verwerten.

Literatur

LEISMANN, A.: Verwertung von Steinkohlenwaschbergen und Rotschlamm zur Herstellung von Blähtongranulat. In: *Keramische Zeitschrift*, 51 (1) 1999, S. 26-31.

http://www.h-u-w.de/_bauen/02/b0204.htm
am 24.10.2002.

<http://www.umweltlexikon-online.de/fp/archiv/RUBwerkstoff-material-substanz/Blähton.php>
am 24.10.2002.

6.2 Erfahrungen über den Einsatz von Rotschlamm bei der Herstellung von grobkeramischen Erzeugnissen

Das wesentliche Hemmnis bei der Weiterverarbeitung von Rotschlamm stellte bisher dessen hoher Feuchtigkeitsgehalt von 70% dar, der sich infolge der Trennung aus der Aluminatlauge im Gegenstrom-Dekantationsverfahren in Eindickern einstellte. Durch den Einsatz von Vakuumtrommeldrehfiltern gelang es, die Restfeuchte des Rotschlammes auf 40 bis 50% zu reduzieren. Nunmehr weist der Rotschlamm eine pastöse, tonartige Konsistenz auf, die vergleichbar mit den tonartigen Rohstoffen ist. Die Weiterverarbeitung des Residuums zu Ziegelsteinen scheiterte zunächst an den löslichen Natriumverbindungen, da diese zu Ausblühungen an den hergestellten keramischen Erzeugnissen führten. Auch der immer noch relativ hohe Feuchtigkeitsgehalt beeinträchtigte die Verformbarkeit der Rohmassen.

Als Ergebnis der ersten Bemühungen resultierte nur eine Verwendung des Rotschlammes als färbender Zusatz zu keramischen Massen in kleineren Mengen. Dieser quantitativ geringe Zusatz entlastete natürlich nicht die Tonerdeindustrie von dem drückenden Mengen- und Umweltproblem. Trotz der anfänglichen Misserfolge gelang es nach jahrelangen Versuchsarbeiten, einerseits geeignete Zusätze zur chemischen Bindung der im Rotschlamm enthaltenen Natriumverbindungen zu finden, andererseits auch den relativ hohen Feuchtigkeitsgehalt des Rotschlammes so zu reduzieren, dass eine einwandfreie Verformung zu Ziegelsteinrohlingen gewährleistet war.

Nach diesen Erkenntnissen wurden in einer mehrjährigen Versuchsproduktion in einer kleinen Ziegelei in der Nähe eines Tonerdewerkes Ziegelsteine in 1/1-, 1 1/2- und 2 1/4-fachem Normalformat (24 x 11,5 x 11,5 cm) hergestellt, die

der handelsüblichen Ware aus den üblichen Rohstoffen in den physikalischen Eigenschaften voll entsprachen. Die Steine zeigten keine Ausblühungen und erreichten mit einem Scherbengewicht von $1,7 \text{ kg/dm}^3$ Druckfestigkeiten von über 500 kg/cm^2 . Damit übertrafen die aus Rotschlamm hergestellten Steine die höchste Güteklasse, die nach DIN 105 gefordert wird.

Die nach diesem Verfahren hergestellten Ziegelsteine wurden röntgenographisch auf ihre Phasenzusammensetzung untersucht; das Ergebnis ist in Tabelle 1 wiedergegeben.

Phase	Gewichts-%
Nephelin ¹⁷ : $\text{KNa}_3[\text{AlSiO}_4]_4$	23 - 30
Glas bestehend aus Nephelin + Anorthit ¹⁸ im Mengenverhältnis von ca. 1:1	26 - 34
Eisentitanat: Fe_2TiO	13 - 16
Hämatit: Fe_2O_3	11 - 13
Quarz: SiO_2	2 - 7
Rutil: TiO_2	2 - 3

Tabelle 1: Phasenzusammensetzung der Ziegelsteine

Auch die chemische Analyse ergab, dass der in der Norm festgelegt Na_2O -Grenzwert unterschritten wurde.

Die Entwicklung der Bautechnik in den letzten Jahren tendierte, vor allem im Hinblick auf die gestiegenen Lohnkosten und wegen der durch die Ölkrise auf dem Energiemarkt eingetretenen Situation, besonders zu dem Einsatz leichter, wärmedämmender und großformatiger Bauteile. Davon wurde die Ziegelindustrie getroffen, deren kleinformatische, schwere, konventionelle Ziegelsteine erheblich an Marktanteil verloren. Um diese Entwicklung abzubremesen, entschloss sich eine Reihe von Ziegeleien, einen großformatigen, porosierten Ziegelstein auf den Markt zu bringen, der durch Zusatz von vorgeschäumtem Polystyrol zur Ziegelrohmasse vor der Verformung hergestellt werden konnte. Bei Einsatz von Rotschlamm als Ziegelrohstoff zeigte sich überraschenderweise jedoch bald, dass dieses Porosierungsmittel nicht verwendet werden konnte, da sich damit das für einen Leichtbauziegel erforderliche Scherbengewicht nicht erreichen ließ.

Ein Verfahren, bei dem Rotschlamm in Verbindung mit Ton und Flugasche oder Waschberge zu geblähten Granalien aufgearbeitet wird, verläuft erfolgreich

¹⁷ Nephelin: gesteinsbildendes Mineral in kieselsäurearmen Gesteinen, häufigster Feldspatvertreter in Si-untersättigten Magmatiten; z. T. deutliche Abweichungen von der Idealzusammensetzung.

¹⁸ Anorthit: Die Erdalkali-Feldspäte $\text{M}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$ sind für $\text{M} = \text{Ca}, \text{Sr}$ und Ba bekannt. Für alle drei Erdalkalimetalle sind daneben auch andere Strukturen stabil. Die wichtigste Verbindung ist der Calciumfeldspat Anorthit ($\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$), der mit $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ die lückenlose Mischkristallreihe der Plagioklasse bildet.

und wird für die Herstellung von Leichtbeton verwendet. Der Rotschlammanteil beträgt hierbei jedoch nur 10 bis 40%, bezogen auf Trockenmischung.

Eine neue Entwicklung bei der Leichtziegelherstellung unter Zusatz von Rotschlamm wurde durch Anwendung neuer Porosierungsmittel eingeleitet, die zu guten Ergebnissen führte. Der entscheidende Durchbruch gelang durch die Verwendung von Porosierungsmitteln, die in der Lage waren, einen Teil des im Rotschlamm enthaltenen Wassers vorübergehend zu binden, und die damit gleichzeitig die Verformbarkeit der Rohmasse verbesserten.

Bewährt haben sich eine Reihe von anorganischen, aber insbesondere organische Abfallstoffe, die zudem noch besonders preiswert zur Verfügung stehen und die daneben als zusätzliche Energieträger beim späteren Brennprozess wirksam sind. Es hat sich dabei als vorteilhaft herausgestellt, organische Porosierungsmittel in feinteiliger Form homogen in die Rohmasse einzubringen, da hierdurch eine sehr gleichmäßige, feinporige Struktur im gesamten Scherben erreicht wird.

Nachdem dieses Verfahren in einer kleinen Ziegelei mit Erfolg erprobt worden war und nahezu 9 Mio. Ziegelsteine, gerechnet als NF-Ziegelsteine, dem Baumarkt zugeführt worden waren, entschloss sich eine andere Ziegelei, diese Methode zu übernehmen und großformatigere Ziegelsteine herzustellen. Nach einigen anfänglichen Schwierigkeiten gelang es, dort das Verfahren großtechnisch zu realisieren, welches gemäß Abbildung 1 arbeitet.

Der am Vakuumtrommeldrehfilter im Tonerdewerk mit einer Filterfeuchte von etwa 40% anhaftendem Wasser anfallende Rotschlamm wird über eine Förderschnecke einem völlig dichten Rotschlammstraßentransporter zugeführt. Darin wird der Rotschlamm von der Anfallstelle im Tonerdewerk bis zur etwa 30 km entfernten Verarbeitungsstelle im Ziegelwerk transportiert. Dort wird der Rotschlamm in einen Vorratsbehälter entleert und über eine automatische Dosieranlage einem Zwangsmischer zugeführt. Gleichzeitig wird aus zwei weiteren Vorratssilos ein das Wasser bindendes Konditionierungsmittel in den notwendigen Mengenverhältnissen, halbautomatisch gesteuert, zugeführt. Nach erfolgter Homogenisierung der drei Komponenten wird die so behandelte Rotschlammvormischung auf ein Zwischenlager gebracht. Hierdurch wird gewährleistet, dass die zugesetzten Stoffe dem Rotschlamm die größtmögliche Menge des anhaftenden Wassers entziehen können und die Rotschlammvormischung in der gewünschten Weise versteift und pastifiziert wird. Nach etwa 24-stündiger Lagerzeit erhält die Rotschlammvormischung eine krümelige, erdfeuchte Struktur und kann dann wie ein normaler Ziegelrohstoff in die in der Ziegelei vorhandenen Produktionsapparaturen zusammen mit den anderen Ton- oder Lehmrohstoffen eingeschleust werden. Zur Dosierung können bspw. die üblichen Kastenbeschicker verwendet werden, wobei – abhängig von der Feuchte des Tonrohstoffs – auch ein Teil frisch behandelter Rotschlammvormischung zugesetzt werden kann. Nach diesem Verfahren kann die zugesetzte Rotschlammmenge in der Fertigrohstoffmischung bis zu 70% betragen.

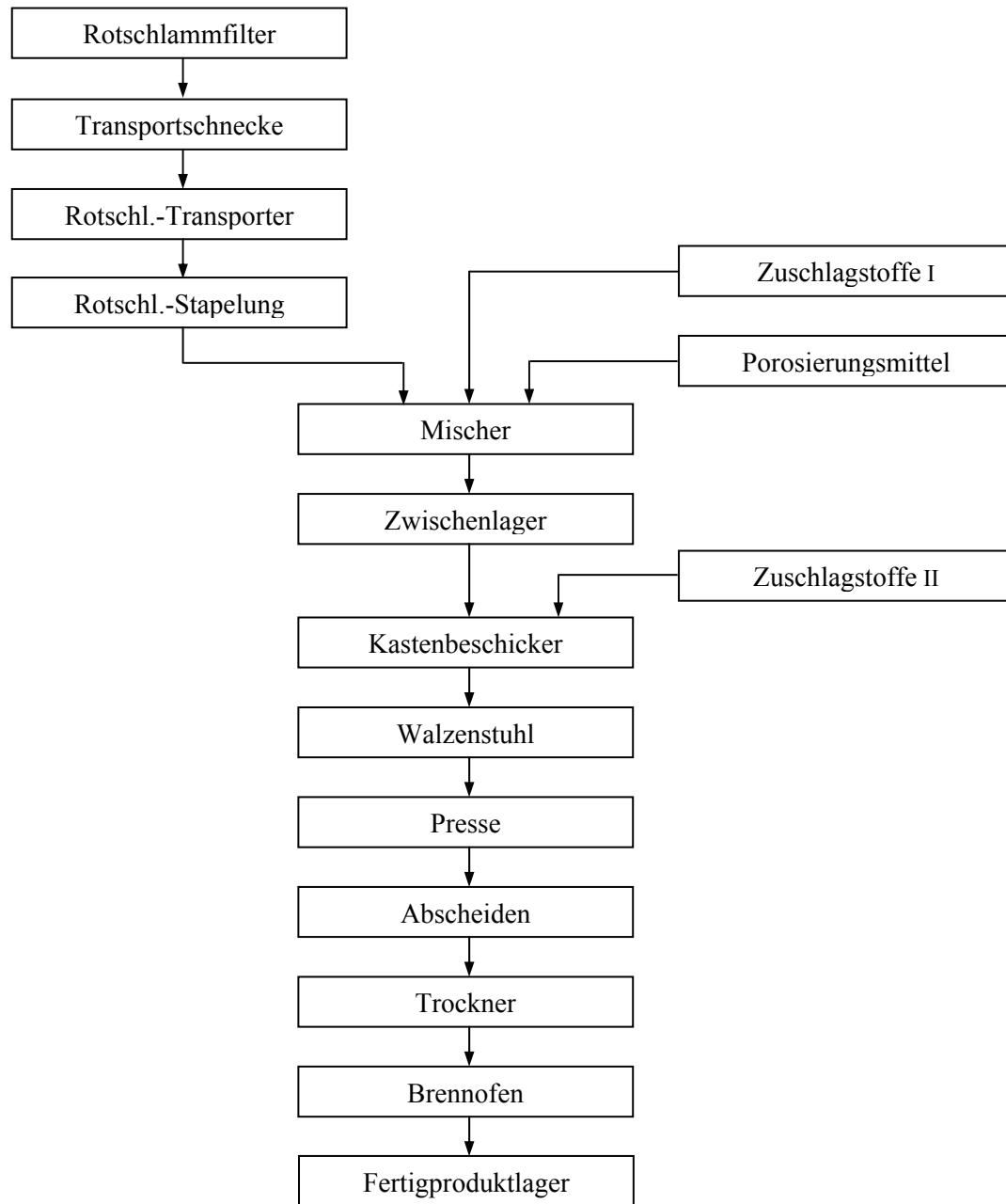


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Verfahrens zur Produktion von Ziegelsteinen unter Verwendung von Rotschlamm

Nach dem Kastenbeschicker durchlaufen die Rohstoffe noch zwei Walzenstühle und werden dann direkt der Vakuumpresse aufgegeben. Die Feuchtigkeit der Fertigmischung wird so reguliert, dass bei einem Pressdruck von 12 bar absolut standfeste Rohlinge mit den Abmessungen 30 x 24 x 24 cm entstehen. Für die Verarbeitung der Rotschlammtonmischung ist der Einsatz eines speziellen Presskopfes und eines angepassten Mundstücks erforderlich, um die höhere Schwindung beim Trocknen und Brennen auszugleichen. Die Rohpresslinge können wie normale Steine in jeder für die Ziegel Trocknung geeigneten Trockenanlage getrocknet werden, wobei auch Schnelltrockenaggregate eingesetzt

werden können, ohne dass dabei Trockenrisse im Rohling entstehen. Besonders interessant ist die Feststellung, dass die feuchten Steinrohlinge umso schneller trocknen, je mehr Rotschlamm sie enthalten.

Die getrockneten Steine können später sowohl in Rundkammeröfen als auch in Zickzacköfen und Tunnelöfen gebrannt werden. Bei einer gleichmäßigen Temperatur von 1200°C in einem Tunnelofen sind die Steine einwandfrei gebrannt und eine völlige Verglasung des Na₂O ist eingetreten, sodass die in der Ziegelnorm festgelegten Werte für den löslichen Na₂O-Gehalt unterschritten werden und keine Ausblühungen am fertigen Ziegelstein auftreten.

Zur Ermittlung des Gehalts der in den Leichtziegeln vorhandenen aufblühfähigen Salze wurde eine bestimmte Menge einer fein zerkleinerten Durchschnitsprobe hergestellt und gemäß DIN 51100 extrahiert und untersucht.

Salz	Anteil in %
Calciumoxid (CaO)	0,028
Magnesiumoxid (MgO)	0,001
Natriumoxid (Na ₂ O)	0,013
Kalziumoxid (K ₂ O)	0,001
Sulfat (SO ₃)	0,034

Tabelle 2: Gehalt an ausblühfähigen Salzen

Zwischenzeitlich wurden nach dem oben geschilderten Verfahren insgesamt mehr als 10 Mio. Rotschlammziegel produziert, gerechnet als NF-Steine, und unter dem eingetragenen Warenzeichen DUROTHERM[®] in den Handel gebracht und verarbeitet.

Die über mehrere Jahre durchgeführte Versuchsproduktion in einer kleineren Ziegelei sowie die Herstellung von DUROTHERM[®]-Ziegeln nach dem zuvor beschriebenen Verfahren gestattet heute (1976) eine wirtschaftliche Beurteilung der industriellen Verarbeitung von Rotschlamm. Besonders unter dem Aspekt, dass der Baumarkt heute in verstärktem Maße wieder den bewährten Baustoff Ziegel bevorzugt einsetzt. Steht dieser als großformatiger Leichtbaustein zur Verfügung, sollte der Verwendung von größeren Mengen Rotschlamm nach dem vorgestellten Verfahren der Weg für die Zukunft geöffnet sein. Selbst wenn man davon ausgeht, dass evtl. die Manipulation, der Transport und die Konditionierung des Rotschlammes zunächst aufwendiger sind als die Gewinnung von Lehm und Ton und dass unter Umständen für das Trocknen und Brennen der Rotschlamm enthaltenden Ziegelrohlinge mehr Energie aufgewendet werden muss, so werden diese Nachteile doch bei weitem dadurch ausgeglichen, dass als Porosierungsmittel billige Abfallstoffe eingesetzt werden können, die, wie die Praxis zeigt, pro Tonne erzeugten Endprodukts bis zu 70% unter den Kosten für das bisher eingesetzte vorgeschäumte Polystyrol liegen. Da erfahrungsgemäß

die Rohstoffkosten von Ziegelei zu Ziegelei stark unterschiedlich sind, kann auch hier keine allgemein gültige Kostenanalyse gemacht werden.

Die nachfolgenden Angaben sollen den interessierten Ziegeleien jedoch die Möglichkeit eröffnen, eine überschlägige Wirtschaftlichkeitsrechnung unter Berücksichtigung ihrer eigenen Kostensituation durchzuführen.

Für die Vormischung zur Konditionierung und Porosierung werden benötigt: Auf 100 Teile Rotschlamm, der zu den Manipulations- und Transportkosten eingesetzt wird (je nach Entfernung etwa in der Größenordnung der Gesteungskosten für Lehm) 2 Teile Konditionierungsmittel (Richtpreis pro t dieses Stoffes 110 DM bzw. 56,24 €, Preisbasis 1976) und 10 Teile Porosierungsmittel (Richtpreis pro t dieses Stoffes 120 bis 140 DM bzw. 61,36 bis 71,58 €, Preisbasis 1976). Die Fertigmischung zum Verpressen besteht aus 50 – 70 Teilen Rotschlammvormischung und 50 bis 30 Teilen Lehm und/oder Ton.

Abschließend sein noch auf ein möglicherweise auftretendes Problem bzw. auf ein Vorurteil eingegangen, das bei der Verarbeitung von Rotschlamm zu Ziegeln auftreten kann. Wie fast alle natürlichen Rohstoffe kann auch der Bauxit, je nach seiner Lagerstätte, kleinere Mengen radioaktiv wirkende Substanzen enthalten. Diese werden beim Aufschluss des Bauxits teilweise mit dem Rotschlamm abgeschieden. Vor einer Verarbeitung von Rotschlamm zu Ziegelsteinen empfiehlt es sich daher, diesen auf den Gehalt an radioaktiven Substanzen zu untersuchen, um festzustellen, in welchem Mischungsverhältnis der Rotschlamm zusammen mit den anderen Tonrohstoffen verarbeitet werden kann. Dadurch kann erreicht werden, dass die vom Gesetzgeber noch festzulegenden Grenzwerte nicht überschritten werden. Der neueste Entwurf einer Strahlenschutzverordnung für Baustoffe in Deutschland sieht vor, dass ein Grenzwert von 20 pCi/g nicht überschritten werden darf. Bis zu diesem Limit ist ein Baustoff weder anzeige- noch genehmigungs- oder überwachungspflichtig. Die industriell durchgeführten Langzeitversuche beweisen, dass auch bei Einsatz von Rotschlamm mit radioaktiv wirkenden Elementen dieser Grenzwert ohne Schwierigkeiten eingehalten werden kann. Die Werte liegen bei einem Zusatz von 50% Rotschlamm zwischen 10 bis 16 pCi/g, je nach verwendeter Bauxitsorte. Erwähnt sei in diesem Zusammenhang noch, dass auch andere Baustoffe, die aus natürlichen Rohstoffen hergestellt werden, kleinere, unter dieser Grenze liegende Gehalte an radioaktiven Substanzen aufweisen.

Wenn auch wegen der geringen Rotschlammmenge, die dieser Markt aufzunehmen in der Lage ist, keine Alternative zur Deponie gefunden wurde, so stellt die Praktizierung des neuen Herstellungsverfahrens zumindest einen Beitrag zur Lösung dieses Umweltproblems dar. Das Produkt aus Rotschlamm und Ton ist jedenfalls ein wirtschaftlich wie technisch echtes Konkurrenzprodukt zum klassischen Ziegel.

Bei der Recherche mit der Internetsuchmaschine *Google* ergab sich kein Treffer unter dem Stichwort DUROTHERM[®] und Ziegel, Ziegelstein, -

herstellung bzw. Rotschlamm, was auf die Einstellung der o.a. Aktivitäten hindeutet.

Literatur

HAERTER, M., BAYER, G. DAMS, R., MILDE, C.: Erfahrungen über den Einsatz von Rotschlamm bei der Herstellung von grobkeramischen Erzeugnissen. In: *Keramische Zeitschrift*, 28. Jahrgang, Nr. 11, 1976, S. 594-596.

<http://www.a-m.de/deutsch/lexikon/mineral/geruestsilicate/nephelin.htm>
am 03.11.2002.

<http://peridot.min.uni-koeln.de/reinersworld/polmin/Mineral/neph/dneph.htm>
am 03.11.2002.

6.3. Rotschlamm als Grundstoff für Ziegelsteine

6.3.1. Einleitung

In der Industrie fallen eine Reihe schwer verwertbarer Abfallstoffe an. Dies sind u. a. Podsol¹⁹ (Bleicherde) aus den Ölraffinerien, die einen hohen Heizwert hat, sowie Rotschlamm aus der Aluminiumherstellung. Diese Abfallstoffe werden durch ein Verfahren zur Herstellung von Ziegeln aus Rotschlamm, Bleicherde und Hausmüll einer sinnvollen Verwendung zugeführt. Bei diesem Verfahren werden Rotschlamm und Müll so miteinander vermischt, dass der Überschuss an Alkalien aus dem Rotschlamm und der Überschuss an Kieselsäure aus dem Müll während des Brennprozesses miteinander reagieren und sich unter Bildung von neuen Tonerdemineralien neutralisieren. Damit die notwendige Plastizität für die Formgebung erzielt wird, wird Bleicherde hinzugegeben.

In Vorversuchen wurde geklärt, dass das Verfahren für die Herstellung von Blähton, Vormauerziegeln und Großblocksteinen mit Wärmedämmeigenschaften und hoher Druckfestigkeit brauchbar ist. Allerdings haben sich nach den ersten Versuchen eine Reihe neuer Gesichtspunkte ergeben, mit denen es die Mischung zu optimieren galt. Über die endgültigen Versuchsergebnisse mit verbesserten Bedingungen wird nachfolgend berichtet.

6.3.2. Ausgangsmaterial

Die Zusammensetzung und die Energieinhalte von Hausmüll, Bleicherde und Rotschlamm gehen aus Tabelle 1 hervor. *Hausmüll* besitzt nach seiner Verbrennung hohe Anteile an Kieselsäure in feinstverteilter, nicht kristalliner und damit chemisch hochaktiver Form. Der Heizwert liegt zwischen 5000 bis 7500 kJ/kg. 5 bis 7 t Hausmüll haben den Heizwert von etwa 1 t Heizöl. *Rotschlamm* ist stark mit Alkalen angereichert, hat einen hohen Eisengehalt von etwa 30%, einen Titangehalt von etwa 10% und ist völlig frei von Fluor. *Bleicherde* wird als Filtermasse verwendet, um Lebensmittelöle zu reinigen oder Altöl zu regenerieren. Verwendet wird hierzu das hochwertige Tonmineral Montmorillonit bzw. Bentonit. Diese Masse kann bis zu 50% mit Öl angereichert werden. Der Heizwert liegt bei über 12.600 kJ/kg. Jährlich fallen im norddeutschen Raum (Stade-Peine-Niederrhein) mehrere 10.000 t Bleicherde an.

¹⁹ Podsol (Bleicherde): graue bis weiße Bleicherde (durch Mineralsalzverlust verarmter, holzaschefarbener, unter Nadel- und Mischwäldern vorkommender Oberboden). Podsole entstehen in Gebieten mit hohem Niederschlag und verhältnismäßig niederen Temperaturen. Die Ausgangsgesteine sind oft calcium- und magnesiumarm und leicht durchlässig, wie etwa Sande oder verwitterte Sandsteine. Podsole entstehen oft auch unter einer Vegetation, die nährstoffarme Rückstände bildet und so eine Rohhumusdecke fördert.

	Rotschlamm	Bleicherde	Hausmüll (zerkleinert)
Wassergehalt im Lieferzustand in %	40	2	28
Wassergehalt im Verarbeitungszustand in %	32	2	28
Chemische Zusammensetzung der Trockensubstanz			
Al ₂ O ₃	27,2	21,6	7,5
SiO ₂	11,1	25,4	29,0
Fe ₂ O ₃	31,0	-	3,0
TiO ₂	9,1	Spuren	-
CaO	0,8	Spuren	11,5
Na ₂ O	8,8	Spuren	-
andere Metalloxide	0,9	Spuren	-
Glühverlust			
aus Kristallwasser und CO ₂ in %	11,1	14,3	-
aus Brennbarem in %	0,0	38,7	49,0
Heizwert h_u in kJ/kg	-250	13.700	6.300
Raummasse in kg/dm³	2,1	1,8	0,3

Tabelle 1: Zusammensetzungen und Heizwerte von Hausmüll, Bleicherde und Rotschlamm

Zu den Versuchen wurden vier Komponenten mit folgenden Eigenschaften miteinander vermischt: Normale Porotonmasse, bestehend aus Ziegelton, gemischt mit Sand, Sägespänen und Styropor (spezifische Masse: 0,89 kg/dm³, Wassergehalt: 16,6%).

- Rotschlamm aus einer Aluminiumoxidfabrik (spezifische Masse: 1,61 kg/dm³, Wassergehalt: 45,7%).
- Bleicherde aus der Regenerierung von Altöl (spezifische Masse: 0,78 kg/dm³, Wassergehalt: 1,5%).

Anstelle von zerkleinertem Hausmüll wurde hier Kompost aus einem Kompostwerk eingesetzt (spezifische Masse: 0,60 kg/dm³, Wassergehalt: 20,2%).

Ferner wurde in einem Parallelversuch die normale Porotonmasse mit dem zellstoffhaltigen Abfall einer Papierfabrik vermischt.

Aus diesen Ausgangsstoffen wurden vier verschiedene Mischungen hergestellt, deren Zusammensetzungen in den Tabellen 2, 3 und 4 ausgewiesen sind.

	Zusammensetzung		Volumen- anteile in m ³	Masse- anteile in t	Trocken- substanz in t	Wasser in t
	in Masse-%	in Vol.-%				
Porotonmasse	65,6	62,3	11,37	10,12	8,44	1,68
Rotschlamm	18,3	14,7	2,68	4,32	2,35	1,97
Bleicherde	1,1	1,1	0,20	0,16	0,14	0,02
Kompost	15,0	21,9	4,00	2,40	1,92	0,48
Gemisch	100,0	100,0	18,25	17,00	12,85	4,15

Tabelle 2: Zusammensetzung der Mischung B aus Rotschlamm, Bleicherde, Kompost und Kompost

	Zusammensetzung		Volumen- anteile in m ³	Masse- anteile in t	Trocken- substanz in t	Wasser in t
	in Masse-%	in Vol.-%				
Porotonmasse	88,2	80,8	3,37	3.770	3.000	770
Zellstoff	11,8	19,2	0,80	480	400	80
Gemisch	100,0	100,0	4,17	42.50	3.400	850

Tabelle 3: Zusammensetzung der Mischung C aus Porotonmasse und Zellstoff

	Zusammensetzung		Volumen- anteile in m ³	Masse- anteile in t	Trocken- substanz in t	Wasser in t
	in Masse-%	in Vol.-%				
Porotonmasse	79,3	86,7	15,93	17,00	14,18	2,82
Rotschlamm	19,7	11,9	2,18	6,48	3,52	2,96
Bleicherde	1,0	1,4	0,26	0,20	0,18	0,02
Gemisch	100,0	100,0	18,37	23,60	17,88	5,70

Tabelle 4: Zusammensetzung der Mischung D aus Porotonmasse, Rotschlamm und Bleicherde

6.3.3. Herstellung der Ziegel

Wichtig ist die Zerkleinerung des Hausmülls. Zur Zerkleinerung wurde ein Prallreißer verwendet. Neben der Zerkleinerung bewirkt der Prallreißer²⁰ infolge der Rotation eine intensive Durchwirbelung des Materials, allerdings bewegen sich die Grobteile des Zerschnitts vorwiegend an der Oberfläche. Deshalb kann in der tiefliegenden Auslaufstelle kontinuierlich Feingut abgezogen werden. Das Material ist locker, sodass im nachgeschalteten Magnetabscheider eine gute Abscheidung aller Eisenteile sowie Aussiebung möglich ist.

Die Aufbereitung erfolgt in den üblichen Ziegeleimaschinen: Nasskollergang, Maukmischer und Feinwalzwerk. Die Formgebung mit Vakuumgerät und Abscheider war völlig problemlos. Die Masse, die bei den Mischungen B und D wegen des hohen Wassergehalts im beigemischten Rotschlamm einen etwa 2 bis 3% höheren Wassergehalt als normal hatte, war noch ausreichend steif, um Gitterziegel 5DF (300mm x 240mm x 115mm) einwandfrei ausformen zu können. Insgesamt wurden zu den Versuchen etwa 3.000 Steine 5DF mit der Mischung B, 700 Steine 5DF mit der Mischung C und 3.000 Steine 5DF mit der Mischung D hergestellt. Die Tabelle 5 gibt die Massen und Abmessungen im nassen Zustand an. Die Trocknung der Versuchsziegel erfolgte in einem Kammertrockner mit normaler Trockenzeit (5DF 3 bis 4 Tage) und normaler Regulierung der Trockenanlage. Trockenschäden waren nicht zu beobachten. Ob ein beschleunigter Trockenprozess möglich ist, wurde nicht untersucht. Die Abmessungen und Massen der Steine im getrockneten Zustand gibt Tabelle 6 wieder.

	Länge in mm	Breite in mm	Höhe in mm	Masse in kg	Volumen in dm ³	Raum- masse in kg/dm ³
Mischung A	322	253	114	9,922	9,776	1,015
Mischung B	322	253	115	9,215	9,776	0,943
Mischung C	322	253	115	9,620	9,776	0,084
Mischung D	322	253	115	10,860	9,776	1,111

Tabelle 5: Abmessungen und Massen der untersuchten Mischungen im nassen Zustand

²⁰ Prallreißer: Das Aufgabegut wird in einen schräg stehenden Zylinder gegeben. Mittels eines rotierenden Tellers wird das Material infolge der Fliehkraft an die Tellerwand gepresst und einem oder mehreren schnell rotierenden Zerkleinerungswerkzeugen zugeführt, die von oben in den Teller hineinragen.

	Länge in mm	Breite in mm	Höhe in mm	Masse in kg	Volumen in dm ³	Raum- masse in kg/dm ³
Mischung A	305	240	114	7,995	8,345	0,958
Mischung B	302	238	115	7,275	8,266	0,881
Mischung C	303	240	115	7,915	8,363	0,948
Mischung D	306	241	115	7,992	8,481	0,842

Tabelle 6: Abmessungen und Massen der untersuchten Mischungen im getrockneten Zustand

Das Brennen der Versuchsmasse erfolgte bei normaler Durchschubgeschwindigkeit und normaler Temperatur. Die Durchlaufzeit betrug 40 Stunden, die Brenntemperatur 1.060°C. Das Betriebsdiagramm zeigt Diagramm 1. Die Mischungen B und D waren wegen ihres Rotschlammanteils leicht rötlich gefärbt. Die Normalfarbe (Mischung A) ist gelb, auch die Mischung C zeigte keine Farbabweichung. Die Mischung B zeigte geringfügige Spuren von Reduktionsflecken, die auf den hohen Gehalt an Ausbrennstoffen und die sehr hohe Durchschubgeschwindigkeit zurückzuführen sind. Brennfehler traten nicht auf.

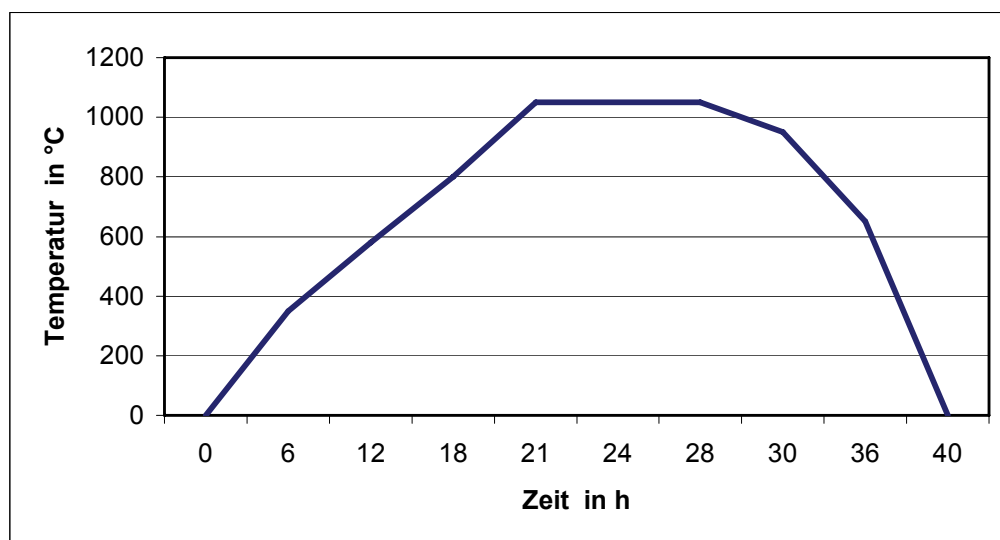


Diagramm 1: Betriebsdiagramm beim Brennen der Ziegel

Geht man davon aus, dass die einzelnen Komponenten folgende Heizwerte hatten:

Rotschlamm	0 kJ/kg Trockensubstanz,
Kompost	6.300 kJ/kg Trockensubstanz,
Bleicherde	19.000 kJ/kg Trockensubstanz,

dann sind die Heizwerte der einzelnen Mischungen:

Mischung A	0 kJ/kg,
Mischung B	1.153 kJ/kg (insgesamt),
Mischung C	1.490 kJ/kg (aus dem Zellstoff),
Mischung D	0 kJ/kg.

Mit den Mischungen B und C wurde der übliche Wärmebedarf eines normalen Tunnelofens theoretisch gedeckt. Praktisch muss aber berücksichtigt werden, dass der größte Teil des Heizwertes von Ausbrennstoffen im Bereich unterhalb von 600°C aus dem Brenngut herausdestilliert, unter Abkühlung zur Ofeneinfahrt zieht und unverbrannt mit dem Rauchgas entweicht. Tatsächlich nutzbar werden nach praktischer Erfahrung im normalen Tunnelofen etwa 33% des Heizwertes. Um eine volle Nutzung zu erreichen und eine zusätzliche Belastung der Rauchgase mit unverbrannten Kohlenwasserstoffen und Ruß zu vermeiden, muss das Gegenlaufprinzip angewendet werden.

6.3.4. Eigenschaften der Ziegel

Die Massen und Abmessungen der Ziegel im gebrannten Zustand zeigt Tabelle 7. Die Schwindung beim Trocknen ist in Tabelle 8 dargestellt.

	Länge in mm	Breite in mm	Höhe in mm	Masse in kg	Raum- masse in kg/dm ³	Wassergehalt
Mischung A	301	238	113	6,515	0,805	1.927g (24%)
Mischung B	301	237	114	5,935	0,730	1.940g (26,6%)
Mischung C	303	240	114,5	6,565	0,788	1.705g (21,5%)
Mischung D	305	241	115	6,537	0,773	2.073g (25,9%)

Tabelle 7: Abmessungen, Massen und Wassergehalt der untersuchten Mischungen im gebrannten Zustand

	<i>quer zur Strangrichtung</i>			
	Trocken- schwindung	Brenn- schwindung	Gesamtschwin- dung	Glühverlust
Mischung A	17mm (5,6%)	4mm (1,2%)	21mm (6,8%)	
Mischung B	20mm (6,6%)	1mm (0,3%)	21mm (6,8%)	
Mischung C	19mm (6,2%)	0mm (0%)	19mm (6,2%)	
Mischung D	16mm (5,2%)	1mm (0,3%)	17mm (5,5%)	
	<i>in Strangrichtung</i>			
Mischung A	6mm (5,3%)	1mm (0,8%)	7mm (0,1%)	1.480g (18,5%)
Mischung B	5mm (4,3%)	1mm (0,8%)	6mm (5,1%)	1.340g (18,4 %)
Mischung C	5mm (4,3%)	0,5mm (0,4%)	5,5mm (4,7%)	1.350g (17,0%)
Mischung D	5mm (4,3%)	0mm (0%)	5mm (4,3%)	1.455g (18,2%)

Tabelle 8: Schwindungen beim Trocknen und Brennen sowie Glühverlust

Beim Vorversuch mit anderen Mischungen stellte sich die verhältnismäßig hohe Schwindung als Nachteil des Verfahrens heraus. Ziel der neuen Versuche war mithin, die Mischung so zu gestalten, dass diese Schwindung ausbleibt. Die Ergebnisse zeigen, dass dieses Ziel erreicht wurde: alle Mischungen verhalten sich hinsichtlich Schwindung und Glühverlust ähnlich; die Schwindung quer zur Strangrichtung beträgt etwa das Dreifache der in Strangrichtung ermittelten Werte.

Die Ermittlung der *Wärmeleitzahl* wurde nach DIN 105, Teil 2 (Rechen-
schema b), durchgeführt, in dem Loch- und Steganordnung, Gesamtstegd-
dicke parallel zur Wärmestromrichtung und Scherbenrohddichte berücksichtigt werden.
Die Rechnung zeigt Tabelle 9. Das Ergebnis weist die Mischung B als diejenige
mit der besten Wärmedämmung aus. Alle anderen Mischungen sind der norma-
len Porotonmasse gleichwertig, also eine Klasse schlechter einzustufen.

		Mischung A	Mischung B	Mischung C	Mischung D
Raummasse	kg/dm ³	0,808	0,730	0,788	0,773
Lochanteil	%	42,5	42,5	42,5	42,5
Scherben- rohdichte	kg/dm ³	1,193	1,081	1,167	1,145
Anzahl Loch- reihen	-	13	13	13	13
Loch- anordnung	-	rechteckige Langlöcher, nicht versetzt			
Lochgröße	mm	35x12	35x12	35x12	35x12
Stegdicke außen	mm	15	15	15	15
Stegdicke innen	mm	9,5	9,5	9,5	9,5
Summe aller Stege/m	mm/m	272	272	272	272
Wärmeleitzahl	kJ/mhK	1,18	1,09	1,18	1,18

Tabelle 9: Ermittlung der Wärmeleitzahlen nach DIN 105, Teil 2

Die normale Porotonmasse liegt an der Grenze, bei der mit Ausblühungen gerechnet werden muss. Die Verdünnung dieser Masse mit Zusätzen, die selbst keine Ausblühneigung aufweisen, vermindert die Gefahr von Ausblühungen. Drei Steine der Mischung B wurden hochstehend in einem 20 mm tiefen Wasserbad auf ihre Ausblühneigung untersucht. Unter diesen Bedingungen waren nach 40 Stunden keine Ausblühungen oder Verfärbungen sichtbar. Um die *Frostbeständigkeit* zu untersuchen, wurden drei Probekörper im wassergesättigten Zustand etwa 30 Frostwechseln ausgesetzt, und zwar unter natürlichen Bedingungen. Die Steine zeigten danach weder Frostschäden noch Ausblühungen.

Die *Radioaktivität* des Rotschlammes wurde bereits während der Vorversuche ins Gespräch gebracht. Um diese Frage zu klären, wurden Rohstoffe und Fertigprodukte auf ihre radioaktive Strahlungsleistung untersucht. Das mit der Untersuchung beauftragte Institut für Strahlenhygiene am Bundesgesundheitsamt in Berlin sucht derzeit (1978) Grenzwerte, unterhalb derer gesundheitliche Schädigungen mit Sicherheit nicht zu erwarten sind. Dabei ist eine Anlehnung an die sehr strengen Werte der Sowjetunion gedacht. Wenn diese Werte hier Gültigkeit erlangen, so würden mehrere Baustoffe darüber liegen, z.B. Basalt, Granit, Bims, Schlackensteine, einige Chemiegippsorten und bestimmte Ziegelsorten. Der ursprünglich vorgesehene Anteil von 70% Rotschlamm hätte nach diesen Untersuchungen über den erwarteten Grenzen gelegen. Das Institut emp-

fiehlt deshalb, mit Rücksicht auf die in zwei bis drei Jahren zu erwartenden Grenzwerte den Anteil an Rotschlamm auf 20% zu begrenzen. Mit diesem Anteil liegt der neue Wärmedämmstein im üblichen Bereich der Baustoffe und mit ausreichendem Abstand unterhalb des Grenzwertes. Die *Druckfestigkeit* der gebrannten Ziegel aus Masse B liegt etwa bei 20 N/mm².

6.3.5. Wirtschaftlichkeit des Verfahrens

Zur Anwendung des Verfahrens sind grundsätzlich zwei Wege denkbar: Die Errichtung eines Aufbereitungswerkes in der Nähe der Aluminiumoxidfabrik und die Lieferung der pressfertigen Masse an Ziegeleien und Blähtonfabriken oder die Ergänzung der in den Ziegeleien vorhandenen Aufbereitungsanlagen um einige wenige Maschinen für die Müllzerkleinerung und Intensivmischung. In der Ziegelei wären bei einer Leistung von 150t/24h für etwa 300.000 DM (153.388 €) zusätzliche Maschinen notwendig.

Bei konventioneller Ziegelfertigung schwanken die Kosten für Kauf bzw. Miete von Tongelände, für Abraumbeseitigung, für den Tonabbau, für den Transport zum Werk und für die Rekultivierung nach beendetem Abbau zwischen 5 und 25 DM/t (2,56 und 12,78 €/t). Bei der HRR-Masse kann davon ausgegangen werden, dass die Gemeinde für die Abnahme von Müll einen Zuschuss in der Größenordnung von 20 bis 25 DM/t (10,23 bis 12,78 €/t) leistet. Dieser Zuschuss deckt etwa die Bezugskosten für Rotschlamm und Bleicherde ohne deren Frachtkosten. Die Frachtkosten für die Anteile würde die Masse selbst mit ungefähr 10 DM/t (5,11 €/t) belasten. Dabei würden bei Entfernungen unter 100 km der Rotschlamm mit Lkw anzufahren sein, bei Entfernungen bis 400 km mit Binnenschiffen. Diesem zusätzlichen Aufwand steht der in der Mischung enthaltene Heizwert gegenüber, der im Prinzip zum Brennen und zum Trocknen ausreicht. Bei einer Ersparnis von 1.680 kJ/kg an Öl oder Gas ergibt sich hieraus ein Nutzen von etwa 10 DM/t (5,11 €/t), bei voller Nutzung des Heizwertes im Gemisch beträgt der Nutzen 15,35 DM/t (7,85 €/t). Insgesamt kann man bei Anwendung dieses neuen Verfahrens mit einem Kostenvorteil von etwa 6 bis 8 DM/t (3,07 bis 4,09 €/t) rechnen; der genaue Wert hängt letztendlich von der Wirtschaftlichkeit der bestehenden Betriebseinrichtung ab.

Die Untersuchung hat gezeigt, dass das Verfahren anwendungsreif ist. Man strebt an, die erste nach diesem Verfahren und mit Gegenlauföfen arbeitende Anlage mittelfristig in Betrieb nehmen zu können. *Wenn das Verfahren auf mehrere Ziegeleien ausgedehnt wird, so kann auf diese Weise der gesamte Anfall an Rotschlamm, der gesamte Anfall an Bleicherde, der gesamte Anfall an Zellstoffabfällen und etwa 10% des gesamten Anfalls an Hausmüll verarbeitet werden. In einer Ziegelei können dabei etwa 3.000 t Heizöl im Jahr eingespart werden.*

6.3.6. Zusammenfassung

Beim Herstellen von Ziegeln aus Rotschlamm, Bleicherde und Hausmüll reagieren die Alkalien aus dem Rotschlamm mit der Kieselsäure aus dem Müll und neutralisieren sich unter Bildung neuer Tonmineralien. Durch Bleicherdezusatz wird die zur Formung notwendige Plastizität erreicht. Im Rahmen der Versuche wurden, um die optimale Mischung herauszufinden, verschiedene Mischungen untersucht. Die aus diesen Mischungen gefertigten Ziegel wurden hinsichtlich ihrer mechanischen und chemischen Eigenschaften untersucht und vergleichend gegenübergestellt. Es hat sich gezeigt, dass sich aus diesen Grundstoffen einwandfreie Ziegel herstellen lassen. Die Wärmeleitzahl ist günstiger als bei normaler Porotonmasse ohne Zusätze. Der Rotschlammanteil wurde im Hinblick auf die zu erwartende radioaktive Strahlungsleistung auf 20% begrenzt. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verspricht gegenüber konventionell hergestellten Ziegeln eine Ersparnis von etwa 6 bis 8 DM/t (3,07 bis 4,09 €/t).

Literatur

RIEDEL, R.: Rotschlamm als Grundstoff für Ziegelsteine. In: *Aluminium*, 54. Jahrgang, 1978, Heft 10, S. 635-637.

<http://www.susanne-schwaab.de/Boden/Podsol/podsol.html> am 27.10.2002.

<http://www.podsol.de/> am 27.10.2002.

7. Industrial Waste Products

7.1. Der Verbundwerkstoff Red Mud Jute Fibre Polymer Composite (RFPC)

Das indische Building Material and Technology Promotion Council (BMTPC) hat einen Verbundwerkstoff aus Rotschlamm, Polymer und Naturfasern hergestellt, der Red Mud Jute Fibre Polymer Composite (RFPC) genannt wird. Das Ziel bildet hierbei die Substitution von Holz in auf Holz basierenden Verkleidungsprodukten, welche in der Bauindustrie Verwendung finden. Dieses Produkt benötigt keine Energie, da die verwendeten Rohstoffe bei Raumtemperatur verarbeitet werden.

RFPC beinhaltet Eisen-, Titan- und Aluminiumoxid aus dem Rotschlamm sowie 82,5% Zellulose und 11,3% des Jutefaserbestandteils Lignin (der Gesamtanteil der Jutefaser beträgt 15%). Dieses neu entwickelte Material ist besonders für Türblenden (door shutter) verwendbar und stellt bedeutende Einsparungen in den Anfangs- sowie den Unterhaltungskosten sicher. Für zusammengesetzte Türen und Verkleidungen existiert ein sehr großer Markt, dieses Potential in entwickelten und Entwicklungsländern wartet nur darauf, abgeschöpft zu werden. Darüber hinaus kann RFPC auch für Möbel, Bodenbeläge, Paneele, elektrische Schaltergehäuse und Isolierelemente verwendet werden.

In Indien fallen jährlich über 4 Million Tonnen des Abfallprodukts Rotschlamm an. Das nicht weiter verarbeitete Residuum wird üblicherweise in Teichen entsorgt. Während der Monsune kann durch Abfluss von Oberflächenwasser aus den Lagerstätten eine Grundwasserverschmutzung in Form von Ausläugen eintreten.

Literatur

<http://www.bmtpc.org/building/redmud.htm>

8. Alkaloam - Verwendung von Rotschlamm bei australischen Farmern

8.1. Darstellung von Alcoa

Alcoa (Aluminium Corporation of America) of Australia fing in den späten siebziger Jahren an, über den alternativen Gebrauch von Bauxitüberrest nach dessen Verwendung im Bayerprozess zur Aluminiumoxid-(Tonerde-)herstellung nachzuforschen, welcher in drei Tonerderaffinerien in Australien anfällt. Das Agieren wurde mit durch die Forschung aufgefordert, die durch Dr. Jim Karren von der Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) erfolgt war; der zeigte, dass dieses Residuum benutzt werden könnte, um landwirtschaftliche Produktivität auf dem sandigen Boden in der Küstenebene von Perth zu verbessern.

Alkaloam ist der eingetragene Handelsname für einen Bauxitüberrest, der von Alcoa of Australia der dortigen Landwirtschaft zur Verfügung gestellt wird. Wie im „Widespread use of bauxite residue, Peel-Harvey Coastal Plain Catchment“ - EPA Bulletin 714, November 1993 beschrieben, stellt der Bauxitüberrest ein alkalisches Produkt dar, welches Restnatriumkarbonat enthält. Natriumkarbonat ist allgemein bekannt als Reinigungssoda.

Alkaloam wurde im Jahr 2000 durch das australische Department of Agriculture den Farmern zugänglich gemacht. Vorausgegangen waren einige Jahre von Tests und Versuchen im Peel-Harvey-Reservoir/Einzugsgebiet, wo gezeigt werden konnte, dass *Alkaloam* erfolgreich bei sauren Weiden und ausgelaugten Böden eingesetzt wurde. Bei dem Einsatz desselben reagiert (bindet) dieses stark mit phosphorhaltigen Substanzen und Stickstoff, einer Aktivsubstanz in vielen Düngemitteln. Damit wird der Eintrag phosphatischer Substanzen in umliegende Gewässer infolge von Niederschlägen verhindert.



Bild 1: Ausbringung von *Alkaloam*

Das Department of Agriculture erwartet bezüglich der Weidenbelastung eine Phosphorexportrate von etwa 50%. Übertragen bedeutet dies, dass ungefähr 20 oder 30 Tonnen des Phosphors pro Jahr nicht in Gewässer gelangen können. Die Phosphorniveaus, die in den Gewässern gemessen wurden, verringern dieses drastisch; gerade wegen der nunmehr nicht mehr möglichen Speicherung im Boden und im Sediment. Vom Department of Agriculture in Washington, Western Australia geleitete neuere Forschung und Versuche zeigen, dass mit einer

Rate von 20 bis 80 Tonnen Alkaloam pro Hektar das phosphorige Auslaugen um mehr als 70 Prozent verringern kann. Selbst niedrigere Raten von 5 bis 20 Tonnen pro Hektar verringern die Bodensäure erheblich und verbessern die Getreideergebnisse.

Bei Versuchen mit einer höheren Rate von *Alkaloam* wurden Weidewachstumszunahmen von bis 200% registriert. Mit niedrigeren Raten, welche das Department of Agriculture gegenwärtig befürwortet, werden Weidezunahmen von 10 bis 20% erwartet. Es muss an dieser Stelle daran erinnert werden, dass *Alkaloam* nicht ein Ersatz für Düngemittel ist, sondern nur die Leistungsfähigkeit der Böden erhöht.

Das Anwenden von *Alkaloam* auf Koppeln kann gut mit dem Kalken verglichen werden. *Alkaloam* verursacht eine ähnliche Verbesserung des pH-Werts oder der Säure des Bodens, nur viel schneller. Wie beim Kalken mögen diese Veränderungen im der pH-Wert die Verfügbarkeit der Betriebsnährstoffe Kupfer, Mangan und Zink verringern; also muss dies in den Düngemittelplänen beachtet werden.

Natriumhydroxid (Ätznatron) wird im Raffinerierungsprozess benutzt, um Tonerde vom Bauxit zu extrahieren. *Alkaloam* enthält etwas Restnatriumkarbonat, allgemein bekannt als Reinigungs-Soda, das vorher in den meisten Wäschereien vor der Existenz von modernen Reinigungsmitteln verwendet wurde. Dieses Natriumkarbonat verleiht *Alkaloam* seine kalkenden Eigenschaften und unterstützt die Zunahmen der beobachteten Weideproduktivitäten. *Alkaloam* brennt nicht. Obgleich einige Leute empfindlich auf Reinigungssoda reagieren; kann es Reizungen/Entzündungen verursachen, wenn es in die Augen gelangt.

Schwermetalle sind im Boden des Abbauggebietes Darling Range natürlich enthalten und bleiben im Bauxitüberrest, nachdem Aluminiumoxid im Raffinerierungsprozess extrahiert worden ist. Die Metalle werden chemisch gebunden und nicht freigegeben, wenn der Boden mit *Alkaloam* behandelt wird. Tatsächlich haben Mischungs- und Aufschüttungsversuche gezeigt, dass der Bauxitüberrest Schwermetalle fängt und damit wirkungsvoll verhindert wird, dass diese in Gewässer gelangen können. Um die Dinge ins rechte Licht zu rücken: es gibt mehr Zink in Austern als in *Alkaloam*, mehr Selen in den Paranüssen, mehr Fluorid in der Zahnpasta, mehr Quecksilber im Haifisch von Ihrem Fischhändler, mehr Kupfer in der Schokolade, mehr Blei im typischen Boden (und zweifellos mehr im Boden nahe einem Straßenrand) und mehr Kadmium in Düngemittel.

Der Boden des Abbauggebietes Darling Range weist ein höheres natürliches Strahlungsniveaus auf als der auf Küstenebene. Selbst wenn jemand in einem Zelt 24 Stunden pro Tag, 365 Tage im Jahr auf einem Ort leben würden, der mit *Alkaloam* bei 1600 Tonnen pro Hektar behandelt worden wäre, würde die Person nur ungefähr so viel Strahlung ausgesetzt (die Strahlung oberhalb des natürlich vorkommenden Hintergrundniveaus), wenn diese auf dem Lieblingssteilhang oder in einem Lehmziegelsteinhaus auf der Küstenebene leben würde. Das

Department of Agriculture befürwortet Änderungsraten von ungefähr 10 bis 20 t/ha.

Für den während des Ausbreitungsprozesses erzeugten Staub existieren strenge Kontrollen in Form einer allgemeinen Vorschrift. Das Staubbiveau ist nicht wirklich hoch. Das Department of Agriculture hat Staubanaysen vorgenommen, die Niveaus zeigen, welche unter den Richtlinien der Weltgesundheitsorganisation liegen. Allerdings ist *Alkaloam* in hohem Grade sichtbar und kann leicht beflecken, was bedeutet, dass es sorgfältig gehandelt werden muss.

Das Department of Agriculture hat Gesundheitsstudien an Menschen und Tieren in und um Gebieten durchgeführt, die unterschiedlichen Raten von *Alkaloam* ausgesetzt wurden; negative Auswirkungen konnten nicht festgestellt werden. Der Gebrauch von *Alkaloam* zur Nährsteuerung wurde durch die Umweltschutz-Behörde empfohlen, die einem allgemeinen Umweltbericht folgt und vom Minister für Umwelt genehmigt wurde.

Alcoa leitet keinen Profit vom Gebrauch von *Alkaloam* ab und ist in der Forschung und in der Implementierung des Alternativgebrauches aus Umweltgründen beteiligt geworden. Diese Gründe umfassen den vorteilhaften Gebrauch von einem Material, das für die Wiederverwendung als nicht verwendbar gelten konnte und wofür Alcoa verantwortlich ist, während der Ausgangsstoff innerhalb der Überrestspeicherbereiche an den drei Tonerderaffinerien anfällt. Alcoa untermauert damit seine Verpflichtung zur Fürsorge. Seit 1989 hat Alcoa über 17 Millionen \$ in Landcare-Projekte in Westaustralien und Victoria investiert, einschließlich 200.000 \$ pro Jahr in Peel-Harvey-Reservoir seit 1994. Bis jetzt hat die Firma mit ungefähr 500.000 \$ in einem *Alkaloam*-Forschungsprogramm und mit über 100.000 \$ für die Verfügbarkeit des Materials sowie für dessen Ausbreitung beigetragen. Dies stellt für Alcoa zusätzliche Kosten zuzüglich denen normaler Bauxitaktivitäten dar. Die Menge des als *Alkaloam* freigegebenen Bauxitüberrests, bildet ungefähr 1% des Gesamtbauxitresiduums, der jedes Jahr von Alcoa produziert wird.

Sobald *Alkaloam* für die Landwirtschaft in Washington, Western Australia, und dessen Farmer zugänglich macht, verfügt Alcoa nicht länger über die Kontrolle, wie das Material verbreitet bzw. benutzt wird. Die Forschung zeigt, dass *Alkaloam* kein Umweltproblem darstellt, wenn es in Übereinstimmung mit der allgemeinen Vorschrift verwendet wird. Dies wiederum beseitigt die Gefahr von Entschädigung, dass Alcoa für den unverantwortlichen oder nicht angebrachten Gebrauch des Stoffes verantwortlich gemacht wird.

Es hat viele Grundbesitzer/-pächter gegeben, welche über die Jahre mit Forschungsversuchen beschäftigt waren. Mehr und mehr Teilnehmer kamen wieder, um um mehr *Alkaloam* zu bitten und dies auf ihren Anwesen weiter zu verwenden. Es hat auch eine kleine Anzahl von Grundbesitzern/-pächtern gegeben, die Interessen über eine Anzahl von den Ausgaben bekundet haben, um damit eine Miteinbeziehung in die Versuche folgen zu lassen. In Erwiderung dessen hat das Department of Agriculture eine Anzahl von unabhängigen Reviews des Projek-

tes in Auftrag gegeben, die Positives berichteten. Im Wesentlichen gründete jede Beunruhigung, die von den Grundbesitzern/-pächtern hervorgerufen wurde, entweder auf Missverständnissen, Problemen in der Praxis oder schlechter Kommunikation.

Der Bauxitüberrest hat die Fähigkeit, Nährstoffe wie phosphorhaltige Verbindungen sowie Stickstoff aus dem sandigen Boden zu absorbieren. Damit kann die Rate wesentlich verringert werden, mit der diese Nährstoffe zum Grundwasser auslaugen. Weideverbesserungen von 20-50 Prozent sind in den Bauernhofversuchen beobachtet worden.

Der Bauxitüberrest wird als *Alkaloam* vermarktet, um dessen neue Rolle als Hilfsmittel, anstatt Industrieabfall zu verdeutlichen.

8.2. Das große Rotschlamm-Experiment, welches radioaktiv wurde

Der nachfolgende Artikel erschien am 7. Mai 2002 im *Sydney Morning Herald* (von Gerard Ryle).

Quentin Treasure war ein Mitglied einer lokalen Landcare-Gruppe, als das West Australian Agricultural Department an ihn herantrat, um an einem ungewöhnlichen Experiment teilzunehmen. Das Department wollte eine rötliche Substanz über seinem Ackerland verbreiten, um zu sehen, ob diese Substanz den Eintrag von unerwünschtem Phosphor in Wasserstraßen stoppen würde. Der Bonus, welcher Herrn Treasure versichert wurde, war nicht gerade ökologisch. Allerdings könnte das Mittel in beträchtlichem Ausmaß zu erhöhten Getreideergebnissen mit einem Boden verbessernden Mittel führen, das ihm gerades 50¢ ein Tonne kosten würde. Aber dieses war kein gewöhnliches Produkt; es war Industrieabfall.

Die LKW, die Tonne für Tonne des ockernen Materials abkippten, kamen direkt von der nahe gelegenen Alcoa-Aluminiumraffinerie, die das Projekt kofundierte. "Wir sprachen nie viel, wenn doch, dann, ob es sicher war oder nicht," sagte Herr Treasure. "Uns wurde gerade erklärt, dass es Schmutz von den Hügeln sei, welcher von Alcoa stammt. Zu der Zeit waren wir ein wenig naiv, dass wir alles hinnahmen, wie es war." Das Experiment, welches jetzt dazu verwendend wird, um einen außerordentlichen Antrag für großräumigen Gebrauch von Industrieabfällen auf australischen Westbauernhöfen zu rechtfertigen, bleibt bitter im Gedächtnis einer kleinen Gruppe von Farmern, die ursprünglich daran teilnahmen. Was Herrn Treasure nicht völlig verstand, als er dem Antrag zustimmte, war, dass abgesehen vom Vorhandensein des Düngerpotentials, der Rotschlamm auch mit gefährlichen Materialien durchsetzt war. Über jeden Hektar wurden bis zu 30 Kilogramm radioaktives Thorium, sechs Kilogramm Chrom, mehr als zwei Kilogramm Barium und bis ein Kilogramm Uran besprüht. Dazu kamen 24 Kilogramm Fluorid, mehr als die Hälfte eines Kilo-

gramms der giftigen Schwermetalle Arsen, Kupfer, Zink und Kobalt, sowie etwas Blei, Kadmium und Beryllium. Dieser Austrag basiert auf der niedrigsten Anwendungsrate von 20 Tonnen je Hektar. In einem Fall - als der Rotschlamm bei 200 Tonnen je Hektar angewendet wurde - konnten die Dosen, entsprechend einem westaustralischen Umweltschutzdokument zehnfach multipliziert werden.

Zwischen 1991 und 1994 wurden mehr als 7.600 Tonnen von Alcoas Rotschlamm direkt auf Herrn Treasures Ackerland in Yarloop geschüttet, welches rund eine Autostunde südlich von Perth liegt. Ungefähr 23.000 weitere Tonnen wurden auf die Ländereien von 12 benachbarten Farmern geschüttet. "Als wir kranke Tiere bekamen, wurden wir alarmiert und begannen uns zu fragen, ob an der Sache etwas falsch sein könnte", sagte Herr Treasure. "Wir bekamen sehr ungewöhnliche Krankheiten bei den Kühen und einige von ihnen fingen an zu sterben. Aber es erschien uns, dass das ganze Department ausschließlich darüber beunruhigt war, um wie viel sich der phosphorige Einlauf in die Mündung verringerte. Es gab nichts in ihrem Protokoll, um Tiere zu überprüfen. Letztendlich produzieren wir Tiere, damit Leute diese essen können. Sie hatten sich bereits für das Material entschieden und sahen somit keine Notwendigkeit, etwas zu tun."

Bedenken traten auf, als die Farmer die Schwermetallmassen mit dem Wasser auf ihren Ländereien gaben. Es zeigten sich erhöhte Niveaus des giftigen Quecksilbers, des Selens, des Kupfers und des Bleis. "Ich stellte dem Department Fragen zu den Zahlen, worauf mir diese ein Telefax mit dem Inhalt schickten, dass jemand vermutlich eine (Auto-) Batterie ins Wasser geworfen habe, in dessen Folge sich die überschüssigen Niveaus im Wasser einstellten", sagte Herr Treasure. "Meine Nackenhaare fingen an sich aufzustellen." Ich sagte: "Haltet uns nicht für Dummköpfe." Graeme Moore, der auch an dem Experiment teilnahm, sagte, das Department habe dann zu behaupten versucht, dass die hohen Messwerte ein Resultat des Abflusses einer ruhigen Landstraße wären. 'Oh, ihr seid nur dumme Farmer, ihr wisst nicht, was das bedeutet'. "Aber wir sagten, 'Dort steht es Schwarz auf Weiß, wenn diese Niveaus überschritten werden, dass sie angeblich auch wieder hinuntergehen werden'. Das war es, als wir begannen, über die ganze Sache verärgert zu sein".

Unterdessen bejubelte das Department das Experiment als Erfolg. Es besteht die Absicht, es vehement beizubehalten. Frühe Indikatoren zeigten, dass der Primärzweck des Versuches das Verhindern von Algenblüten in der Peel-Harvey-Mündung zu sein schien, indem phosphoriger Abfluss verringert wird und Alcoa war glücklich. Die Lagerung des Materials kostete eine Menge Geld. Die Firma hatte sie seit den frühen achtziger Jahren eine Verwendung für den Rückstand gesucht und war mehr als glücklich, dass dieser nun abgegeben werden konnte. Von Anfang an bestätigten das Department und Alcoa die möglichen Schadstoffe in dem Abfall. Aber beide Parteien bestätigten - und stehen noch dazu -, dass die erhöhten Schwermetallniveaus fest im Boden zusammengebunden bleiben würden und dass ferner die radioaktiven Materialien kaum beachtet würden. Alcoa sagte, es wäre "mehr Zink in den Austern, mehr Selen in den Paranüssen,

mehr Fluorid in der Zahnpasta, mehr Quecksilber im Haifisch, mehr Blei im typischen Boden und mehr Kadmium in Düngemittel enthalten als im Rotschlamm."

Das Department behielt sich vorbei, dass eine Anzahl von den hohen Schwermetallmesswerten, die vom Wasserabfluss genommen wurden, durch andere Faktoren erklärt werden könnten. "Ich meine, Bin Laden werde dieses Material nicht stehlen, um daraus Atombomben herzustellen," sagte Agriculture Department Research Officer Rob Sommer. "Es ist das, woraus Boden gebildet ist - Dinge wie Fluorid, Aluminium, Eisen und Mangan. Alle jene Materialien sind selbstverständlich extrem giftig, aber, wenn sie als Bestandteil der Bodenmatrix vorkommen, sind sie sehr, sehr schwer hinaus zu bekommen."

Die Environmental Protection Authority (EPA) fuhr mit dem Experiment fort, obwohl sich schon in November 1993 bestätigt hatte, dass geringe Mengen des in hohem Grade giftigen Arsens, Fluorids und Aluminiums vom Boden auslaugte. "Bauxitüberrest (Rotschlamm) enthält Spuren einiger Elemente, die, wenn sie freigesetzt werden, Umweltgefahren aufwerfen könnten," sagt ein EPA-Report. "Es gibt eine Reihe von Ergebnissen, die mit diesem Antrag/Angebot in Verbindung zu bringen sind, die durch andere Behörden angesprochen oder betrachtet werden müssen. Diese Ergebnisse umfassen jene bezüglich der Gesundheit wie bspw. die Ansammlung von Schwermetallen und Radioaktivität im Gemüse.

1995 mühte sich das Agriculture Department um zu erklären, wie Proben des Abflusswassers Konzentrationen von Aluminium, Kupfer, Blei, Quecksilber und Selen zeigen konnten, die über den Niveaus liegen, welche für Meer- und Süßwasser empfohlen wurde. Im August 1995 und im September 1996 bestätigte sich, dass der Arsengehalt in den Wasserstraßen überstiegen wurde.

Obgleich fünf Jahre vergangen waren, seitdem das Material zuerst angewendet wurde, hingen noch große Staubwolken des roten Staubes über den Feldern der Farmer. Dies sollte nicht geschehen. Auf Druck der Farmer, stimmte das Department schließlich im Jahre 1996 spät zu, einen begrenzten Test auf die Gesundheit von einigen Tieren aufzunehmen.

"Sie sollten das Land mit 20 Tonnen pro Hektar gesehen haben", sagte Herr Treasure. "Die armen alten Tiere, wenn sie Gras fressen wollten, mussten sie Rotschlamm fressen. Sie hatten keine Wahl. Weil wir wussten, dass dort Schwermetalle enthalten waren, wollten wir wissen, ob etwas davon in ihre Körper gelangen könnte. Als Farmer wollten wir nicht unsere Absatzmärkte in Übersee vergiften." Obgleich die Untersuchung des Departments "keine offensichtlichen Gesundheitsprobleme" fand, fanden sich hohe Chrom-, Fluorid- und Kadmiumniveaus in einigen Rindern. Die hohen Chromniveaus wurden mit dem Staub verbunden und dieses veranlasste die Furcht um die Gesundheit der Farmer. "Unsere Tiere gingen durch die Substanz und sie wurden davon bedeckt", sagte Herr Treasure. "Und wir taten dasselbe. Eines Tages baten sie mich, mein

Vieh mit einem Staubüberwachungsgerät durch die oben Koppeln zu treiben. Das Gerät verstopfte."

Es dauerte ein Jahr, bis das Department die Staubtests von unabhängigen Experten zu wiederholen. Wieder folgerten sie daraus keine Bedrohung, aber die Landwirte waren nicht überzeugt. "Letzten Endes waren wir nicht kompetent zu sagen, ob der Rotschlamm für unsere Gesundheit schädlich oder gutartig ist, ... aber wir glauben dem auch nicht", sagte Herr Moore. "Ich hoffe es ist absolut sicher, und ich hoffe, es erledigt die Arbeit so, wie sie sagen. Aber ich sitze zwischen zwei Stühlen, weil ich nicht glücklich bin."

Trotz des Umstandes, dass viele der ursprünglichen Landwirte hart getroffen wurden, inklusive der versprochenen höheren Ernteerträge, die sich nicht einstellten, trieb das Department das Projekt weiter voran. Rotschlamm wurde auf 22 weiteren Anwesen ausgestreut. Darüber hinaus wurde eine Düngemittelfirma beteiligt, um den Versuch zu unterstützen, den Schlamm mit einem kommerziellen Düngemittel zu mischen, um ein verzögert freisetzendes (slow-release) Phosphorprodukt zu produzieren.

1999 trat das Department auf das EPA zu, um 360.000 Tonnen des roten Schlammes auf Ackerland über der gesamten Küstenebene von Swan auszubreiten. Dann kam eine unerwartete Wendung. Alcoa lehnte es ab, weiterhin Schlamm freizugeben, es sei denn, die Firma bekommt Entschädigung für jegliche, durch Alkaloam bedingte Umweltschädigungen. Alcoa sagt, dies sollte einfach der Gefahr eines irgendwie "unverantwortlichen oder nicht angebrachten" Gebrauches des Produktes verhindern. Das Department unterstützte den Antrag aus dem Grund, da es sich nicht um ein kommerzielles Projekt handelte. "Es kostet uns Geld, um das vorhandene Material verfügbar zu machen, aber wir tun dass, weil wir durch die Wissenschaft überzeugt worden sind," sagte Alcoas Pressesprecher Brian Doy. "Wir denken, dass gewiss die erforderliche Sorgfalt erfolgte, um ein sicheres Produkt anzuwenden."

Zweifellos, als die damalige Regierung im September 1999 Alcoa die Entschädigung großzügig bewilligte, war der Schritt beispiellos. Die Firma entledigte sich auf diese Weise hunderttausender Tonnen des Rotschlammes, der den Farmern diesmal für \$14 je Tonne zur Verfügung gestellt wurde. Aber Herr Treasure und seine Nachbarn haben ihre eigenen Theorien darüber, warum Alcoa eine Entschädigung anstrebte. Er unterstreicht mit einigem Recht, dass viele der unabhängigen Studien, die verwendet wurden um das Experiment rational zu erklären, durch Alcoa finanziert wurden. Herr Summers geht über die Folgerungen hinweg. "Sie könnten tatsächlich entdecken, dass die Leute, die in Westaustralien für Alcoa arbeiten, bei einigen bedenklichen Umweltproblemen wirklich gerne helfen würden." Eine Gesetzeslücke, die Giftstoffe auf Farmen zulässt.

Literatur

<http://www.alcoa.com.au/environment/bauxiter.shtml> am 01.08.2002.

<http://www.alcoa.com.au/environment/bauxiter2.shtml> am 01.08.2002.

<http://www.rense.com/general24/aluminumfertilizer.htm> am 01.08.2002.

9. Anwendung von Rotschlamm bei Böden

9.1. Immobilisierung von Schwermetallen in belasteten Böden

Es wurden verschiedene Fe-(Oxid-)haltige Reststoffe hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Immobilisierung von Schwermetallen im Boden untersucht. Dabei wurden belastete Böden (Okeraue im Harzvorland, Hafenschlickspülfeld, Wesermarsch bei Nordenham) neben einer Kontroll- (KO) und einer Kalkvariante (CA) mit eisenhaltigen Reststoffen behandelt: Rotschlamm (RS, 20% Fe als Hämatit), Wasserwerksschlamm (WW, 38% Fe als Ferrihydrit) und Strahlmittelabfall (SAE, 78% Fe). Als Kriterien für eine immobilisierende Wirkung der Bodenzusätze galten Pflanzengehalte und Bodenextrakte (NH_4NO_3 , DTPA).

Die NH_4NO_3 -löslichen Schwermetallanteile im Boden wurden insbesondere durch RS und WW bis zu 60 % verringert, die DTPA-löslichen Anteile gingen dabei um bis zu 25 % zurück. Weiterhin wurden Untersuchungen zur genaueren Kennzeichnung der eingesetzten Materialien und der Veränderung der Böden nach dem Einbringen der eisenhaltigen Materialien vorgenommen. Vertiefend wurden Fragen der Cd-Adsorption (Batchversuch, Adsorptionsisothermen) und der Veränderung der Schwermetall-Bindungsformen (sequentielle Extraktion) bearbeitet.

Die bisher vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass es möglich ist, durch Zugabe von geeigneten Fe-haltigen Reststoffen – insbesondere von Fe-Fällungsschlamm aus der Trinkwasseraufbereitung – die Mobilität der Schwermetalle in einem belasteten Boden deutlich zu vermindern und die Pflanzenaufnahme bis unter bestehende Grenzwerte zu senken.

Literatur

PLUQUET, E. & MÜLLER, I.: Zum Einsatz von Eisenoxiden zur Immobilisierung von Schwermetallen in belasteten Böden. Hauskolloquium: Bodenkarten – Bodenbewertungen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover 1998. <http://www.bgr.de/veransta/hauskoll/980526.htm> am 09.08.2002.

9.2. Der Einfluss unterschiedlicher Bodenzusätze auf die sortenspezifische Schwermetallaufnahme von Pflanzen auf belasteter Böden in Bangladesh

Bangladesh besitzt zahlreiche Industriestandorte, wobei die Abwässer und Abfälle ungereinigt in die Umwelt abgegeben werden. Landwirtschaftliche Flächen werden dadurch verunreinigt und die Lebensmittelqualität beeinträchtigt. Ziel der Dissertation war es, einfache und kostengünstige Strategien zu entwickeln, um den Schadstofftransfer vom Boden in die Pflanze zu vermindern.

In der Umgebung der Stadt Dhaka wurden drei Standorte ausgewählt (Tongi Pharmaindustrie, Tejgaon Industriezone und Hazaribagh Lederindustrie). Gefäß- und Feldversuche wurden mit verschiedenen Pflanzen (Reis, Weizen und Tomate) und verschiedenen Bodenzusätzen (Rindermist, Müllkompost, Ölpresrückstände, Wasserhyazinthenkompost, Hühnermist, Kalk und **Rotschlamm**) durchgeführt. Der Standort Tongi ist mit organischen Verbindungen kontaminiert. Der Boden von Tejgaon ist leicht sauer (pH=5,7), enthält viel organische Substanz und erhöhte Zink- (685 mg/kg), Blei- (136 mg/kg) und Kadmium-Gehalte (2,6 mg/kg). Die Region um Hazaribagh ist mit Schwermetallen belastet, speziell mit Chrom (11.000 mg/kg).

Die Zugabe organischer Abfälle erhöhte die Biomasseproduktion von Reis und die Schwermetallaufnahme wurde auf dem Boden von Tongi reduziert. Die verschiedenen Reis- und Weizensorten wurden unterschiedlich von den Bodenzusätzen beeinflusst. Durch die Kalkzugabe wurde auf den Böden Tejgaon und Hazaribagh die Schwermetallaufnahme von Reis, Weizen und Tomate reduziert. Die **Rotschlammzugabe** führte auf den Böden Tejgaon und Hazaribagh zu einer Erhöhung der Biomasseproduktion und zu einer Reduktion der Pflanzenaufnahme von Zink, Nickel, Kadmium und Chrom.

Literatur

<http://www.arcs.ac.at/dissdb/rn035965> am 02.08.2002.

9.3. Stabilisate aus basischen Industrierückständen zur Bodenverbesserung und Pflanzenernährung

In den letzten Jahren wurde im Rahmen dieses Projekts herausgefunden, dass problematische oder umweltgefährdende Stoffe so miteinander kombiniert werden können, dass ihre charakteristischen Nachteile ausgeschaltet, aufgehoben oder zumindest verringert werden (Forschungsberichte der Universität zu Köln 94/95 und 96/97). So lassen sich theoretisch stark basische Industrierückstände mit sauren so kombinieren, dass neutrale Gemische entstehen, die weniger umweltschädlich sind. Leider ist das Problem nicht so einfach zu lösen, weil sich unter Umständen hohe Salzkonzentrationen als Folgeproblem ergeben. Dieser Nachteil wird offenbar, wenn das Pflanzenwachstum auf bestimmten Kombinationen aus Industrierückständen untersucht wird. Es wurde nun gefunden, dass eine Problemlösung durch Zugabe von Gips (REA-Gips) im Prinzip möglich ist. Es wurde ein Bindemittel entwickelt, das sich als förderlich für das Pflanzenwachstum erweist (PS DE 19503142 C2, München 17.12.1998). Hierzu werden stark basische Abfallstoffe (Braunkohlenflugasche, **Rotschlamm**) und Gips in genau definierten Anteilen miteinander vermischt, getrocknet und auf Sand- oder sauren Lehmboden ausgebracht. Ein Einsatz dieser Mittel käme auf sandigen oder versauerten Böden etwa in Rekultivierungsgebieten oder schlechten Waldstandorten in Betracht. Die Ergebnisse wurden bereits zum Teil auf der ENTSORGA in Köln 1996 und neuerdings auf der Tagung: "Instrumente des Umweltschutzes im Wirkungsverbund – Interdisziplinäres Kolloquium Umwelt als knappes Gut" der Volkswagen-Stiftung zugleich „Siebte Osnabrücker Umweltgespräche“ in Osnabrück vom 10. bis 12. November 1999 als Posterdemonstration präsentiert.

Literatur

<http://www.uni-koeln.de/ew-fak/bio/botanik/forschung.htm> am 02.08.2002.

9.4 Einsatz von Rotschlamm und Grünsalz auf als Grünland genutzten sauren Hochmoorböden

9.4.1. Einleitung

Saure Hochmoorböden mit pH-Werten um 4 bis 4,5 (in wässriger CaCl_2 -Lösung gemessen) im Oberboden zeichnen sich infolge ihres geringen Mineralanteils durch eine hohe Phosphatmobilität aus. Das hat zur Folge, dass aus solchen Böden über Dräne bis zu 20 mal mehr Phosphat in die Vorfluter gelangen, als aus Mineralböden. Ursache der hohen Phosphatmobilität ist u. a. das Fehlen von freien Kalzium-, Aluminium- und Eisenverbindungen, die Phosphate im Boden binden können. Die von den Pflanzen nicht aufgenommenen Phosphate unterliegen daher fast vollständig der Auswaschung und verursachen mit die Eutrophierung²¹ von Vorflutern und stehenden Gewässern. Eine Anreicherung von Phosphat ist in diesen sauren Moorböden nicht oder nur kaum möglich.

Die Festlegung der Phosphate kann durch eine Erhöhung des pH-Wertes der Hochmoorböden um mindestens zwei Einheiten auf Werte über 6 zwar erfolgen, führt dann aber zu einem verstärkten Abbau der organischen Substanz und damit zu einer Verschlechterung seiner bodenchemischen und bodenphysikalischen Eigenschaften. Modellversuche hatten darüber hinaus ergeben, dass durch die Zufuhr von Eisenverbindungen auch bei niedrigen pH-Werten die Phosphatmobilität in Hochmoorböden herabgesetzt werden kann. Daher lag es nahe, mit eisenreichen Reststoffen aus der Industrie die Phosphatmobilität im Boden zu verringern. Solche Reststoffe sind u. a. Grünsalz²² ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) aus der Titandioxid- oder Stahlproduktion und alkalischer Rotschlamm aus der Aluminiumoxidherstellung. Da Rotschlamm sehr alkalisch (pH-Wert einer wässrigen Suspension ca. 11) und Grünsalz infolge der Bildung von Eisen(III)oxid und freier Schwefelsäure sehr sauer ist, wurden unter Praxisbedingungen eine Mischung von Rotschlamm und Grünsalz im Verhältnis von 1: 1 eingesetzt, um möglichst den pH-Wert des Bodens nicht zu verändern. Da aber Rotschlamm Schadstoffe enthält (Aluminium, Chrom und Arsen), musste auch geprüft werden, wie sich diese Schadstoffe im Hochmoorboden nach dem Ausbringen von Rotschlamm verhalten.

²¹ Eutrophierung: unerwünschte Zunahme eines Gewässers an Nährstoffen und damit verbundenes nutzloses und schädliches Pflanzenwachstum.

²² Grünsalz: Das grünliche Salz ist ein Abfallprodukt aus der Produktion von Titandioxid und besteht neben geringen Verunreinigungen aus Eisen-III-Chloridsulfat (FeClSO_4). G. dient in der 3. Reinigungsstufe von Kläranlagen zur Phosphatfällung (weitergehende Abwasserreinigung). Zusammen mit Calciumhydroxid wird es zur Konditionierung (besseren Absetzbarkeit) von Klärschlamm eingesetzt (sog. Eisen-Kalk-Verfahren). Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Gehalt an Schwermetallverunreinigungen im G. eine zusätzliche Anreicherung des ohnehin schon belasteten Klärschlammes darstellt. Jährlich fallen in der alten BRD rund 400.000 t G. an, die hauptsächlich zur Abwasserreinigung verkauft werden.

9.4.2. Feldversuch auf Hochmoorgrünland

Auf einem sauren Hochmoorboden (schwach zersetzter Sphagnumtorf, Torfmächtigkeit > 15 dm) wurden vorentwässerter und stichfester Rotschlamm und Grünsalz in einer Menge von jeweils 10 t/ha mit einem Dungstreuer gleichmäßig ausgebracht und mit den oberen 10 cm des Moorbodens innig vermischt. Anschließend wurde Gras angesät. Die Gräser wurden wie üblich mit ca. 47 kg P/ha und Jahr als Superphosphat gedüngt. Das Versuchsfeld war gedränt, sodass über die Dräne der Phosphat-, Eisen- und Schadstoffaustrag ermittelt werden konnte. Dazu wurden im Winterhalbjahr im Abstand von 14 Tagen die Dränwässer beprobt und analysiert.

Parameter	Rotschlamm	Grünsalz
Fe	20,1 %	20 %
Al	13,8 %	
Si	6,5 %	
Ti	4,6 %	
Na	6,8 %	
P	880 mg/kg	
As	10-40 mg/kg	
Cr	600 mg/kg	

Tabelle 1: Zusammensetzung von Rotschlamm und Grünsalz

Zusätzlich wurden zu Versuchsbeginn und am Ende des neunjährigen Versuchs Bodenproben von 0-90 cm entnommen und u. a. auf Nährstoffe aber auch auf Aluminium, Arsen und Chrom chemisch untersucht.

Die chemische Zusammensetzung des Rotschlammes und Grünsalzes ist in Tabelle 1 dargestellt. Durch die Mischung des sehr alkalischen Rotschlammes mit dem sauren Grünsalz entstand ein pH-neutrales Produkt, sodass keine Veränderung des Boden-pH-Wertes von 4,1 (CaCl_2) erfolgt war.

9.4.3. Dränwasseruntersuchungen

In der Abbildung 1 sind die Ergebnisse der Dränwasseruntersuchungen auf Phosphat dargestellt und zwar jeweils die Mittelwerte der einzelnen Winterhalbjahre. Die Phosphatkonzentrationen im Dränwasser der nicht mit Rotschlamm/Grünsalz behandelten Variante liegen im Mittel zwischen 6 und 8 mg P/l in einer Größenordnung, die ca. 20 bis 40 mal höher ist als im Dränwasser aus Mineralböden ermittelt wurden. Die geogene Grundlast, also die Phosphatkonzentration im Sickerwasser aus unkultivierten Hochmooren, beträgt nach FOERSTER & NEUMANN (1981) bereits 1 bis 2 mg P/l.

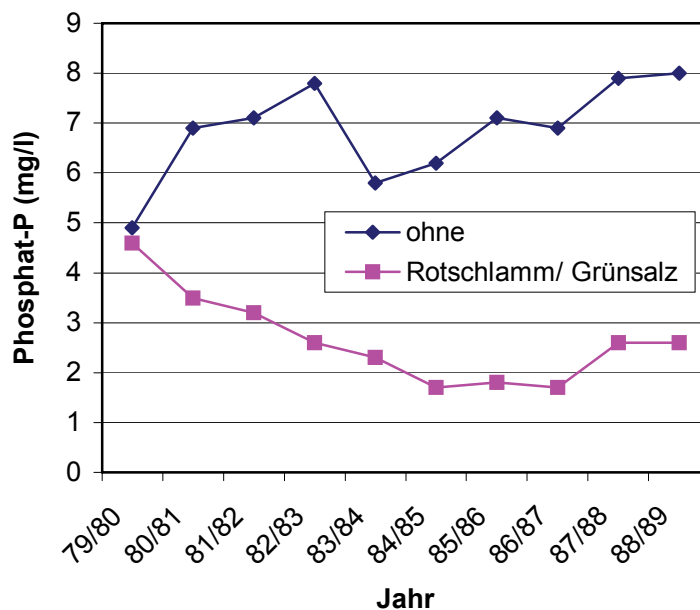


Abbildung 1: Mittleres Phosphatgehalt im Dränwasser

Durch die Zugabe von Rotschlamm/Grünsalz gehen die Phosphatkonzentrationen im Dränwasser allmählich auf Werte um 2 – 3 mg P/l zurück. Insgesamt wird so ein Rückgang um ca. 70% im neunjährigen Versuchszeitraum beobachtet. Der Rückgang der Phosphatkonzentrationen im Dränwasser setzt erst deutlich im 2. und 3. Versuchsjahr ein, da die Eisenverbindungen im Rotschlamm und Grünsalz nur das in der Krume enthaltene Phosphat binden können. Phosphate, die bereits unterhalb der Krume waren, wurden nicht vor einem Austrag geschützt. Am Ende des Versuchszeitraums stiegen die Phosphatkonzentrationen im Dränwasser der mit Rotschlamm/Grünsalz behandelten Variante wieder leicht an. Möglicherweise hat jetzt bereits die Phosphat sorbierende Wirkung des Eisens in der Krume nachgelassen.

Aus den Phosphatkonzentrationen im Dränwasser und den ermittelten Sickerwassermengen lassen sich die jährlichen Phosphatfrachten, die aus diesem Hochmoorboden in die Gewässer ausgetragen wurden, errechnen. Im Mittel der neun Versuchsjahre wurde jährlich aus der unbehandelten Variante 15 kg P/l und aus der mit Rotschlamm/Grünsalz behandelten Variante nach 4,5 kg P/l ausgewaschen (Tabelle 2). Eine weitere Phosphatreduzierung aus diesem Hochmoorboden ist nur möglich, wenn erneut Rotschlamm/Grünschlamm eingebracht und auch die Phosphatdüngung vermindert werden. Insgesamt zeigen auch diese Daten, dass mit Rotschlamm und Grünsalz der Phosphataustrag aus sauren Hochmoorböden um 70% verringert werden kann. Das bestätigen auch andere Versuche von SCHEFFER, BARTELS & KUNTZE (1991) auf ähnlichen Standorten.

Fe-Zugabe	Phosphat-P (kg/ha und a)
Ohne	15 (100%)
Rotschlamm/Grünsalz	4,5 (30%)

Tabelle 2: Jährliche P-Frachten (kg P/ha und Jahr)

Die Eisengehalte im Dränwasser werden nach der Rotschlamm/Grünsalzzugabe im Dränwasser um ca. 1 mg Fe auf ca. 2 mg erhöht (Abbildung 2). Dieses stammt, wie Vergleichsuntersuchungen ergaben, allein aus dem Grünsalz-Fe, da das Eisen im Rotschlamm in diesem sauren Hochmoorboden nicht wasserlöslich ist und somit nicht ausgewaschen werden kann. Der Austrag an Eisen wird noch durch das Vorhandensein löslicher organischer Substanzen im sauren Hochmoorboden gefördert, da es zur Bildung von wasserlöslichen Eisen-Huminstoffkomplexen²³ kommt. Die 2 mg Fe/l im Dränwasser entsprechen einem Eisenaustrag in die Gewässer von ca. 4 kg Fe/ha, das sind umgerechnet 0,1 bis 0,2% des im Grünsalz enthaltenen Eisens. Also wird nur eine sehr geringe Menge Eisen aus dem Grünsalz ausgewaschen, die Masse wird nach Oxidation zum dreiwertigen Eisen als amorphes bzw. mikrokristallines Eisenoxidhydrat im Oberboden (Krume) festgelegt.

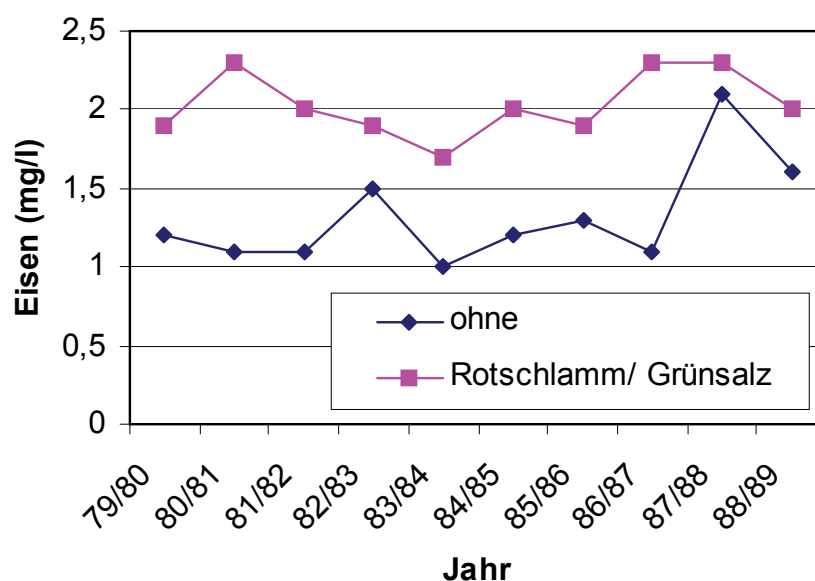


Abbildung 2: Mittlere Eisengehalte im Dränwasser

²³ Als Huminstoffe bezeichnet man schwach braun bis schwarz gefärbte, in der Regel in Böden gebildete, postmortale organische Substanzen ohne reproduzierbare chemische Struktur und mit regional unterschiedlichen Eigenschaften und Zusammensetzungen. Aufgrund ihrer hohen spezifischen Oberfläche und ihrer Struktur mit vielen funktionellen Gruppen und Hohlräumen haben sie eine wichtige Bedeutung beim Stofftransport in der Lithosphäre (im Schalenbau der Erde die obersten 100 km). Sie werden in der Natur gelöst im Grundwasser und in verschiedenen Lagerstätten gefunden, wie in Sedimenten, Humus, Torf, Braunkohle, nicht aber in Steinkohle. Alle Huminstoffe enthalten Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff und in sehr geringen Mengen Schwefel und Phosphor.

Die im Rotschlamm enthaltenen Spurenstoffe Chrom, Arsen und auch Aluminium konnten im Dränwasser nicht nachgewiesen werden. Wie die Bodenuntersuchungen ergeben, werden diese Stoffe in der Krume (0-10 cm) auch unter den sauren Bedingungen des Hochmoorbodens nicht verlagert. Im Dränwasser wurden dagegen hohe Gehalte an Natrium gemessen. Die betrugen im Dränwasser der mit Rotschlamm/Grünsalz behandelten Variante 30 bis 35 mg Na/l. Die Werte waren doppelt so hoch wie die im Dränwasser der unbehandelten Varianten. Natriumionen werden in Moorböden noch weniger gebunden als in Mineralböden und werden daher mit dem Sickerwasser ausgewaschen.

9.4.4. Bodenuntersuchungen

Neben Dränwasseruntersuchungen wurden auch Bodenuntersuchungen bis in Dräntiefe (ca. 1 m) durchgeführt. Diese Untersuchungen zeigen, dass durch die Eisenzufuhr über Rotschlamm und Grünsalz vor allem die umweltrelevanten Spurenstoffe Chrom und Arsen aus dem Rotschlamm im Oberboden (0-10 cm) angereichert wurden (Tabelle 3).

	unbehandelt	Rotschlamm/Grünsalz
Al	640	9200
Fe	880	5780
Na	50	58
Cr	7	18
As	2,2	5,4

Tabelle 3: Spurenstoffe im sauren Hochmoorboden (0-10 cm); Werte im mg/1000 ml Moorboden

Neben der gewünschten Erhöhung der Eisengehalte im Oberboden nehmen auch die Gehalte an Aluminium und Natrium zu. Während, wie erwähnt, Natriumionen im Hochmoorboden nicht gebunden und damit relativ schnell ausgewaschen werden, werden die mehrwertigen Kationen auch in diesem sauren Hochmoorboden in der Krume gebunden und nicht verlagert. Es kommt vor allem bei Eisen und Aluminium zu einem drastischen Anstieg im Oberboden, aber Untersuchungen im Unterboden und im Drän gaben keine Hinweise auf eine Verlagerung von Aluminium. Das im Rotschlamm enthaltene Aluminiumoxid ist so fest gebunden, dass in diesem Versuchszeitraum von neun Jahren keine Freisetzung erfolgt ist. Freie Aluminiumionen sind ab Konzentrationen von über 1 mg Al/l Bodenwasser für Pflanzen toxisch. Eine toxische Wirkung des Rotschlammes wurde nicht beobachtet. Im Gegenteil das Pflanzenwachstum auf dem Hochmoorboden wurde durch Rotschlamm und Grünsalz um ca. 10%

im Vergleich zu der nicht behandelten Parzelle gesteigert (vgl. Kap. 8 – Alkaliam).

Arsen ist im Rotschlamm bis in einer Menge von 40 mg/kg Trockenmasse enthalten. Da Arsenverbindungen aus Eisen(III)salzen unlösliche As-Fe-Verbindungen (Skorodite) bilden, die auch im stark sauren Milieu nicht in Lösung gehen, war nicht anzunehmen, dass nach dem Ausbringen von Rotschlamm Arsen gelöst und verlagert wird. Die Bodenuntersuchungen ergaben, dass die Arsengehalte – wie zu erwarten war – im sauren Oberboden der mit Rotschlamm/Grünsalz behandelten Varianten erhöht ist (2,2 und 5,4 mg As/1000 ml Boden). Eine Verlagerung in den Unterboden konnte in dem Versuchszeitraum nicht festgestellt werden. Die Grünpflanzen nehmen das Chrom aus dem Rotschlamm nicht auf. Ebenso wie Arsen ist Chrom im Rotschlamm fest gebunden.

9.4.5. Schlussbemerkung

Hochmoore sind von Natur aus reine Grünlandstandorte. Sie werden daher, wenn sie nicht ganz aus der landwirtschaftlichen Nutzung herausgenommen worden sind, fast ausschließlich als Grünland genutzt, um so auch den Abbau der organischen Substanz (Torf) zu verlangsamen. Allein in Niedersachsen gibt es ca. 200.000 ha saure Hochmoorböden mit Grünlandnutzung. Auch bei dieser Boden und Substanz schonenden Nutzung werden im Vergleich zu Mineralböden hohe Phosphatausträge in die Gewässer ermittelt. Der vorgestellte Feldversuch mit Rotschlamm und Grünsalz auf einem solchen sauren Hochmoorboden bestätigte, dass so der Phosphataustrag über Dräne um ca. 70% reduziert werden kann, ohne die landwirtschaftliche Nutzung einschränken zu müssen. Die im Dränwasser der mit Rotschlamm und Grünsalz behandelten Varianten gemessenen Konzentrationen an Phosphat entsprechen der natürlichen Grundlast von Hochmoorböden und werden daher auch nicht weiter zu senken sein. Diese Reduzierung des Phosphataustrages ist ein wichtiger Beitrag zur Entlastung von Vorflutern und von flachen Seen mit Phosphat in Nordwestdeutschland.

Die im Rotschlamm enthaltenen Elemente Chrom und Arsen werden in der Krume gebunden und stellen keine Umweltgefährdung dar. Bei weiterem Einsatz von Rotschlamm ist aber zu prüfen, ob die in der Klärschlammverordnung genannten Grenzwerte an Chrom und Arsen nicht doch überschritten werden. Eisen vermag Chrom und Arsen so fest zu binden, dass auch unter den sauren Bedingungen im Hochmoorboden keine Verlagerung der Stoffe möglich ist. Weder im Dränwasser noch im Pflanzenaufwuchs wurden erhöhte Gehalte ermittelt. Eisen ist im Rotschlamm so schwer löslich, dass es nicht verlagert werden kann. Eine zunächst befürchtete Eisenockerbildung (KUNTZE, 1978) im Dränrohr wurde in den neun Versuchsjahren nicht festgestellt. Nur ein Teil des löslichen Eisens im Grünsalz wird verlagert. Aber die gemessenen Konzentrationen im Dränwasser reichen zu einer Verstopfung der Dräneintrittsöffnungen nicht aus (KUNTZE, 1978). Die mit dem Wasser ausgetragenen organischen Sub-

stanzen, die Eisen komplex binden können, verhindern darüber hinaus eine Ausfällung. Auch die anderen im Rotschlamm enthaltenen Stoffe, wie Aluminium und Natrium, stellen unter den beschriebenen Bedingungen keine Gefährdung dar.

Eine Mischung von alkalischem Rotschlamm und saurem Grünsalz reagiert auch nach der Oxidation des Eisens und der Freisetzung von Schwefelsäure aus dem Grünsalz neutral. Der pH-Wert des behandelten Hochmoorbodens wird dabei nicht verändert und bleibt in seiner Funktion voll erhalten. Rotschlamm allein ausgebracht erhöht den pH-Wert des Bodens um mindestens eine Einheit. Es kommt dann in den sauren Hochmoorböden zu erhöhten biochemischen Umsetzungen mit einem verstärkten Abbau der organischen Substanz. Umgekehrt führt die Anwendung nur von saurem Grünsalz zu einem deutlichen Abfall des Boden-pH-Wertes und damit zu einer Verminderung der Bodenfunktion bis hin zur Bodenzerstörung und erhöhter Freisetzung von im Torfkörper gebundenen anorganischen Stoffen.

Neben Rotschlamm und Grünsalz sind auch eisenhaltige Abfälle wie Wasserwerkschlämme geeignet, wenn nicht zu hohe Gehalte an Schwermetallen ein flächiges Ausbringen auf landwirtschaftlich genutzte Böden verbietet.

Literatur

FOERSTER, P., NEUMANN, H.: Die Stoffbelastung kleiner Fließgewässer in landwirtschaftlich genutzten Gebieten Norddeutschlands. In: *Mitteilungen aus dem Niedersächsischen Wasseruntersuchungsamt*, 1981, 7, S. 1-217.

KUNTZE, H.: Verockerungen – Diagnose und Therapie. In: *Schriftreihe des Kuratoriums für Wasser- und Kulturbauwesen*, 1978, Heft 32, S. 1-124. Verlag Paul-Parey, Hamburg und Berlin.

SCHEFFER, B.: Zur Stoffdynamik der Hochmoorböden. In: *NNA-Berichte*, 2000, 7 Heft 2, S. 43-46.

SCHEFFER, B.: Zum Einsatz von Rotschlamm und Grünsalz auf als Grünland genutzten sauren Hochmoorböden. In: *Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall* 2000 (47) Nr. 6, S. 872-875.

SCHEFFER, B., BARTELS, R., KUNTZE, H.: Anwendung von Rotschlamm auf sauren Hochmoorböden zur Reduzierung des Phosphataustrages. Ergebnisse 1985-1989. In: *Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung*, 1991, 32, S. 326-333.

<http://www.sonnenseite.oekoserve.net/fp/archiv/RUBwerkstoff-material-substanz/Gruensalz.shtml> am 08.10.2002.

<http://home.arcor.de/hollerrit/Trinkwasser/trinkwasser.html> am 08.10.2002.

10. Bioleaching – Laugung von Wertmetallen mit heterotrophen Mikroorganismen

Die bei der Verhüttung lateritischer Nickelerze verwendeten pyro- und hydrometallurgischen Verfahren erfordern einen hohen Energieaufwand und sind sehr kostenintensiv. Daher erlangen biotechnologische Laugungsprozesse aufgrund ihrer niedrigen Energie- und Investitionskosten und wegen ihrer Umweltfreundlichkeit zunehmendes Interesse.

Mit Hilfe eines Citronensäure produzierenden Schimmelpilzes (*Penicillium simplicissimum*) wurden aus lateritischem Nickelerz aus der Dominikanischen Republik 77 % des Nickels und 31 % des Aluminiums extrahiert. Bei Anwendung einer Kombination aus chemischer und mikrobiologischer Laugung gingen nach thermischer Vorbehandlung 90 % des Nickels und 60 % des Aluminiums in Lösung.

Rückstände aus der Aluminiumproduktion enthalten häufig noch beträchtliche Aluminiumanteile, die über mikrobielle Laugungsprozesse einer weiteren Verwendung zugeführt werden könnten. Aus Schlacken wurde mittels mikrobiell hergestellter Citronensäure bis zu 60 % des Aluminiums extrahiert, während im Falle von Rotschlamm Oxalsäure wirksamer war und 40 % des Aluminiums in Lösung brachte.

Aufgrund der Bedeutung von Mangan als strategisch wichtigem Metall wurden weltweit verschiedene Verfahren zur mikrobiellen Gewinnung von Mangan erprobt, die sich aber ausschließlich auf oxidische Erze beschränkten. Hierbei wurden vorwiegend Bakterien eingesetzt, die sich von organischen Substanzen ernähren. Die biotechnologische Aufbereitung von silikatischen Manganerzen wurde im Rahmen der deutsch-rumänischen Zusammenarbeit an Erzen aus Razoare (Rumänien) untersucht. Anstelle von Bakterien wurden fadenbildende Schimmelpilze (*Penicillium* und *Aspergillus*) eingesetzt, die organische Säuren produzieren (z. B. Citronensäure oder Oxalsäure) und auf diese Weise Mangan aus silikatischen Erzen mobilisieren. Bei geeigneter Wahl der Laugungsbedingungen wurde in 6 Stunden 20 % des Mangans freigesetzt. Nach den vorliegenden Ergebnissen ist eine mikrobielle Laugung silikatischer Manganerze möglich und bietet eine Alternative zu konventionellen hydrometallurgischen Verfahren.

Voraussetzung für einen wirtschaftlichen Einsatz biotechnologischer Laugungsverfahren mit heterotrophen Mikroorganismen (Bakterien, Pilze) ist die Bereitstellung billiger organischer Nährstoffe, etwa in Form organischer Abfallprodukte aus der Lebensmittel- oder Pharmaindustrie.



Bild 1.: Penicillium simplex
(Agrarkultur)

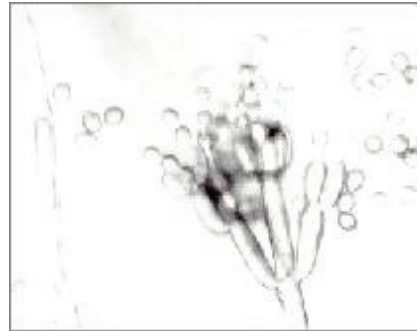


Bild 2.: Penicillium simplex,
Sporenträger
(mikrosk. Aufnahme)

Literatur

<http://www.bgr.de/b412/bioleaching.htm> am 09.08.2002.

11. Neutralisation von Rotschlamm mittels Meerwasser

Die Orica Tochtergesellschaft, Incitec Ltd., hat einen Exklusivvertrag mit Queensland Alumina Ltd. (QAL) geschlossen, um behandelten Rotschlamm von der QAL Gladstone Tonerderaffinerie zu vermarkten.

Rotschlamm ist der feinkörnige Überrest der anfällt, nachdem Tonerde vom Bauxit extrahiert worden ist. Gewöhnlich haben Tonerderaffinerien Mühe, diesen Schlamm loszuwerden, weil er einen sehr hohen pH-Wert hat.

QAL hat dieses Problem überwunden, indem es den Rotschlamm mit Meerwasser neutralisierte. Dieser Prozess senkt den pH-Wert erheblich. Damit wird die sichere Speicherung und weitere Verwendung von Rotschlamm ohne weitere chemische Behandlung ermöglicht.

Meerwasserneutralisierter Rotschlamm kann dazu benutzt werden, um Säuren zu neutralisieren und Phosphate und Schwermetalle im Abwasser zu entfernen. Die Schwermetalle werden durch Fällung (precipitation) als alkalische Mineralien effektiv aus der Lösung entfernt. Die Behandlung hat den zusätzlichen Nutzen der Erhöhung der Phosphatabsorption und Kationenaustauschkapazität des Materials.

Mögliche Anwendungen schließen die Behandlung von saurer Drainage aus den Gruben sowie die industriellen und städtischen Abwässer mit ein. Behandeltes Wasser kann dann harmlos in die Umwelt abgeführt oder für Bewässerungs- oder Rehabilitationsprojekte aufbereitet werden.

Incitec und QAL führen zurzeit eine Machbarkeitsstudie durch, um festzustellen, wie das Material vermarktet werden sollte. Als Teil der Studie hat Incitec eine Reihe der Tests mit interessierten Firmen und Forschungsorganisationen eingeleitet, um die Stärken und Schwächen des Rotschlammes für zielgerichtete Anwendungen zu definieren.

Incitec geht auch Wegen nach, die Bandbreite der möglichen Anwendungen durch Tabletten aus Meerwasser neutralisiertem Rotschlamm zu erweitern, einschließlich reaktiver Barrieren und Filtermittel. Dreißig Tonnen des pelletisierten Rotschlammes werden verwendet, um gelöste Metalle und Phosphat aus dem Wasser zu entfernen, das in den Betriebsprozessen des Incitec's Gibson Island-Betriebs in Brisbane während seiner Abschaltung für Wartungsarbeiten über Weihnachten 2001 anfiel.

QAL ist zurzeit die einzige Tonerderaffinerie in Australien, die Rotschlamm mit Meereswasser neutralisiert.

Literatur

<http://www.miningaustralia.com.au/articles/f7/0c0097f7.asp> am 06.08.2002.

12. Katalytische Verflüssigung von Kunststoffabfällen mittels Rotschlamm

12.1. Einleitung

Dem Recycling der Ausgangsmaterialien von Abfallpolymeren kam eine große Aufmerksamkeit zugegen und zwar als Ausgangsstoffe zum Erlangen von wertvollen Produkten. Die Pyrolyse²⁴ ist eine der vielversprechendsten Aufbereitungsmethoden für das Recycling der Ausgangsmaterialien im Rahmen der Verarbeitung von Kunststoffabfällen. Der thermoplastische Kunststoff Polyvinylchlorid²⁵ (PVC) verursacht jedoch während der thermischen Pyrolyse vielerlei Probleme, folglich wird die Entchlorung der Kunststoffabfälle notwendig. Die Entchlorungsversuche sind in zwei Gruppen kategorisiert, nämlich stufenweise und katalytisch.

In letzter Zeit ist die katalytische Entchlorung von zunehmendem Interesse. Die Literatur bezieht sich auf die Sorption²⁶ von Chlorwasserstoff (HCl) aus PVC. Dessen Abbau unter dem Einsatz von Metalloxiden zeigt, dass HCl mit irgendeinem Metalloxid zu den Metallchlorverbindungen reagiert. Andererseits waren einige aus Eisen-Kohlenstoffoxiden zusammengesetzte Materialien sehr wirkungsvoll bei dem Abbau von anorganischen und organischen Chlorverbindungen bei dem Abbau/Zersetzung von PVC-Produkten, worin auch Polymermischungen enthalten waren. In dieser Studie wurden der thermische und der katalytische Abbau von kommunalen Kunststoffabfällen (MWP) oder MWP/heavy vacuum gas oil (HVGO)-Mischungen anhand zwei verschiedener Prozesse durchgeführt, nämlich dem Einschnitt-Prozess sowie dem Zweischnitt-Prozess. HVGO wurde als Lösungsmittel zum Erreichen der Homogenität verwendet. Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit bildet die Verwendung von Industrieabfällen (Rotschlamm) als Entchlorungskatalysator.

Verbrennung

Im Gegensatz zur thermischen Pyrolyse weist PVC äußerst problematische Eigenschaften bezüglich des Brennverhaltens auf. Das Bayerische Landesamt für Umweltschutz legt bei der Beurteilung von Kunststoffbränden dar, dass Hart-PVC und Polyvinylidenchlorid (PVDC) in der Zündflamme brennen, aber außerhalb sofort verlöschen. Weich-PVC dagegen kann, je nach Art und Menge der zugesetzten Additive (insbesondere Weichmacher und Flammschutzmittel), auch ohne Zündflamme weiterbrennen. Neben den Hauptprodukten Kohlenmo-

²⁴ Pyrolyse: Zersetzung chemischer Verbindungen durch sehr große Wärmeeinwirkung.

²⁵ Polyvinylchlorid (PVC): gehört zu den mengenmäßig am meisten verwendeten technischen Kunststoffen. Auf Grund seiner guten mechanischen Festigkeitswerte, seiner recht interessanten chemischen Beständigkeit, seiner guten dielektrischen Eigenschaften und seines günstigen Preises sind vielfältige Anwendungsmöglichkeiten gegeben. Das eher ungünstige Gleitreibungs-Verhalten lässt jedoch keine Gleitfunktionen zu. Hart-PVC lässt sich sehr gut kleben.

²⁶ Sorption: Aufnahme eines Gases oder gelösten Stoffes durch einen anderen festen oder flüssigen Stoff.

noxid (CO), Kohlendioxid (CO₂), Stickstoffoxiden (NO_x), Kohlenstoff (Ruß) und Wasser (H₂O) werden im jeweiligen entstehen darüber hinaus Chlorwasserstoff (HCl), geringe Mengen von Chlorkohlenwasserstoffen (insbesondere Vinylchlorid), andere aliphatische und aromatische Kohlenwasserstoffe (z. B. Methan, Propylen, n-Butan, Buten, Benzol, Toluol, Xylol), Aldehyde und Ketone (Formaldehyd, Acetaldehyd, Benzaldehyd, Salicylaldehyd, Aceton etc.), Phosgen sowie chlorierte Dibenzodioxine und Dibenzofurane.

12.2. Experimentell

Materialien

Der in der vorliegenden Arbeit verwendete kommunale Kunststoffabfall (MWP) wurde aus der japanischen Stadt Niagata in Form von Flaum erhalten, der in Stücke von 2-5 Millimetern geschnitten wurde. Der HVGO-Abfall (Spanne des Siedepunktes: 242-578 °C, S=2,55 %) wurde von der türkischen Raffinerie Tupras-Izmir geliefert. Der Rotschlamm (spezifische Oberfläche = 16 m²/g) stammte aus dem türkischen Betrieb Seydisehir Alumina. Der verwendete feste, saure Katalysator (SA1) ist eine kommerzielle Silikontonerde. Das Eisenkohlenstoffoxid TR97300 wurde von der Toda Industries Co. Ltd. in Japan geliefert.

Methoden

Der thermische und katalytische Abbau von MWP oder MWP/HVGO-Mischungen wurde in zwei unterschiedlichen Prozessen durchgeführt, nämlich dem Einschritt-Prozess sowie dem Zweischritt-Prozess. Der Einschritt-Prozess erfolgte in einem Glasreaktor bei 430°C in Stickstofffluss, hauptsächlich im batch-operation-Betrieb. Die zweistufige Zersetzung der MWP/HVGO-Mischung erfolgte im gleichen Reaktor mit Stickstofffluss bei ebenfalls 430°C, jedoch im semi-batch-operation-Betrieb. Nach der Zersetzung erfolgte die Bindung der Chlorverbindungen im Öl, was von der Versuchsanordnung in einem Festbett-Durchlauf-Reaktor (fixed-bed flowtype) durchgeführten Zersetzung (bei 350°C) von MWP/HVGO abgeleitet wurde. Die entwickelten Chlorwasserstoffverbindungen wurden in einer Flasche eingeschlossen, die eine wässrige Lösung NaOH enthielt und mittels IC analysiert. Die flüssigen Produkte wurden in einem abgestuften Zylinder gesammelt. Die Gasprodukte hatten sich verflüchtigt. Die Zersetzungsprodukte wurden mittels Gaschromatographie analysiert (Yanaca:G6800-FID). Organisches Chlor und Schwefelverbindungen in den flüssigen Erzeugnissen wurden unter Verwendung der Gaschromatographie und Atomspektroskopie (HP:G2350A-AED) analysiert.

12.3. Resultate

Die MWP- und MWP/HVGO-Mischungen wurden bei 430°C mit oder ohne Katalysator abgebaut. Die Katalysatoren Rotschlamm und TR99300 (Eisenkohlen-

stoffoxid) wurden zum Binden der Chlorverbindungen verwendet, die infolge des PVC-Abbaus aus MWP entstanden waren. Im Falle der Degradation²⁷ von MWP trat bei der Abstinenz von Rotschlamm ein erhebliches Schäumen während des Entchlörungsschrittes auf. Eine Mischung aus kohlenstoffhaltigen Partikeln und geschmolzenem Kunststoff wurde aus dem Reaktor ausgeblasen. Bei dem Vorhandensein von Rotschlamm gab es kein drastisches Herausblasen. Demnach ist Rotschlamm ein Chlorsorbent, ferner wurde die Ausbeute im Öl erhöht, die Gas- und Rückstandsmenge verringert.

Die flüssigen Kohlenwasserstoffe entstanden in Abhängigkeit von dem Mischungsverhältnis des Kunststoffabfalls. Sowohl bei der thermischen als auch bei der katalytischen Degradation stammten die Hauptprodukte in der Flüssigkeit von der Degradation von Polypropylen²⁸ (PP) und Polystyrol²⁹ (PS). Im Fall von MWP/HVGO-Mischungen wurden Rotschlamm und TR99300 als Chlorsorbent verwendet. Bei der gemeinsamen Zersetzung von MWP und HVGO wurde ein synergetischer Effekt beobachtet. Die Hinzufügung von Rotschlamm oder von TR99300 führte zu einer Abnahme der flüssigen Ausbeute, allerdings zu einer erhöhten Gas- und Überrestausbeute. Jedoch hatte das Katalysieren keinen beträchtlichen Effekt in der Degradationsrate der MWP/HVGO-Mischungen.

Die organischen Chlorverbindungen in den flüssigen Produkten als Folge der Degradation von MWP- und MWP/HVGO-Mischungen waren hauptsächlich in den Zustandsformen n-C₅ bis n-C₁₁ verteilt. Der Rotschlamm hatte einen großen Effekt bezüglich der Chlormenge. Das Verwenden von Rotschlamm verringerte die Chlormenge drastisch. Im Fall der Degradation von MWP betrug der Chloranteil in den flüssigen Produkten 1.185 ppm bei dem Vorhandensein von Rotschlamm, bei dessen Abwesenheit lagen 7.435 ppm vor. Die HCl-Mengen betrugen 668 bzw. 53 ppm ohne bzw. mit der Verwendung von Rotschlamm. Diese Resultate zeigen, dass der Rotschlamm bei der Adsorption der anorganischen Chlorverbindungen sehr wirkungsvoll ist. Für die MWP/HVGO-Abfälle gilt, dass die Existenz von HVGO keinen beträchtlichen Auswirkungen auf die Chlorverbindungen im Öl hat; jedoch wird die HCl-Entstehung begünstigt. Weil das HVGO als Lösungsmittel diente, wurde HCl bei der Degradation von PVC leichter erkannt. Obgleich TR99300 ein Chlorsorbent ist, war es in der vorliegenden Untersuchung nicht wirkungsvoll. Die Chlormenge im Öl und in den Fallen war fast dieselbe, sowohl mit bzw. ohne den Zusatz von TR99300.

²⁷ Degradation: das [Zurück-]Versetzen in eine niedrigere oder einen Ursprungs-/Ausgangsposition.

²⁸ Polypropylen (PP): ist ein dem Hart-PE eng verwandter thermoplastischer Kunststoff, der u. a. zur Herstellung von Spritzgussteilen, Fasern, Thermoformteilen und Halbzeugen verwendet wird. Im Gegensatz zu Hart-PE zeichnet PP sich durch eine höhere Härte und Steifigkeit aus. PP zeichnet sich durch eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber Chemikalien aus. PP sollte nicht bei Temperaturen um den Gefrierpunkt eingesetzt werden, da der Werkstoff versprödet.

²⁹ Polystyrop (PS): Standard-Polystyrol ist ein harter und formstabiler, aber spröder Thermoplast, gehört zu den preisgünstigsten Kunststoffen und wird auf Grund dessen für spritzgegossene Massenartikel für den täglichen Bedarf sowie als Wegwerfteil angewendet. Für die technische Verwendung kommt PS auf Grund seiner guten dielektrischen Werte vorwiegend in der Elektrotechnik zum Einsatz. PS lässt sich problemlos kleben.

Der Rotschlamm war für das Binden des Chlors sehr wirkungsvoll; der Chlorgehalt wurde auf das sehr niedrige Niveau von 90 ppm verringert.

Die Degradation von MWP in HVGO und die Entchlörung des abgeleiteten Öls wurde in zwei Schritten durchgeführt. Zunächst erfolgte die thermische oder saure katalytische Verminderung (SA1) in einem batch-Reaktor bei 430 °C. Anschließend wurde die Entchlörung der Degradationsprodukte in einem flow-type-Reaktor bei 350°C unter Zugabe des Eisenoxidgemisch-Katalysators (TR99300) und des Abfallproduktes Rotschlamm durchgeführt. Die Verwendung des festen sauren Katalysators (SA1) erhöhte das flüssige Ergebnis. Wurde Rotschlamm als Chlorsorbent verwendet, lagen die Flüssigkeitsergebnisse im Vorhandensein von SA1 bei 62.9% (was auch immer das heißen mag). Bei der katalytischen Degradation (SA1) und der katalytischen Entchlörung (TR99300 und Rotschlamm) wurden keine Chlorverbindungen im Öl als Folge der Degradation von MWP/HVGO-Mischungen nachgewiesen.

Diese Resultate zeigten, dass Rotschlamm und TR99300 nicht die HCl-Entstehung aus PVC dämpfen, beide Stoffe allerdings als ein Katalysator für die Entchlörung der organischen Chlorverbindungen fungieren.

Literatur

ORTNER, HENSLER: *Beurteilung von Kunststoffbränden* (Stand: 07.11.1995). Bayrisches Landesamt für Umweltschutz. Augsburg.

<http://www.bayern.de/lfu/luft/ku-braende/kunststoff6.htm> am 27.09.2002.

YANIK, J., SAGATA, Y., UDDIN, MD. A. (2000): *The Effect of Red Mud on the Liquefaction of Waste Plastics in Heavy Vacuum Gas Oil*. Department of Chemistry, Ege University, Izmir (Turkey), Department of Applied Chemistry, Tsushima Naka, Okayama University, Okayama (Japan).

<http://achem.okayama-u.ac.jp/~reacteng/Azhar/pdf-file/ENFU15-163.pdf>
am 05.09.2002.

YANIK, J., SAGATA, Y., UDDIN, MD. A., MUTO, A. (1999): *Catalytic Liquefaction of Wastoplastics by red-mud*. Department of Chemistry, Ege University, Izmir (Turkey), Department of Applied Chemistry, Tsushima Naka, Okayama University, Okayama (Japan).

http://dicpm.unipa.it/modest/html/symp9/P_9_Th_14.pdf
am 05.09.2002.

<http://www.kunststoffe-beumers.de/thermoplastische-kunststoffe.htm>
am 29.09.2002.

13. Resümee

Die Auswirkungen der Aluminiumgewinnung sind sehr vielfältig (vgl. dazu am Beispiel Brasilien in: *Wirtschaftliche, soziale und kulturelle Rechte indigener Völker. Entwicklungsperspektiven Nr. 59/60, Gesamthochschule Kassel, ELNI (Hrsg.). Kassel Darmstadt 1996*). Kennzeichnend für die Bewertung des Leichtmetalls ist jedoch häufig die Ausblendung der gesamten Produktionslinie „von der Wiege bis zur Bahre“, vielmehr wird die Betrachtung auf die Auswirkungen in unserem unmittelbaren Lebensraum reduziert.

Kritiker des gegenwärtig vorherrschenden Weltwirtschaftssystems der Ressourcenausbeutung, der ökologischen Zerstörung und den wachsenden sozialen Problemen geben diesbezüglich zu bedenken, dass diese Form der Ökonomie auf Dauer nicht aufrecht zu erhalten sein wird. Untermauert wird die Kritik durch folgende Darstellungen:

Zurzeit sind die Industrieländer, die knapp 20 Prozent der Weltbevölkerung stellen, für 75 Prozent der schädlichen Emissionen und für einen verschwenderischen Umgang mit Energie verantwortlich [FR, 1999, S. 7]. Der *Faktor 10-Club* fordert daher eine Reduzierung des Ressourcenverbrauch in den reichen Ländern auf ein Zehntel innerhalb von zwei Generationen, wenn das natürliche System nicht aus dem Gleichgewicht geraten soll. Das *Washingtoner World Resources Institute* ermittelte, dass jeder Bundesbürger 80 Tonnen Rohstoffe pro Jahr bewegt, worin der Wasser- und Luftverbrauch nicht miteingerechnet sind [FR, 1999, S. 6].

Die Menschheit zerstört mit einem Tempo von 29 Hektar pro Minute die tropischen Regenwälder, das entspricht einer Fläche von 40 Fußballfeldern [FR, 1997, S.19]. In dem brasilianischen Bauxit-Abbauggebiet *Saraka* werden jährlich 150 Hektar entwaldet [GhK, ELNI, 1996, S. 226].

Zur Bewertung des Ressourcenaufwandes wurde von dem Wissenschaftler *Friedrich Schmidt-Bleek* der Maßstab MIPS (Material-Input pro Serviceeinheit) erfunden. Der Ressourcenverbrauch wird in einer Kennzahl fixiert, wobei sich alle Produkte und Dienstleistungen bewerten lassen. Ein Beispiel par excellence aus unserer (auto-) mobilen Gesellschaft stellt das Leichtmetallauto dar. Der Ökoprofessor für die Firma AUDI die Öko-Bilanz solcher Automobile durchgerechnet, wie es auch das - besonders in der Automobilpresse - hoch gelobte Drei-Liter-Auto von VOLKSWAGEN darstellt. Gegenüber dem Pendant aus Stahl weist das überwiegend aus den Leichtmetallen Aluminium und Magnesium hergestellte Fahrzeug aufgrund seines geringeren Gewichts zwar einen geringen Kraftstoffverbrauch auf, doch dessen ökologischer Rücksack - so *Schmidt-Bleek* - ist aber viel größer [FR, 1999, S. 6].

Notwendig ist eine Gesellschaftsveränderung, die nach *Harmut Bossel* „sowohl physisch als auch gesellschaftlich nachhaltig ist, die in der Lage ist, das ethnische und kulturelle Spektrum der Menschheit in all seiner Vielfalt zu umspannen, und die darüber hinaus ständige Beränderung und »unbefristete« menschliche Entwicklung erlaubt [BOSSSEL, 1998, S. 27].

Im Geleitwort des Nobelpreisträgers für Wirtschaftswissenschaften *Jan Tinbergen* in dem Bestseller *Die neuen Grenzen des Wachstums* (MEADOWS, D. H., MEADOWS, D. L., RANDERS, J., 1992) gibt der Wissenschaftler zu bedenken: „Für zwei Dinge allerdings gibt es keine Grenzen: keine für die Zahl künftiger Generationen, auf die wir Rücksicht nehmen müssen, und keine für den Erfindungsgeist“ (ebd., S. 7).

Im Rahmen meiner Recherchen bezüglich der Weiterverwendung von Rotschlamm zeigte sich folgendes: Die Publikationen für eine Weiterverwendung dieses Reststoffs in Form neuer Verfahren bzw. Produkten lagen überwiegend zwei bis drei Jahrzehnte zurück. Die Suche nach ebendiesen Erzeugnissen im Internet mit der Suchmaschine *Google* ergaben keine Treffer. Damit zeigt sich, dass es momentan wohl für die kommerzielle Umsetzung keinen Bedarf gibt, weder seitens der Industrie, noch irgendwelcher anderer Institutionen, einschließlich der Hochschulforschung. Beispielsweise wurde im Gespräch mit der Professur für Aufbereitung und Deponietechnik der Universität Clausthal deutlich, dass die Rotschlammproblematik zurzeit wenig attraktiv ist.

Das Anschreiben der größten Aluminiumerzeuger *Alcoa* und *Alcan* wurde nicht einmal beantwortet. Ebenso auf tiefergehende Fragen des Projekts *red mud building materials in Jamaica*, obwohl die Email über die aktuelle Homepage des *Jamaican Bauxite Institute* sowie die *University of Toronto* abgesendet wurde. Ein in Indien entwickelter Verbundwerkstoff, der Rotschlamm beinhaltet, verschwand von der Homepage der Forschungsinstitution, auf der dieses Produkt vor etwa zwei Jahren vollmundig angepriesen wurde; auf Nachfragen über die Homepage via Email erfolgte ebenso keine Reaktion. So wie auch dieses Projekt scheinen alle anderen recherchierten Aktivitäten nicht über das Labor- bzw. Versuchsstadium hinaus gekommen zu sein.

Mit dem Hinweis auf die momentan vorherrschende wirtschaftlich schwierige Zeit scheinen weitere Forschungsaktivitäten – besonders der Konzerne – nicht zumutbar zu sein, womit folglich in Zukunft weder das Aufzeigen und Erschließen neue Anwendungsfelder bzw. deren kommerzielle Umsetzung zu erwarten sind.

Literatur

BOSSEL, HARTMUT (1998): Globale Wende: Wege zu einem gesellschaftlichen und ökologischen Strukturwandel. München: Droemer Knaur.

Frankfurter Rundschau (FR), Nr. 3 vom 04.01.1997.

Frankfurter Rundschau (FR), Nr. 145 vom 26.06.1997.

Frankfurter Rundschau (FR), Nr. 56 vom 08.03.1999.

Frankfurter Rundschau (FR), Nr. 231 vom 05.10.1999.

MEADOWS, D. H., MEADOWS, D. L., RANDERS, J., (1992): Die neuen Grenzen des Wachstums. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt.

Wirtschaftliche, soziale und kulturelle Rechte indigener Völker (1996). Entwicklungsperspektiven Nr. 59/60, Gesamthochschule Kassel, ELNI (Hrsg.). Kassel Darmstadt: Horlemann Verlag.

Weitere Literatur

Aufgrund der Fülle von Informationen, die sich während der Recherche aufzeigten, konnten im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht alle Quellen verfolgt werden. Neben den Zeitschriften *Erzmetall* und *Light Metals* werden nachstehend weitere unberücksichtigte Informationen aufgeführt.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, einige der bisher dargestellten Kapitel in Bezug auf die heutigen, veränderte Rahmenbedingungen zu untersuchen.

removal of acid violet from wastewater by adsorption on waste red mud (Abbau des sauren Farbstoffs violett aus dem Abwasser durch Aufnahme unter dem Einsatz von dem Abfall Rotschlamm).In:

<http://link.springer-ny.com/link/service/journals/00254/contents/01/00411/paper/s002540100411.pdf>
am 05.09.2002.

Hydrodechlorination of tetrachloroethylene over modified red mud: deactivation studies and kinetics, **S. Ordóñez ; H. Sastre ; F.V. Díez**, in: Applied catalysis, Bd. 34 (2002), 3, S. 213-226, insges. 14 S., Sachgruppen: 35

Zeitschrift/Titel: Applied catalysis : an international journal devoted to catalytic science and its applications. B, Environmental. - Amsterdam : Elsevier

ISSN: 0926-3373

Hydration products of alkali-activated slag-red mud cementitious material, **Zhihua Pan ; Lin Cheng ; Yinong Lu ; Nanru Yang**, in: Cement and concrete research, Bd. 32 (2002), 3, S. 357-362, insges. 6 S., Sachgruppen: 56

Zeitschrift/Titel: Cement and concrete research : an internat. journal. - New York, NY [u.a.] : Pergamon Press, ISSN: 0008-8846

Catalytic hydrodechlorination of tetrachloroethylene over red mud

S. Ordóñez ; H. Sastre ; F.V. Díez, in: Journal of hazardous materials, Bd. 81 (2001), 1, S. 103-114, insges. 12 S., Sachgruppen: 51

Zeitschrift/Titel: Journal of hazardous materials. - Amsterdam : Elsevier

ISSN: 0304-3894

The Effect of Red Mud on the Liquefaction of Waste Plastics in Heavy Vacuum Gas Oil, **Jale Yanik ; Md Azhar Uddin ; Yusaku Sakata**, in: Energy & fuels, Bd. 15 (2001), 1, S. 163-169, insges. 7 S., Sachgruppen: 58

Zeitschrift/Titel: Energy & fuels : an American Chemical Society journal. - Washington, DC : ACS, ISSN: 0887-0624

Characterisation and deactivation studies of sulfided red mud used as catalyst for the hydrodechlorination of tetrachloroethylene, **Salvador Ordóñez ; Herminio Sastre ; Fernando V. Díez**, in: Applied catalysis, Bd. 29 (2001), 4, S. 263-274, insges. 12 S., Sachgruppen: 35

Zeitschrift/Titel: Applied catalysis : an international journal devoted to catalytic science and its applications. B, Environmental. - Amsterdam : Elsevier
ISSN: 0926-3373

Statistical Modelling of Sulphuric Acid Leaching of TiO₂, Fe₂O₃ and Al₂O₃ from Red Mud, **E. Sayan ; M. Bayramoglu**, in: Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Bd. 79 (2001), 5, S. 291-296, insges. 6 S., Sachgruppen: 43

Zeitschrift/Titel: Transactions of the Institution of Chemical Engineers. B, Process safety and environmental protection. - Rugby : Inst. of Chem. Engineers
ISSN: 0957-5820

EXTRACTION AND SEPARATION OF Ti(IV) USING THIOPHOSPHINIC ACIDS AND ITS RECOVERY FROM ILMENITE AND RED MUD, **Akash Deep ; Poonma Malik ; Bina Gupta**, in: Separation science and technology, Bd. 36 (2001), 4, S. 671, Sachgruppen: 35

Zeitschrift/Titel: Separation science and technology. - New York, NY : Dekker
ISSN: 0149-6395

Original articles - Red mud of aluminium production waste as basic component of new construction materials, **V.A. Mymrin ; A.J. Vázquez-Vaamonde**, in: Waste management & research, Bd. 19 (2001), 5, S. 465, Sachgruppen: 43

Zeitschrift/Titel: Waste management & research : the official journal of ISWA, the International Solid Waste Association. - Copenhagen : Munksgaard
ISSN: 0734-242X

Bauxite 'red mud' in the ceramic industry. Part 1: thermal behaviour

Vincenzo M. Sglavo ; Renzo Campostrini ; Stefano Maurina ; Giovanni Carturan ; Marzio Monagheddu ; Gerolamo Budroni ; Giorgio Cocco, in: Journal of the European Ceramic Society, Bd. 20 (2000), 3, S. 235-244, insges. 10 S., Sachgruppen: 51

Zeitschrift/Titel: Journal of the European Ceramic Society. - Barking : Elsevier
ISSN: 0955-2219

Bauxite 'red mud' in the ceramic industry. Part 2: production of clay-based ceramics, **Vincenzo M. Sglavo ; Stefano Maurina ; Alexia Conci ; Antonio Salviati ; Giovanni Carturan ; Giorgio Cocco**, in: Journal of the European Ceramic Society, Bd. 20 (2000), 3, S. 245-252, insges. 8 S., Sachgruppen: 51
Zeitschrift/Titel: Journal of the European Ceramic Society. - Barking : Elsevier
ISSN: 0955-2219

Materials Processing - Communication: Formation of Aluminum Titanate-Mullite Composite from Bauxite Red Mud, **T. Mahata ; B.P. Sharma ; S.R. Nair ; D. Prakash**, in: Metallurgical transactions, Bd. 31 (2000), 3, S. 551-553, insges. 3 S., Sachgruppen: 51
Zeitschrift/Titel: Metallurgical transactions. B, Process metallurgy. - Warrendale, Pa., ISSN: 0360-2141

Statistical modeling of sulfuric acid leaching of TiO₂ from red mud, **Enes Sayan ; Mahmut Bayramoglu**, in: Hydrometallurgy, Bd. 57 (2000), 2, S. 181, Sachgruppen: 51
Zeitschrift/Titel: Hydrometallurgy : an internat. journal devoted to all aspects of the aqueous processing of metals. - Amsterdam : Elsevier, ISSN: 0304-386X

CO₂ CAPTURE, UTILIZATION, AND SEQUESTRATION GEOLOGIC-TERRESTRIAL SEQUESTRATION - CARBON DIOXIDE SEQUESTRATION VIA pH REDUCTION OF RED MUD USING LIQUID CO₂, **R. P. Warzinski ; R. M. Enick ; C. Shi ; J. Xu ; E. Beckman ; R. Enick**, in: Preprints of papers presented at the ..., Bd. 45 (2000), 4, S. 703-707, insges. 5 S., Sachgruppen: 35
Zeitschrift/Titel: Preprints of papers presented at the ... National Meeting. - Washington, DC, ISSN: 0569-3772

Effect of phosphate on the hydration of alkali-activated red mud-slag cementitious material, **Gong ; Chunming Yang** in: Cement and concrete research, Bd. 30 (2000), 7, S. 1013-1016, insges. 4 S., Sachgruppen: 58
Zeitschrift/Titel: Cement and concrete research : an internat. journal. - New York, NY [u.a.] : Pergamon Press, ISSN: 0008-8846

Aufsatz: Mössbauer and Infrared Spectroscopy Investigation on Glass Ceramics using Red Mud, Verfasser: **P. Zhang ; J. Yan**, in: Zeitschrift für Metallkunde, Bd. 91 (2000), 9, S. 764-768, insges. 5 S., Sachgruppen: 51

Zeitschrift/Titel: Zeitschrift für Metallkunde : Zeitschrift für die Erforschung und Entwicklung von Werkstoffen und Verfahren in der Werkstoffwissenschaft.
- München : Hanser, ISSN: 0179-4841

Enrichment of titanium dioxide in red mud: a kinetic study, **Pankaj Kasliwal ; P.S.T. Sai**, in: Hydrometallurgy, Bd. 53 (1999), 1, S. 73-88, insges. 16 S., Sachgruppen: 51

Zeitschrift/Titel: Hydrometallurgy : an internat. journal devoted to all aspects of the aqueous processing of metals. - Amsterdam: Elsevier, ISSN: 0304-386X

RECYCLING - ALUMINUM - Integrating Coal Combustion and Red Mud Sintering at an Alumina Refinery, **Viktor L. Rayzman ; Igor K. Filipovich**, in: JOM, Bd. 51 (1999), 8, S. 16-19, insges. 4 S., Sachgruppen: 51

Zeitschrift/Titel: JOM : the journal of the Minerals, Metals & Materials Society.
- Warrendale, Pa. : TMS, ISSN: 0148-6608

Polymers - Effect of addition of polycarbonate on sheared flow of red mud-filled isotactic polypropylene, **Navin Chand ; S.A.R. Hashmi**, in: Bulletin of materials science, Bd. 22 (1999), 4, S. 801-804, insges. 4 S., Sachgruppen: 50

Zeitschrift/Titel: Bulletin of materials science. – Bangalore, ISSN: 0250-4707

The Jamaican Aluminium Industry - Economical, Ecological and Social Aspects - Sustainability - Rehabilitation - Bauxite mining - Red mud disposal, **Jörg H. Schäfer ; Alexander H. Wirtz**, in: Erzmetall, Bd. 52 (1999), 11, S. 596-602, insges. 7 S., Sachgruppen: 57

Zeitschrift/Titel: Erzmetall : Rohstoffgewinnung, Verarbeitung, Recycling, Umwelttechnik. - Clausthal-Zellerfeld : GDMB. ISSN: 0044-2658

Properties of Red Mud Tailings Produced under Varying Process Conditions, **Loretta Y. Li**, in: Journal of environmental engineering, Bd. 124 (1998), 3, S. 254-264, insges. 11 S., Sachgruppen: 43

Zeitschrift/Titel: Journal of environmental engineering. - New York, NY : Soc.
ISSN: 0733-9372

Correlation between silicon dioxide and iron oxide contents of red mud samples, **Sami Sahin**, in: Hydrometallurgy, Bd. 47 (1998), 2-3, S. 371-376, insges. 6 S., Sachgruppen: 51

Zeitschrift/Titel: Hydrometallurgy : an internat. journal devoted to all aspects of the aqueous processing of metals. - Amsterdam : Elsevier, ISSN: 0304-386X

Effect of a commercial peat moss-shrimp wastes compost on pucinellia growth in red mud, **José Fortin ; Antoine Karam**, in: International journal of surface mining, reclamation and environment, Bd. 12 (1998), 3, S. 105-110, insges. 6 S., Sachgruppen: 57

Zeitschrift/Titel: International journal of surface mining, reclamation and environment : JSM. - Rotterdam [u.a.] : Balkema, ISSN: 1389-5265

Dynamic viscoelasticity of red mud filled polypropylene-low density polyethylene blend, **S.A.R. Hashmi ; N. Chand ; T. Kitano**, in: Indian journal of engineering and materials sciences, Bd. 5 (1998), 5, S. 312-318, insges. 7 S., Sachgruppen: 51

Zeitschrift/Titel: Indian journal of engineering and materials sciences. - New Delhi : Council, ISSN: 0971-4588

Effect of blend composition on abrasive wear of red mud filled PP-LDPE blends, **S.A.R. Hashmi ; Navin Chand**, in: Indian journal of engineering and materials sciences, Bd. 5 (1998), 5, S. 319-323, insges. 5 S., Sachgruppen: 51

Zeitschrift/Titel: Indian journal of engineering and materials sciences. - New Delhi : Council, ISSN: 0971-4588

High stress wear studies on addition of polycarbonate in red mud filled isotactic polypropylene, **Navin Chand ; S.A.R. Hashmi**, in: Indian journal of engineering and materials sciences, Bd. 5 (1998), 5, S. 324-328, insges. 5 S., Sachgruppen: 51

Zeitschrift/Titel: Indian journal of engineering and materials sciences. - New Delhi : Council, ISSN: 0971-4588

Phosphate removal from aqueous solutions using red mud wasted in bauxite Bayer's process, **B. Koumanova ; M. Drame ; M. Popangelova**, in: Resources, conservation and recycling, Bd. 19 (1997), 1, S. 11-20, insges. 10 S., Sachgruppen: 43

Zeitschrift/Titel: Resources, conservation and recycling. - Amsterdam [u.a.]: Elsevier, ISSN: 0921-3449

Removal of congo red from wastewater by adsorption onto waste red mud, **C. Namasivayam ; D.J.S.E. Arasi**, in: Chemosphere, Bd. 34 (1997), 2, S. 401-418, insges. 18 S., Sachgruppen: 38

Zeitschrift/Titel: Chemosphere : chemistry, biology and toxicology as related to environmental problems. - Kidlington, Oxford : Elsevier Science

ISSN: 0045-6535

Leachability and immobilisation of Beryllium from solid waste (red-mud) generated in processing Beryl, **P.N. Bhat ; K.C. Pillai**, in: Water, air, & soil pollution, Bd. 94 (1997), 3-4, S. 297-306, insges. 10 S., Sachgruppen: 43

Zeitschrift/Titel: Water, air, & soil pollution : an internat. journal of environmental pollution. - Dordrecht [u.a.] : Kluwer, ISSN: 0049-6979

The investigation of sulphuric acid sorption recovery of scandium and uranium from the red mud of alumina production, **D. I. Smirnov ; T.V. Molchanova**, in: Hydrometallurgy, Bd. 45 (1997), 3, S. 249-260, insges. 12 S., Sachgruppen: 51

Zeitschrift/Titel: Hydrometallurgy : an internat. journal devoted to all aspects of the aqueous processing of metals. - Amsterdam : Elsevier, ISSN: 0304-386X

Preparation of Iron Rich Cements Using Red Mud, **M. Singh ; S.N. Upadhyay ; P.M. Prasad**, in: Cement and concrete research, Bd. 27 (1997), 7, S. 1037-1046, insges. 10 S., Sachgruppen: 56

Zeitschrift/Titel: Cement and concrete research : an internat. journal. - New York, NY [u.a.] : Pergamon Press, ISSN: 0008-8846

Furnace Smelting and Extractive Metallurgy of Red Mud: Recovery of TiO₂, Al₂O₃ and Pig Iron, **E. Erçag ; R. Apak**, in: Journal of chemical technology and biotechnology, Bd. 70 (1997), 3, S. 241-246, insges. 6 S., Sachgruppen: 58

Zeitschrift/Titel: Journal of chemical technology and biotechnology : JCTB ; international research in process, environmental and monitoring technology. - Chichester, Sussex : Wiley, ISSN: 0142-0356

Development of a Pozzolan Pigment from Red Mud, Verfasser: **J. Pera ; R. Boumaza ; J. Ambroise**, in: Cement and concrete research, Bd. 27 (1997), 10, S. 1513-1522, insges. 10 S., Sachgruppen: 56

Zeitschrift/Titel: Cement and concrete research : an internat. journal. - New York, NY [u.a.] : Pergamon Press, ISSN: 0008-8846

PROBLEMS AND PROSPECTS OF RED MUD UTILISATION

P. M. Prasad ; S. Subramanian, in: Transactions of the Indian Institute of Metals, Bd. 50 (1997), 5, S. 427, Sachgruppen: 51

Zeitschrift/Titel: Transactions of the Indian Institute of Metals. - Calcutta
ISSN: 0019-493X

Research Summary: Recovering Metals from Red Mud by Thermal Treatment and Magnetic Separation, **Paolo Plescia ; Dante Maccari**, in: JOM, Bd. 48 (1996), 1, S. 25-28, insges. 4 S., Sachgruppen: 38

Zeitschrift/Titel: JOM : the journal of the Minerals, Metals & Materials Society.
- Warrendale, Pa. : TMS, ISSN: 0148-6608

Application of factorial design of experiments to the quantitative study of tensile strength of red mud filled PP-LLDPE blends, **S.A.R. Hashmi ; A.K. Majumdar ; N. Chand**, in: Journal of materials science, Bd. 15 (1996), 15, S. 1343-1345, insges. 3 S., Sachgruppen: 51

Zeitschrift/Titel: Journal of materials science. Letters. - London : Chapman & Hall, ISSN: 0261-8028

Hydrocracking of Arabian Mix Asphaltenes in the Presence of Modified Red Mud, **T. Butz**, in: Fuel science & technology international, Bd. 14 (1996), 9, S. 1219-1236, insges. 18 S., Sachgruppen: 58

Zeitschrift/Titel: Fuel science & technology international. - New York, NY : Dekker, ISSN: 0884-3759

Chemical reaction bonding of building blocks using red mud and orthophosphoric acid binder, **J. L. Gumaste ; B.C. Swain ; B.C. Mohanty ; J.S. Murty**, in: Journal of materials science, Bd. 15 (1996), 19, S. 1667-1668, insges. 2 S., Sachgruppen: 51

Zeitschrift/Titel: Journal of materials science. Letters. - London : Chapman & Hall, ISSN: 0261-8028

Effect of bauxite properties on the settling of red mud, **L.Y. Li ; G.K. Rutherford**, in: International journal of mineral processing, Bd. 48 (1996), 3-4, S. 169-182, insges. 14 S., Sachgruppen: 38

Zeitschrift/Titel: International journal of mineral processing. - Amsterdam : Elsevier, ISSN: 0301-7516

Influence of red mud particle incorporation on viscoelasticity of PS-LDPE blend, **N. Chand ; S.A.R. Hashmi ; S.R. Vashishtha**, in: Indian journal of engineering and materials sciences, Bd. 3 (1996), 6, S. 253-257, insges. 5 S., Sachgruppen: 51

Zeitschrift/Titel: Indian journal of engineering and materials sciences. - New Delhi : Council, ISSN: 0971-4588

A preliminary investigation of strength development in Jamaican red mud composites, **J.N. Gordon ; W.R. Pinnock ; M.M. Moore**, in: Cement & concrete composites, Bd. 18 (1996), 6, S. 371-380, insges. 10 S., Sachgruppen: 56

Zeitschrift/Titel: Cement & concrete composites. - Barking, Essex : Elsevier

ISSN: 0958-9465

SEM observations of tensile fractographs of red mud filled linear low density polyethylene, **S.A.R. Hashmi ; N. Chand**, in: Journal of materials science, Bd. 14 (1995), 5, S. 377, Sachgruppen: 51

Zeitschrift/Titel: Journal of materials science. Letters. - London : Chapman & Hall, ISSN: 0261-8028

The sorption recovery of scandium from red mud, **D.I. Smirnov ; T.V. Molchanova ; L.I. Vodolazov**, in: Cvetnye metally, (1995), 10, S. 44-46, insges. 3 S., Sachgruppen: 51

Zeitschrift/Titel: Cvetnye metally : organ Narodnogo Komissariata Cvetnoj Metallurgii. - Moskva : Gos. Ob'edinnoe Naucno-Techniceskoe Izdat.

ISSN: 0372-2929

The Utilization of Red Mud as a Construction Material, **M. Kara**, in: Tile & brick international, Bd. 11 (1995), 3, S. 185-187, Sachgruppen: 01

Zeitschrift/Titel: Tile & brick international : TBI. - Freiburg, Br. : Schmid

ISSN: 0178-2223

Effectiveness of Acidic Industrial Wastes for Reclaiming Fine Bauxite Refining Residue (Red Mud), Jonathan **W.C. Wong ; G.E. Ho**, in: Soil science, Bd. 158 (1994), 2, S. 115-123, insges. 9 S., Sachgruppen: 38

Zeitschrift/Titel: Soil science. - Baltimore, Md. : Williams & Wilkins

ISSN: 0038-075X

Catalytic hydrogenation of anthracene oil with red mud, **J.J. Llano ; R. Rosal ; H. Sastre ; F.V. Díez**, in: Fuel, Bd. 73 (1994), 5, S. 688-694, insges. 7 S.

Sachgruppen: 58

Zeitschrift/Titel: Fuel : the science and technology of fuel and energy. - Guildford : IPC Science and Technology Pr., ISSN: 0016-2361

Recovery of titanium dioxide from red mud, **Pradeep K. Maitra**, in: Industry and environment, Bd. 16 (1993), 3, S. 42-45, insges. 4 S., Sachgruppen: 43

Zeitschrift/Titel: Industry and environment. - UNEP DTIE, ISSN: 0378-9993

Recovering Metals from Red Mud Generated during Alumina Production, **Luigi Piga ; Fausto Pochetti ; Luisa Stoppa**, in: JOM, Bd. 45 (1993), 11, S. 54-59, insges. 6 S., Sachgruppen: 38

Zeitschrift/Titel: JOM : the journal of the Minerals, Metals & Materials Society.
- Warrendale, Pa. : TMS, ISSN: 0148-6608

Use of waste gypsum in the revegetation on red mud deposits: a greenhouse study, **J.W.C. Wong ; G.E. Ho**, in: Waste management & research, Bd. 11 (1993), 3, S. 249-256, insges. 8 S., Sachgruppen: 43

Zeitschrift/Titel: Waste management & research : the official journal of ISWA, the International Solid Waste Association. - Copenhagen : Munksgaard
ISSN: 0734-242X

Production of Building Materials Using Red Mud, **J. L. Gumaste; B. C. Swain; B.C. Mohanty; J. S. Murthy**, in: Chemical engineering world, Bd. 28 (1993), 10, S. 59-60, insges. 2 S. Sachgruppen: 58

Zeitschrift/Titel: Chemical engineering world : CEW ; India's foremost technical journal for chemical & processing industry. - Bombay : Industr. Publicat.
ISSN: 0009-2517

LADOK – ENTWICKLUNGSPERSPEKTIVEN

VERZEICHNIS DER LIEFERBAREN SCHRIFTEN

- 50 J. Dandler, J.R. Hernandez, P.L. Swepston: Rechte indigener Völker. Zum Abkommen 169 der OIT. 1994, 114 S., € 8,20
- 51/52 Alberto Chirif T., Pedro García, Richard Chase Smith (Hrsg.): Der Indianer und sein Territorium. 1994, 230 S., € 13,30
- 53 Projektgruppe: Tropenholz in Kassel. Deutschland und die Ökologie der Welt. 1994, 94 S., € 6,10
- 54 Martin Hartmann: Der moderne Kannibalismus, Futtermittelimporte und regionale Agrarstruktur. 1994, 65 S., € 5,10
- 55 Ute Wilke: Indianische Völker Boliviens und "Entwicklung" – Kritische Betrachtung des Weltbankprogrammes "Tierras Bajas del Este" und Auswirkungen auf die Ayoréo-Indianer. 1994, 144 S., € 8,20
- 56 Ute Wilke: Ein indianisches Lesebuch. Zweisprachig, 1995, 64 S., € 6,10
- 57 Guilherme Costa Delgado: Süd-Süd Dialog, Anmerkungen zu den Perspektiven portugiesischsprachiger Länder. 1995, 21 S., € 4,10
- 58 Clarita Müller-Plantenberg (Hrsg.): Indigene Perspektiven – Eine Debatte der Organisationen indigener Völker des Amazonasbeckens. 1996, 51 S., € 5,10
- 59/60 GhK + Elni (Hrsg.): Wirtschaftliche, soziale und kulturelle Rechte indigener Völker. 1996, 274 S., € 14,30
- 61 A. Achito, G. Alonso Velez, A. Alvarez Aristizabal u.a.: Kollektive geistige Eigentumsrechte und Biodiversität. 1997, 111 S., € 7,20
- 62 Alfredo Wagner Berno de Almeida: Soziale Bewegungen und Staat im brasilianischen Amazonasgebiet. 1998, 33 S., € 4,10
- 63 Isabel Guillen Pinto: Die Aluminiumproduktion in Venezuela. Externalisierte Kosten zu Lasten von Gesellschaft und Natur. 1998, 116 S., € 7,20
- 64 Sabine Meißner: Produktlinienanalyse als ökonomisches Instrument – exemplifiziert am Waschmitteltensid Plantaren. 1998, 145 S., € 9,20
- 65 Jörg Handrack: Genossenschaftlicher Zinnbergbau in Bolivien. Internationale Sonderstellung und Perspektiven im Vergleich zum brasilianischen Zinnbergbau. 1998, 68 S., € 5,10
- 66/67 Eva Becker: Umwelt und Konsum. Einstellung und Verhalten der Deutschen zur Umwelt. 1998, 143 S., € 9,20
- 68 Kashyapa A.S. Yapa: Prähispanische Ingenieurtechnik in Lateinamerika und ihre Bedeutung für die Gegenwart. 2000, 73 S., € 6,10
- 69/70 Wolfram Heise: Die Rechtssituation indigener Völker in Chile. Eine rechtsethnologische Analyse der chilenischen Indianergesetzgebung (Nº 19.253) von 1993 vor dem Hintergrund der Schutzbestimmungen im Völkerrecht. 2000, 365 S., € 16,40
- 71/72 Dieter Gawora: Urucu. Soziale, ökologische und ökonomische Auswirkungen des Erdöl- und Erdgasprojektes Urucu im Bundesstaat Amazonas (Brasilien). 2001, 314 S., € 14,30

- 73/74 Klima-Bündnis e.V., ONIC, CECOIN: Erdöl-, Erdgas-, Bauxit-, Kohle- und Goldförderung auf indigenen Territorien. Kolumbien, Peru und Venezuela. 2004, 142 S., € 15,00
- 75 Marcelo Sampaio Carneiro: Bäuerliche Landwirtschaft und Großprojekte. Die 90er Jahre im Bundesstaat Maranhão (Brasilien). 2002, 32 S., € 5,00.
- 76 Anja Umbach-Daniel: Biogasgemeinschaftsanlagen in der deutschen Landwirtschaft. Sozio-ökonomische und kulturelle Hemmnisse und Fördermöglichkeiten einer erneuerbaren Energietechnik. 2002, 194 S., € 12,00
- 77/78 Clarita Müller-Plantenberg: Zukunft für Alle ist möglich. Soziale Gerechtigkeit und nachhaltiger Naturbezug als grenzübergreifende Herausforderungen. Kassel 2003, 206 S. plus Kartenwerk, € 25,00
- 79 DAAD: Universities and Rio + 10 – Paths of sustainability in the regions, an interdisciplinary challenge. Kassel 2003, 178 S. +plus CD-ROM, € 15,00
- 80 H. Feldt, D. Gawora, A. Nufer u.a.: Ein anderes Amazonien ist möglich. Träume, Visionen und Perspektiven aus Amazonien, Zusammengetragen zum 60. Geburtstag von Clarita Müller-Plantenberg. Kassel 2003, 176 S., € 11,00
- 81/82 Franziska Zimmermann: Baumplantagen zur Zellstoffproduktion. Sozio-ökologische und wirtschaftliche Auswirkungen in Venezuela. Kassel 2005, 217 S., € 13,-
- 83/84 Clarita Müller-Plantenberg, Wolfgang Nitsch, Irmtraud Schlosser, Loccumer Initiative Kritischer WissenschaftlerInnen: Solidarische Ökonomie in Brasilien und Europa – Wege zur konkreten Utopie. Internationale Sommerschule Imshausen. Kassel 2005, 229 S., € 13,00
- 85/86 Clarita Müller-Plantenberg: Solidarische Ökonomie in Europa – Betriebe und regionale Entwicklung. Internationale Sommerschule Imshausen. Kassel 2007, 296 S., € 15,00
- 87 Viviana Inés Uriona: Solidarische Ökonomie in Argentinien nach der Krise von 2001 – Strategische Debatten und praktische Erfahrungen. Kassel 2007, 104 S., € 10,00

SONDERDRUCKE:

Clarita MÜLLER-PLANTENBERG (Hrsg.): Indianergebiete und Großprojekte in Brasilien. Kassel 1988, 527 S., für Institute € 30,70, für Einzelpersonen € 25,60

Projektgruppe "Ökologie und Entwicklung" der GhK (Hrsg.): Amazonien – eine indianische Kulturlandschaft, 1988, € 5,10

Bezugsadresse:
 Universität Kassel
 FB 5, Lateinamerika-Dokumentationsstelle
 34109 Kassel
 Tel.: 0561/804-3152
 Fax: 0561/804-3464
 Email: eperspektiven@uni-kassel.de