



Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 7189

Gipsreduktion mit Kohlenstoff

**Rahmenbedingungen für die
Verwertung mineralischer Reststoffe
mit Sulfatgehalt und potenzielle
Einsatzstoffe für ein GRC-Verfahren**

E. Gasafi, U. Jeske, T. Reinhardt
Institut für Technische Chemie

März 2006

Forschungszentrum Karlsruhe

in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 7189

Gipsreduktion mit Kohlenstoff

**Rahmenbedingungen für die Verwertung
mineralischer Reststoffe mit Sulfatgehalt und
potenzielle Einsatzstoffe für ein GRC-Verfahren**

Edgar Gasafi, Udo Jeske, Tim Reinhardt

Institut für Technische Chemie

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

2006

Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)

ISSN 0947-8620

urn:nbn:de:0005-071897

Zusammenfassung

Gipsabfälle und gipshaltige Abfälle fallen beim Abbruch von Gebäuden in größeren Mengen an. Für den Fall einer Einschränkung der Möglichkeit zur Deponierung dieser Abfälle aus Gründen der Vorsorge vor unerwünschten Austauschreaktionen mit Sulfationen müssen Ersatzverwertungswege vorhanden sein oder zur Verfügung gestellt werden. Ein möglicher Verwertungspfad ist die Reduktion von Gipsabfällen unter Rückgewinnung von Schwefel in Form von Schwefeldioxid bei gleichzeitiger Herstellung von Zement. Das produzierte Schwefeldioxid kann in weiteren Prozessschritten veredelt werden, zum Beispiel zu Schwefelsäure. Das infragekommende Verfahren ist als Müller-Kühne Verfahren oder auch Gips-Schwefelsäure-Verfahren bekannt. Eine Modifikation und Weiterentwicklung des Konzeptes ist das Verfahren zur Gipsreduktion mit Kohlenstoff (GRC), welches hier betrachtet wird.

Im Rahmen dieser Arbeit werden systemanalytische Untersuchungen zu den Rahmenbedingungen des GRC-Verfahrens durchgeführt. Es werden die wesentlichen Einsatzstoffe und Produkte des Verfahrens unter Berücksichtigung möglicher Verfahrensvarianten analysiert. Ein wirtschaftlicher Betrieb der GRC-Anlage wird durch Erlöse für die eingesetzten Abfälle auf der einen und den Verkauf hochwertiger Produkte auf der anderen Seite angestrebt. Zur Beurteilung des Konzeptes sind daher die Verfügbarkeit der einsetzbaren Stoffe, die zu beachtenden umwelt- und abfallrechtlichen Regelungen, mögliche Erlöse für die Verwertung, sowie die Absatzmöglichkeiten der entstehenden Produkte bei jeweiliger Berücksichtigung absehbarer Trends zu untersuchen.

Gypsum Reduction with Carbon (GRC) - General Conditions for the Management of Gypsum-Containing Waste and Potential Feedstocks for GRC

Abstract

Gypsum scrap and gypsum-containing waste arises when buildings are demolished. In case disposal on landfills of such kind of waste is restricted or forbidden to prevent undesired reactions with sulfate ions, disposal or recycling alternatives have to be identified. One possible option is to reduce gypsum waste to sulfur dioxide and to simultaneously produce cement. The sulfur dioxide may be refined subsequently to further high-value products, such as sulfuric acid. This process is known as Müller-Kühne process or Gypsum Sulfuric Acid Process. A modification and further development of the technology is the concept of Gypsum Reduction with Carbon (GRC) analysed here.

Under the present project, the boundary conditions of the GRC process are analysed. The main input and output materials are investigated considering different process layouts. An economically efficient operation of a GRC-plant is envisaged by receiving revenues for the waste input material and selling the high-value products on the market. The assessment of the process concept therefore includes an analysis of the availability of input material for conversion, the sales potentials of the products, cement and sulfuric acid, and of future trends of input and output material flows. Both waste legislation and environmental aspects are considered.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	1
2	Gipsschwefelsäure-Anlage als Vorläufer einer GRC-Anlage	5
2.1	Das Gipsschwefelsäure-Verfahren und modifizierte Konzepte	5
2.2	Stoffströme einer Gipsschwefelsäure-Anlage.....	7
2.3	Vergleich mit konventionellen Verfahren	9
2.4	Mögliche Auswirkungen durch den CO ₂ -Emissionshandel.....	10
3	Rahmenbedingungen für die Verwertung von Bau- und Abbruchabfällen	15
3.1	Abfallrecht.....	15
3.2	Einbauklassen nach LAGA	16
3.3	Existierende Boden-Konzentrationen als Orientierung für neue Grenzwerte	18
3.4	Immissionsschutzrecht und Genehmigung.....	19
3.5	Fazit für gipshaltige RC-Gesteinskörnung.....	20
4	Problemhintergrund Gipsverwertung in Bodensubstraten.....	21
5	Haupteinsatzstoffe und Produkte einer GRC-Anlage.....	23
5.1	Gipshaltige Einsatzstoffe aus dem Bauschutt	23
5.1.1	Übersicht der Gipsströme in Deutschland	24
5.1.2	Gipsströme aus dem Bausektor für das GRC-Verfahren	25
5.1.3	Gipsanteile und -mengen im Bauschutt.....	28
5.1.4	Verwertungs- und Beseitigungsmöglichkeiten für reinen Gips	29
5.1.5	Vorabsieb und Brechsand von aufbereitetem Bauschutt.....	32
5.2	Einsatzstoff Sekundärbrennstoff.....	33
5.2.1	Zur Verfügung stehenden Mengen an kontaminiertem Altholz.....	33
5.2.2	Mögliche Erlöse aus der Mitverbrennung kontaminierten Altholzes	34
5.3	Produkt Zement	36
5.4	Produkte Schwefelsäure und Oleum	39
5.5	Fazit für Haupteinsatzstoffe und Produkte.....	41
6	Analyse der Kosten	43
6.1	Vorgaben für die Wirtschaftlichkeitsanalyse	43
6.2	Ergebnisse.....	47
6.3	Sensitivitätsanalyse	49
6.4	Vergleich mit dem Sekundärrohstoff-Verwertungszentrum Schwarze Pumpe	51
7	Zusammenfassung.....	53
8	Literaturverzeichnis	57
Anhang 1:	Lysimeterversuche zum Einsatz von Flugasche und REA-Gips im Landschaftsbau	67
Anhang 2:	Zementherstellung	73
Anhang 3:	Schwefelsäureherstellung	75

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2-1:	Rohmehlzusammensetzung und -mengen einer Gipsschwefelsäureanlage mit einem Nenndurchsatz von 160000 t/a Rohmehl	8
Tabelle 2-2:	Sekundärbrennstoffzusammensetzung und -mengen einer Gipsschwefelsäureanlage mit einem Nenndurchsatz von 160000 t/a Rohmehl	9
Tabelle 3-1:	Auswahl an Rechtsvorschriften für die Deponierung von Abfällen	15
Tabelle 3-2:	Vorschläge für Sulfat-Grenzwerte orientiert an Konzentrationen in Böden aus Verwertungsmaßnahmen und zum Vergleich bestehende Regelungen	18
Tabelle 3-3:	Genehmigung einer Anlage zur Herstellung von Zementklinker und Schwefelsäure	20
Tabelle 4-1:	Konditionierung der Ausgangsubstrate durch Pelletierung mit Hilfe von Portland-Zement	21
Tabelle 4-2:	Konzentration ausgewählter Ionen in der Bodenlösung [Grotheer 2000]	21
Tabelle 5-1:	Altholzkategorien und entsprechend Mengenaufkommen an Holz in den einzelnen Kategorien	34
Tabelle 5-2:	Ergebnisse im Überblick: Verfügbarkeit, Nachfrage, Preise und Tendenzen der Haupteinsatzstoffe und Produkte	42
Tabelle 6-1:	Wichtigste Annahmen für die Wirtschaftlichkeitsanalyse	44
Tabelle 6-2:	Materialströme und Erlöse einer Gipsschwefelsäureanlage	45
Tabelle 6-3:	Betriebskosten einer Gipsschwefelsäureanlage mit einem Durchsatz von 160 kt/a Rohmehl.	46
Tabelle 6-4:	Kosten und Erlöse einer Gipsschwefelsäureanlage mit einem Durchsatz von 160 kt/a Rohmehl.	47
Tabelle 8-1:	Herkunft der Kraftwerksreststoffe für die Lysimeterversuche	67
Tabelle 8-2:	Toxizitätsklassen für das aquatische Ökosystem [Wachs 1988]	69
Tabelle 8-3:	pH-Werte der beteiligten Stoffe und Lysimeterwerte	70
Tabelle 8-4:	Schwermetallgehalte der Substrate und der Einzelkomponenten	71

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-1:	Prinzip des Gips-Schwefelsäure-Verfahrens	5
Abbildung 2-2:	Massenströme einer Gipsschwefelsäureanlage	7
Abbildung 2-3:	Vergleich des Gipsschwefelsäure-Verfahrens mit konventioneller Zementherstellung	10
Abbildung 5-1:	Gipsflüsse in Deutschland	25
Abbildung 5-2:	Vereinfachte Darstellung der betrachteten Gipsströme aus dem Bausektor	26
Abbildung 5-3:	Verwertungs- und Beseitigungsmöglichkeiten von reinem Gips und deren Preise	31
Abbildung 5-4:	Preisentwicklung für kontaminiertes Altholz bei Abnahme größerer Mengen frei Verwerter, Auswertung von EUWID-Recycling und Entsorgung 1997-2004.	35
Abbildung 5-5:	Weltproduktion an hydraulischem Zement nach Angaben in [van Oss 2002]	37
Abbildung 5-6:	Entwicklung der Zementabsatzes in Deutschland von 1980 – 2003, nach Angaben des statistischen Bundesamtes und des Bundesverbandes der Deutschen Zementindustrie	38
Abbildung 5-7:	Produktion von Schwefelsäure in Deutschland; Auswertung verschiedener Quellen [Müller 1999;Kitto 2004;ESA/EFMA 2000].	40
Abbildung 6-1:	Zementherstellungskosten in Abhängigkeit möglicher Einnahmen für den eingesetzten Gipsabfall	48
Abbildung 6-2:	Ergebnis der Sensitivitätsanalyse für die Kostenrechnung einer Gipsschwefelsäureanlage	50
Abbildung 8-1:	Schema der Zementherstellung	73
Abbildung 8-2:	Allgemeine Darstellung der Schwefelsäureherstellung	75
Abbildung 8-3:	Prinzipieller Aufbau einer Doppelkontakanlage mit vorgeschalteter Schwefelverbrennung.	76

1 Einleitung

Beim Abbruch von Gebäuden fallen Gipsabfälle und gipshaltige Abfälle in größeren Mengen an. Reiner Gips kann dabei durch selektive Gebäudedemontage als sehr konzentrierter und gering verunreinigter Gips erhalten werden. Gips im gemischten Bauschutt wird z. B. durch Baugips oder Fließestrich verursacht und wird beim Anfall mit anderen Stoffen an der Abfallhauptabfallkomponente zugeordnet. Falls es aus Gründen der Vorsorge vor unerwünschten Austauschreaktionen mit Sulfationen zu einer Einschränkung der Deponierungsmöglichkeit solcher Gipsabfälle bzw. gipshaltigen Abfälle kommt, müssen Ersatzverwertungswege vorhanden sein oder zur Verfügung gestellt werden. Die Analyse eines möglichen Verwertungspfad, der Reduktion von Gipsabfällen unter Rückgewinnung von Schwefel in Form von Schwefeldioxid bei gleichzeitiger Herstellung von Zement, ist Thema dieses Berichtes.

Als Problemhintergrund wurden Bodenschutzbestimmungen mit Auswirkungen auf das Regelwerk der Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) und auf die Verwertung von Gipsabfällen identifiziert.

a) **Problemhintergrund Bodenschutzbestimmungen und LAGA:**

Die Heranziehung des LAGA-Regelwerkes ergab sich aus der gegenwärtigen Diskussion um die Überarbeitung und teilweise Verschärfung einiger Eluat-Werte als Zuordnungswerte von Bauschutt [LAGA Mitteilung 20] zu den Verwertungsklassen (Einbauklassen). Dies ist Folge der Anpassung der LAGA/LAWA-Regelungen an das Bundesbodenschutzgesetz als Teile des dazugehörigen untergesetzlichen Regelwerkes insbesondere nach der Einführung des Geringfügigkeitsschwellenkonzepts (GAP-Papier [GAP 2002]). Hierbei wird auch die Verschärfung der Sulfatgrenzwerte bzw. -zuordnungswerte erwogen.

Gemischter Bauschutt aus dem Hochbau enthält stets einen Gipsanteil, der von der Verwendung gipshaltiger Bauprodukte herrührt. Dies könnte in der Abfallwirtschaft zu der Konsequenz führen, dass mit einer Verschärfung von Zuordnungswerten, u.a. der Sulfatwerte, das bisherige Recycling von Bauschutt aus dem Hochbau im Tiefbau/Straßenbau stark eingeschränkt werden könnte. Mangels sichtbarer Alternativen könnte die verstärkte Deponierung von Bauschutt die Folge sein. Hinsichtlich des Bodenschutzes wäre dies zunächst vorteilhaft. Im Hinblick auf das Nachhaltigkeitsziel der Ressourcenschonung hingegen nachteilig.

b) Problemhintergrund Gipsverwertung in Bodensubstraten:

Bei der Problemdefinition wurden Resultate der Dissertation von Grotheer [Grotheer 2000] zur Umweltverträglichkeit von Kraftwerksreststoffen bei ihrem Einsatz im Landschaftsbau berücksichtigt. Danach kommt es beim Zusammentreffen von Gips mit Flugasche und geringen Anteilen Zement in Bodensubstraten verstärkt zur Auswaschung von Schadstoffen (Schwermetallspurenelementen). Die bestehenden LAGA-Zuordnungswerte (für Chromat etc.) für den uneingeschränkten Einbau werden dabei überschritten. Die Ergebnisse der Arbeit [Grotheer 2000] führten zur der Besorgnis, dass Gips, der a) vermischt mit anderen Stoffen als Bestandteil von RC-Stoffen recycelt oder b) auf nicht ausreichend gesicherten Deponien abgelagert und evtl. dort unglücklich vermischt wird, bei bestimmten Stoffkombinationen (z.B. Gips und Beton) unter Umständen und über eine längere Zeit betrachtet ebenfalls solche verstärkten Schwermetall-Auswaschungen hervorrufen könnte. Hier würde es sich dann um ein potentielles Umweltproblem handeln, das im Sinne der Vorsorge zu untersuchen wäre.

Aus der Veranlassung und den formulierten Besorgnissen ergeben sich folgende, miteinander verbundene Fragestellungen:

Fragestellungen zur Begründung der Besorgnis:

Lässt sich die formulierte Besorgnis der möglicherweise verstärkten Auslösung von Schwermetallen aus Bauschutt aus den Ergebnissen der Arbeit [Grotheer 2000] substantiell untermauern? Sind Analogieschlüsse auf gipshaltige Baustellen- und Abbruchabfälle möglich?

Fragestellungen zum Verbleib gipshaltiger Abfälle:

Welche Auswirkungen hätten verschärfte Zuordnungs- bzw. Grenzwerte (Sulfat etc.) auf den Verbleib von Gipsabfällen bzw. gipshaltigen Abfällen, insbesondere Baustellen- und Abbruchabfällen?

Fragestellungen zum GRC-Verfahren:

Aufgrund der formulierten Besorgnis hinsichtlich der möglicherweise durch die Anwesenheit von Gips verursachten verstärkten Auslösung von Schwermetallen aus anderen Stoffen soll im Sinne der Vorsorge untersucht werden, welchen Beitrag das GRC-Verfahren zur Problemvermeidung leisten kann.

Insbesondere soll in dieser Arbeit ein Überblick darüber gewonnen werden,

- welche Mengen gipshaltiger Bauabfälle einer Behandlung nachhaltig (im Sinne einer gleichmäßigen Versorgung) zugeführt werden können,
- welcher Anteil am infragekommenden Gipsstrom dies ist,
- ob ein Endmarkt für die erzeugten Produkte vorhanden ist, der sich vor allem durch einen konkurrenzfähigen Produktpreis und absetzbare Mengen ausdrückt und folglich, ob ein wirtschaftlicher Betrieb einer GRC-Anlage möglich ist,
- welche Rahmenbedingungen dafür erfüllt sein müssen.

In diese Erwägungen sind mögliche konkurrierende Managementstrategien bzw. konkurrierende Verfahrenstechniken zur Verwertung der Abfallgipse und gipshaltigen Abfälle einzubeziehen. Dabei ist die Gewinnung eines Überblickes über die in Frage kommenden sulfathaltigen Einsatzstoffe für ein GRC-Verfahren insbesondere aus dem Bausektor notwendig.

2 Gipsschwefelsäure-Anlage als Vorläufer einer GRC-Anlage

Das GRC-Verfahren (Gypsum reduction with carbon- GRC) ist eine Modifikation des Gipsschwefelsäure-Verfahrens (auch als Müller-Kühne-Verfahren bezeichnet), für das es jahrelange Betriebserfahrungen gibt. Das Gipsschwefelsäure-Verfahren ist in der Literatur gut dokumentiert, sodass die Analyse des GRC-Verfahrens aufbauend auf diesen Erfahrungen und Informationen durchgeführt werden kann.

2.1 Das Gipsschwefelsäure-Verfahren und modifizierte Konzepte

Das Gipsschwefelsäure-Verfahren basiert auf der reduzierenden Spaltung von Calciumsulfat mit Kohlenstoff oberhalb einer Temperatur von 700 °C. Das Verfahren findet ähnlich wie bei der konventionellen Zementherstellung im Gegenstrom in einem Drehrohrofen statt. Abbildung 2-1 zeigt ein prinzipielles Verfahrensschema des Gips-Schwefelsäure-Verfahrens. Zur Information ist in Anhang 2 eine Beschreibung der konventionellen Produktion von Zement zu finden.

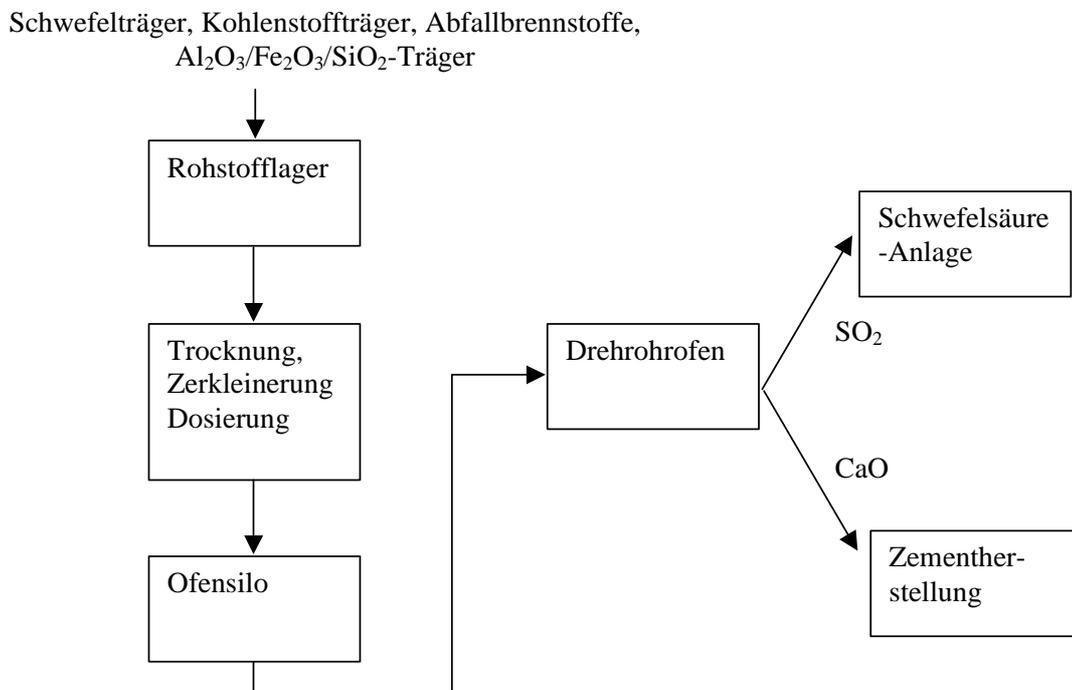
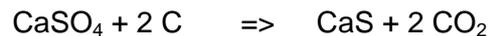


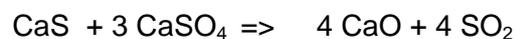
Abbildung 2-1: Prinzip des Gips-Schwefelsäure-Verfahrens

Anhand der Hauptreaktionen wird im Folgenden ein Überblick über das Verfahren gegeben. Ausführliche Beschreibungen des Verfahrens und der Reaktionsbedingungen sind in der Literatur zu finden, z.B. [Haase 1987;Fleischer et al. 1995b;Klauss 2000].

Die chemischen Reaktionen laufen in unterschiedlichen Temperaturbereichen ab. Im Temperaturbereich von 700 und 900°C findet der Umsatz mit Kohlenstoff entsprechend Gleichung 1 statt [Klauss 2000].



Bei höheren Temperaturen (bis 1200 °C) reagiert das gebildete Calciumsulfid mit Calciumsulfat zu Calciumoxid und Schwefeldioxid:



Das CaS besteht nur als Zwischenprodukt, sodass die Gesamtreaktion als Summe der Teilreaktionen wie folgt lautet:



Die Bildung von Zementklinkern erfordert beim Gipsschwefelsäure-Verfahren Temperaturen von 1250°C [Klauss 2000]. In einer anderen Quelle werden Temperaturen von 1400 bis 1450 °C zur Klinkerbildung als notwendig erachtet [Fleischer et al. 1995b].

Während das ursprüngliche Müller-Kühne Verfahren reines Calciumsulfat und Koks als Einsatzstoffe vorsah [Kühne 1949], sind im Laufe der Jahre zahlreiche verfahrenstechnische und konzeptionelle Modifikationen vorgenommen worden, um eine bessere stoffliche Ausbeute und, durch den Einsatz von gipshaltigen Abfällen und Sekundär-brennstoffen, eine erhöhte Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zu erreichen. Ein Beispiel für eine derartige Veränderung ist der OSW-Krupp Process, der die Verwendung von Phosphorgips vorsieht [Anon 1977]. Anlagen nach diesem Konzept wurden in Südafrika und Linz realisiert. Eine weitere Verfahrensvariante ist der Marchon-Prozess [Kouloheris 1981], der dem Verfahren OSW-Krupp Process sehr ähnlich ist, jedoch Anhydrit als Gipsquelle verwendet.

Ein Verfahrenskonzept mit geänderten Reaktionspartnern und Produkten wird durch den ISU-Prozess vorgeschlagen [Kouloheris 1981;Kouloheris 1982;Wheelock und Boylan 1960]. Dabei wird eine Reduzierung von Gips durch Kohlenmonoxid erreicht. Als Reaktionsprodukt wird im Gegensatz zum klassischen Müller-Kühne-Verfahren, der die Produktion von Zement zum Ziel hat, die Herstellung von Kalk in einem 2-stufigem Wirbelbett angestrebt. Als weiteres Produkt entsteht SO_2 , das weiter veredelt werden kann. Das Verfahren ist patentrechtlich geschützt [Wheelock und Boylan 1963;Wheelock und Boylan 1971].

Das Konzept der Gipsreduktion mit Kohlenstoff (GRC) setzt, ähnlich wie der zuvor genannte ISU-Prozess, bei der Verwendung von Kohlenmonoxid zur Reduktion von Gips an. Diese Verfahrenstechnik verspricht eine drastische Reduzierung der Verweilzeit [Cesnovar 2004].

2.2 Stoffströme einer Gipsschwefelsäure-Anlage

Als Basis für die Untersuchung der Stoffströme werden die ein- und austretenden Massenströme einer Gipsschwefelsäureanlage herangezogen. Die untersuchten Ströme, die dem früheren Betrieb der Gipsschwefelsäureanlage BTF-Wolfen [Meininger 2000] entsprechen, sind in Abbildung 2-2 zusammengetragen. Der Nenndurchsatz der Anlage beträgt 160 kt Rohmehl pro Jahr mit einem Anteil gipshaltiger Abfälle von 72,5 %. Hinzu kommen 32 kt/a Sekundärbrennstoffe und 15 kt/a Rücksäuren. Als Produkte entstehen 100 kt/a Zement und 70 kt/a Schwefelprodukte (Schwefelsäure und Oleum).

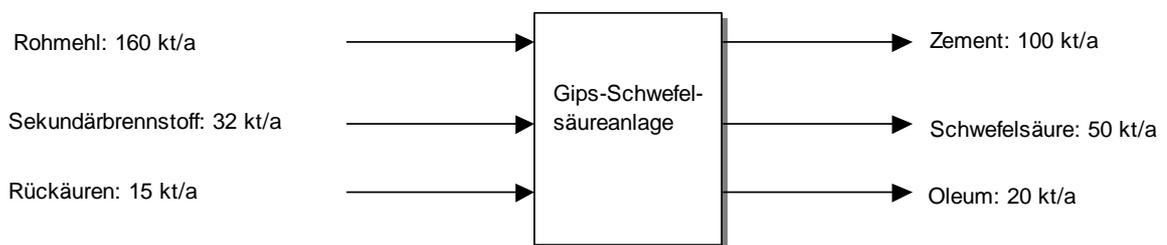


Abbildung 2-2: Massenströme einer Gipsschwefelsäureanlage

Das verwendete Rohmehl einer Gipsschwefelsäureanlage setzt sich aus unterschiedlichen Gipsabfällen, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ -Träger, sowie Kohlenstoffträgern zusammen.

Eine mögliche Rohmehlzusammensetzung besteht zu etwa 73 % aus Gipseinsatzstoffen (vgl. Tabelle 2-1), wie Sprühabsorptionsprodukt, Chemie-Gips, Feuchtgips sowie Gips-Karton [Meininger 2000].

Tabelle 2-1: Rohmehlzusammensetzung und -mengen einer Gipsschwefelsäureanlage mit einem Nenndurchsatz von 160000 t/a Rohmehl

Rohmehl -Komponente	Anteil an Rohmehl [%]	Mengen [t/a]
Sprühabsorptionsprodukt	40	64000
Chemie-Gips	7,5	12000
Feuchtgips	15	24000
Gips-Karton	10	16000
Summe Gipsprodukte	72,5	116000
Wirbelschichtaschen	10	16000
Braunkohleflugasche	7,5	12000
Filter-St.	3,5	5600
Glas	0,5	800
Kat.-SiO ₂	2,5	4000
A-Kohle	3,5	5600
Summe Rest Mineralien	27,5	44000

Quelle: [Meininger 2000]

Die übrigen Einsatzstoffe sind Al₂O₃/Fe₂O₃/SiO₂ - sowie Kohlenstoffträger und bestehen aus Wirbelschichtaschen, Braunkohleflugasche, Filter-Stäuben, gebrauchten Katalysatormassen (Katalysator-SiO₂) sowie Aktiv-Kohle. Die erforderliche Menge an Al₂O₃/Fe₂O₃/SiO₂ wird durch die geforderte Zusammensetzung des Zementklinkers bestimmt.

Als Brennstoffe für das Gips-Schwefelsäureverfahren werden nahezu ausschließlich Abfallbrennstoffe, wie Altöle, Lösemittelgemische, Teerteichöle, Destillationsrückstände, Säureharze und Sägemehl, eingesetzt. Ein möglicher Brennstoffmix für die Gipsschwefelsäureanlage/ GRC-Anlage besteht zu 50% aus nicht näher spezifiziertem Sägemehl, 20% Destillationsrückständen, 22% Teerölen und 8 % Lösemitteln [Meininger 2000]. In Tabelle 2-2 sind zu der Gipsschwefelsäureanlage mit einem Nenndurchsatz von 160000 t/a Rohmehl die entsprechende Sekundärbrennstoffzusammensetzung und -mengen zusammengetragen.

Tabelle 2-2: Sekundärbrennstoffzusammensetzung und -mengen einer Gipsschwefelsäureanlage mit einem Nenndurchsatz von 160000 t/a Rohmehl

Brennstoff-Komponente	Anteil am Sekundärbrennstoff [%]	Mengen [t/a]
Sägemehl	50	10000
Destillationsrückstände	20	4000
Teeröle	22	4400
Lösemittel	8	1600
Summe	100	20000

Quelle: [Meininger 2000]

Für die Verwendung beim GRC sind zunächst nur die Stoffströme an reinem Gips nach den Erfahrungen mit dem Müller-Kühne-Verfahren prinzipiell verwertbar. Inwieweit sich auch gipshaltige Abfälle mit einem hohen Inertstoffanteil mit diesem Verfahren verwerten lassen bedarf einer vertieften verfahrenstechnischen Untersuchung, was nicht Gegenstand dieser Arbeit ist.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Stoffe Gips aus Bau- und Abbruchabfällen als Haupteinsatzstoff, kontaminiertes Altholz als möglicher Sekundärbrennstoff, sowie die Produkte Zement und Schwefelsäure näher untersucht.

2.3 Vergleich mit konventionellen Verfahren

Die Wettbewerbsfähigkeit eines neu entwickelten Verfahrens zeigt sich im Vergleich zu den auf dem Markt etablierten Verfahren, die dem Stand der Technik entsprechen. Das Gipsschwefelsäure-Verfahren produziert sowohl Zement, als auch Schwefelsäure. Gleichzeitig werden Gipsabfälle verwertet. Ein Vergleich mit dem Stand der Technik muss daher unter Berücksichtigung dieser drei Funktionen des Verfahrens erfolgen.

Als Nachteil des Gips-Schwefelsäureverfahrens bzw. dessen Modifikationen, im Vergleich zur konventionellen Zementherstellung wird der erhöhte Energieverbrauch des Gipsschwefelsäure-Verfahrens aufgrund der deutlich höheren Dissoziationsenergie (thermische Zersetzungsenergie) von CaSO_4 im Vergleich zu CaCO_3 angeführt [Hull et al. 1957; Bhattacharya 1976]. Ein derartiger Vergleich ist jedoch ohne die Verrechnung mit der Schwefelsäureherstellung und der Gipsverwertung/-beseitigung nicht zulässig. Vielmehr sind sämtliche Funktionalitäten des Verfahrens zu betrachten. Abbildung 2-3

zeigt die zu berücksichtigenden Systeme beim einem Vergleich des Gipsschwefelsäure-Verfahrens mit der konventionellen Zementherstellung.

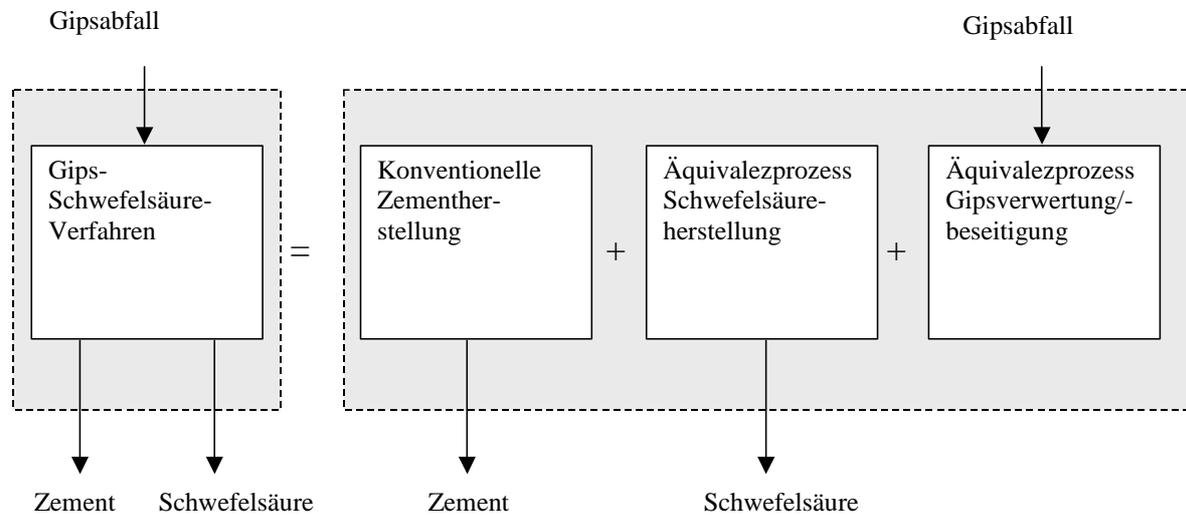


Abbildung 2-3: Vergleich des Gipsschwefelsäure-Verfahrens mit konventioneller Zementherstellung

Eine vereinfachte Gegenüberstellung des Müller-Kühne-Verfahrens und der Zementherstellung unter dem Gesichtspunkt der CO₂-Emissionen und des Einflusses des Emissionshandels auf die Kosten wird in Abschnitt 2.4 durchgeführt. Für eine genauere Untersuchung des Verfahrens unter den Gesichtspunkten Energieverbrauch und sämtlicher Umweltauswirkungen wäre ein Systemvergleich mit konventionellen Verfahren unter Berücksichtigung der Funktionen Zementherstellung, Schwefelsäureherstellung und Verwertung von Gips durchzuführen.

2.4 Mögliche Auswirkungen durch den CO₂-Emissionshandel

Die Herstellung von Zementklinker wird im Anhang 1 des Gesetzes zur Umsetzung der Richtlinie 2003/87/EG über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft (Treibhausgas-Emissionshandels-Gesetz – TEHG) vom 15. Juli 2004 als eine der energieintensiven industriellen Tätigkeitsbereiche festgelegt (Anhang 1 – Mineralverarbeitende Industrie – Anlagen zur Herstellung von Zementklinker mit einer Produktionsleistung von mehr als 500 Tonnen je Tag in Drehrohröfen oder mehr als 50 Tonnen pro Tag in anderen Öfen) [TEHG 2004]. Anlagen zur Herstel-

lung von Zementklinker werden daher auch im nationalen Allokationsplan berücksichtigt und von den Regelungen des Zuteilungsgesetzes (ZuG 2007) bzw. der Zuteilungsverordnung (ZuV 2007) erfasst [ZuG 2007, ZuV 2007].

Für die Produktion von Zementklinker wird überwiegend auf Kalkstein (CaCO_3) zurückgegriffen, aus dem im energieaufwendigen Brennprozess der s.g. „Branntkalk“ (CaO) entsteht. Bei der Produktion einer Tonne Zementklinker wird in etwa 1 Tonne Kohlendioxid (CO_2) emittiert. Diese Emissionen setzen sich aus zweierlei Anteilen zusammen, die im Sinne des TEHG unterschiedliche Berücksichtigung finden:

- Aus der Verbrennung von Energieträgern resultieren rund 0,47 Tonnen CO_2 je Tonne Zementklinker; dieser Anteil der Emissionen unterliegt vollständig den o.g. gesetzlichen Regelungen und ist damit Gegenstand der Vorgaben zur Emissionsminderung laut ZuG 2007.
- Aus der stofflichen Umwandlung des CaCO_3 zum CaO resultieren 0,53 Tonnen CO_2 je Tonne Zementklinker (0,78 Tonnen CO_2 aus der chemischen Umwandlung x 0,68 Massenanteil des CaO im Zementklinker). Dieser Anteil der Emissionen wird im Rahmen der Zementherstellung als „prozessbedingt“ angesehen; der produktbezogene Emissionsfaktor (hier: 0,53 Tonnen prozessbedingtes Kohlendioxid je Tonne Zementklinker) ist u.a. in §6 Abs. 2 der ZuV 2007 festgeschrieben. Einem Zement herstellenden Unternehmen werden die für diese prozessbedingten Emissionen erforderliche Emissionszertifikate im vollen benötigten Umfang zur Verfügung gestellt. Auf diese Emissionen wird der „Erfüllungsfaktor“ zur Minderung der erlaubten Emissionen nach ZuG 2007 nicht angewandt.

Aus der Aufbereitung und Verwertung von gipshaltigen Baureststoffen mit dem Müller-Kühne-Verfahren resultiert neben Schwefelsäure als weiteres Produkt ebenfalls Branntkalk (CaO), der dann zur Herstellung von Zementklinker dient. Allerdings wird bei diesem Verfahren anstelle von Kalkstein (CaCO_3) als Rohstoff Gips (CaSO_4) eingesetzt. Der Stöchiometrie der chemischen Reaktion folgend werden in diesem Verfahren je Tonne produziertem CaO nur 0,39 Tonnen CO_2 freigesetzt (im Vergleich zu 0,78 Tonnen CO_2 beim Einsatz von Kalkstein. Bezogen auf das Produkt Zementklinker reduzieren sich die tatsächlichen prozessbedingten CO_2 -Emissionen je Tonne Zementklinker auf 0,2652 Tonnen ($0,39 \times 0,68$).

Der Umfang und die Zuteilung der Emissionszertifikate für die prozessbedingten Emissionen bei der Zementherstellung erfolgt unabhängig vom Ausgangsmaterial und dem Herstellungsverfahren:

- Werden zukünftig in einer bestehenden Anlage 100.000 Tonnen Zementklinker im konventionellen Verfahren aus CaCO_3 hergestellt, so erhält der Betreiber Emissionszertifikate für rund 53.000 Tonnen Kohlendioxid zur Deckung seiner prozessbedingten Emissionen.
- Werden ebenfalls 100.000 Tonnen Zementklinker mit CaO aus der Verwertung von gipshaltigen Baureststoffen nach dem Müller-Kühne-Verfahren bzw. GRC-Verfahren hergestellt, so wird dem Betreiber die identische Anzahl an Emissionszertifikaten zur Deckung der prozessbedingten Emissionen (53.000 Tonnen Kohlendioxid) zur Verfügung gestellt. Tatsächlich benötigt der Betreiber aber lediglich Zertifikate für 26.520 Tonnen CO_2 ; die überschüssigen Zertifikate für 26.480 Tonnen CO_2 kann der Betreiber am Markt für Emissionszertifikate verkaufen. Bei einem angenommenen Marktwert der Zertifikate von etwa 5 EUR je Tonne CO_2 entspricht dies einem Gegenwert von 132.400 EUR.

Bezogen auf den Anteil der prozessbedingten Emissionen kann im Vergleich zu konventionellen Verfahren die Herstellung von Zementklinker aus gipshaltigen Baureststoffen mit dem Müller-Kühne- bzw. GRC-Verfahren einen Geldwertevorteil von derzeit 1,3 EUR je Tonne Zementklinker verbuchen. Diesem Vorteil stehen aber ein höherer Energiebedarf (der hier nicht genauer beschrieben werden soll) und - damit verbunden - auch eine größere Menge energiebedingter Kohlendioxidemissionen gegenüber, auf welche ggf. der Erfüllungsfaktor laut ZuG 2007 anzuwenden ist.

Laut ZuG 2007 ist für die Zuteilungsperiode 2005 – 2007 der Erfüllungsfaktor 0,9709 anzuwenden¹. Dies bedeutet, dass Anlagen, auf deren Emissionen dieser Erfüllungsfaktor Anwendung findet, mit Emissionszertifikaten im Umfang von 97,09 % ihrer historischen Emissionen (Basisperiode ist der Zeitraum 2000 – 2002) ausgestattet werden. Sie müssen also entweder die Emissionen zukünftig um 2,91 % reduzieren oder in entsprechendem Umfang Zertifikate am Markt zukaufen. Aufgrund einer unerwartet großen Menge beantragter Zertifikate für die Zuteilungsperiode 2005 – 2007 wurde darüber hinaus ein Anpassungsfaktor (0,9538) eingeführt. Dieser wird zusätzlich auf

¹ Auf Antrag wird der Erfüllungsfaktor für die prozessbedingten Emissionen nicht angewendet, d.h. der Erfüllungsfaktor wird gleich 1 gesetzt [ZuG 2007]

den Erfüllungsfaktor angewendet und vermindert nochmals den Umfang der zugeteilten Zertifikate.

Es ist absehbar, dass ein Anteil der mit dem Müller-Kühne- bzw. GRC-Verfahren „eingesparten“ Zertifikate für prozessbedingte Emissionen zur Deckung der erhöhten energiebedingten Emissionen eingesetzt werden müssen.

3 Rahmenbedingungen für die Verwertung von Bau- und Abbruchabfällen

3.1 Abfallrecht

Das Abfallrecht regelt im Fall der mineralischen Abfälle die Entsorgung, insbesondere die Deponierung (Beseitigung) und die Verwertung als Versatzmaterial. Die entsprechenden Rechtsvorschriften sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 3-1: Auswahl an Rechtsvorschriften für die Deponierung von Abfällen

Rechtsvorschrift	Erläuterung
TA Abfall [TA Abfall 1991]	Verwaltungsvorschrift zum Umgang mit besonders überwachungsbedürftigen Abfällen (1991)
TA Siedlungsabfall [TA Sied 1993]	Verwaltungsvorschrift für die Entsorgung von Siedlungsabfällen (1993)
Ablagerungsverordnung [AbfAbIV 2001]	Ablagerung von Siedlungsabfällen (2001)
Deponieverordnung [DepV 2002]	Deponien und Langzeitlager (2002)
Versatzverordnung [VersatzV 2002]	Verwertung von Abfällen als Versatz unter Tage unter Bergaufsicht (2002)

Die Inhalte der verschiedenen Rechtsvorschriften beziehen sich zum Teil auf das Abfallgesetz, abgelöst durch das KrW-/AbfG im Jahr 1994. Außerdem enthalten die in Tabelle 3-1 aufgeführten Vorschriften zum Teil ähnliche Inhalte, so dass eine unübersichtliche Rechtslage entsteht.

Des Weiteren beinhalten die in Tabelle 3-1 genannten Rechtsvorschriften spezielle Vorgaben für die abzulagernden Abfälle. Die Vorgabe der TA Siedlungsabfall [TA Sied 1993] entsprechen denen der Ablagerungsverordnung [AbfAbIV 2001]. Die Ablagerungsverordnung gestattet einen rechtssicheren Betrieb von Mechanisch-Biologischen Abfallbehandlungsanlagen (MBA), in dem zusätzlich Kriterien für die Ablagerung der biologisch behandelten Fraktion vorgegeben werden.

Die Anforderungen der einzelnen Rechtsvorschriften beziehen sich u.a. auf die mechanischen Eigenschaften der Abfälle, Eluatwerte und Konzentrationen bestimmter

Substanzen. Für Sulfat gibt es keine direkten Vorgaben, allerdings wird Sulfat z.B. bei der Leitfähigkeit miterfasst.

Aufgrund einer Entscheidung des Rats der Europäischen Union [2003/33/EG] in Ergänzung zur europäischen Deponierichtlinie [1999/31/EG] werden die Ablagerungsverordnung und die Deponieverordnung voraussichtlich geändert. Die Zuordnungskriterien der deutschen Verordnungen entsprechen nicht den umfangreicheren europäischen Vorgaben. Im Gegensatz zu den existierenden deutschen Verordnungen enthält die Entscheidung 2003/33/EG des Rats z. B. Sulfatgrenzwerte für das Auslaugverhalten. Weitere Vorgaben betreffen die anzuwendenden Prüfverfahren. Entsprechend der Entscheidung 2003/33/EG können die Mitgliedsstaaten bestimmen, welches der fünf vorgeschlagenen Prüfverfahren eingesetzt wird. Keines der möglichen Prüfverfahren ist mit dem bisherigen deutschen Elutionstest [DIN 38414] exakt identisch. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist noch nicht geklärt, wie die Entscheidung des Rats im Detail umgesetzt werden wird. Eine fristgemäße Umsetzung in Deutschland bis zum 15. Juli 2005 ist vorgesehen.

Eine Einschätzung der Marktsituation für die Entsorgung, d.h. die Verwertung bzw. Beseitigung, von mineralischen Abfällen auf Deponien ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt schwierig. Es ist davon auszugehen, dass die Abfallablagerungsverordnung die Mengenströme der Siedlungsabfälle verändern wird, denn eine Deponierung unbehandelter Siedlungsabfälle ist nach dem 01.06.2005 nicht mehr erlaubt. Andere Verordnungen, wie z.B. die Altholzverordnung, Altfahrzeugverordnung oder die Gewerbeabfallverordnung, haben ebenfalls einen Einfluss auf die Abfallmengen, die in der Vergangenheit auf Deponien abgelagert wurden.

Zusätzlich wird die zukünftige Entsorgungssituation für mineralische Abfälle durch die neue Deponieverwertungsverordnung entscheidend beeinflusst werden, denn der im KrW-/AbfG festgeschriebene Vorrang der Abfallverwertung wird verstärkt auf den Entsorgungsweg der Deponierung anwendbar sein. Weitere Änderungen auf europäischer Ebene sind abzuwarten, denn die europäische Abfallrahmenrichtlinie [75/442/EWG] als rechtliche Basis für den Umgang mit Abfällen wird zur Zeit überarbeitet.

3.2 Einbauklassen nach LAGA

Die LAGA-Mitteilung 20 [LAGA20 2004] legt Einbauklassen für die Verwertung von mineralischen Abfällen fest, wozu auch rezyklierte Gesteinskörnungen aus Bauschutt-

aufbereitungsanlagen gehören². Je nach Schadstoffbelastung werden die mineralischen Abfälle in die Klassen Z0 (uneingeschränkter Einbau), Z1 (offener Einbau mit Z1.1 für ungünstige hydrologische Gegebenheiten und Z 1.2 für belastete Flächen mit Werten größer Z1.1) sowie Z2 (Eingeschränkter Einbau mit technischen Sicherungsmaßnahmen) eingeteilt. Überschreiten die Schadstoffgehalte die Zuordnungswerte Z2, müssen die mineralischen Abfälle bzw. die rezyklierten Gesteinskörnungen von der Verwertungsoption ausgeschlossen und entweder weiter aufbereitet werden, um die Schadstoffgehalte zu mindern oder auf geordneten Deponien zur Ablagerung gebracht werden. Dies gilt nur insoweit, als die Bundesländer die LAGA-Mitteilung 20 in Kraft setzen. Nicht alle Bundesländer haben dies bisher so gehandhabt. So hat z.B. Baden-Württemberg in zwei Erlassen eigene Zuordnungswerte für Stoffe, vgl. Tabelle 3-2, Einbausituationen und den Produktstatus rezyklierter Gesteinskörnung festgelegt [Bauschutt BaWü 2004].

Die Anpassung des LAGA-Regelwerkes an die Regelungen für den Boden- und Grundwasserschutz nach dem Bundesbodenschutzgesetz und dem Wasserhaushaltsgesetz [GAP 2002], [Bertram 2003]³ basiert auf jeweils einzuhaltenden Geringfügigkeitsschwellen im Sickerwasser, abgebildet durch den Bodensättigungsextrakt, aus dem das zugehörige Konzentrationsäquivalent im S 4-Eluat abgeleitet wird. Als Folge des Geringfügigkeitsschwellenkonzepts müssen die Grenzwerte einiger Schwermetalle, und - hier insbesondere interessierend - auch der von Sulfat herabgesetzt werden.

Um die Folgen dieser Verschärfung der Grenzwerte bzw. der Zuordnungswerte für das bestehende Recycling abschätzen zu können, wurden beim Bayerischen Recyclingverband Analysen von Prüfzeugnissen zu den Verteilungen rezyklierter Gesteinskörnung auf die verschiedenen Einbauklassen durchgeführt ([Weber 2001], zum Kontext [Weil 2004]). Entscheidend für die Einordnung in die entsprechenden Einbauklassen waren neben den Schwermetallgehalten (z.B. Cr, Cu, Hg) insbesondere der Sulfatgehalt. Würden die vorgeschlagenen Werte des LAGA-Entwurfs [LAGA TR Boden 2003] übernommen, so wären besonders die Änderungen des Sulfat-Grenzwertes für das Recycling folgenreich. Dies betrifft insbesondere die Bauabfälle aus dem Hochbau, da hier aus verschiedenen Altbaustoffen (z.B. Putze, Mörtel, Estrich, Beton) Sulfat ausgewaschen werden kann.

² Die Recyclingbranche wehrt sich gegen die gesetzliche Abfalleigenschaft rezyklierter Gesteinskörnung und verlangt stattdessen einen Produktstatus.

Tabelle 3-2: Vorschläge für Sulfat-Grenzwerte orientiert an Konzentrationen in Böden aus Verwertungsmaßnahmen und zum Vergleich bestehende Regelungen

Z0/Z1.1	Z1.2	Z2	Quelle
k.A./200	400	600	[Bauschutt BaWü 2004] (Erlass)
50/150	300	600	[LAGA 2004] (gültige Regelung, Werte 1997)
20	40	100	[LAGA TR Boden 2003] (Entwurf)
	50	200	[Doetsch und Leuchs 2004] (Vorschlag)

(Angaben in mg/l im Eluat)

Die Folge der Änderung der Grenzwerte bzw. Zuordnungswerte in Richtung LAGA TR Boden 2003 wäre, dass die bislang als Z2, aber auch als Z1.2 (Sulfat 150-300 mg/l im Eluat) eingestuft rezyklierten Gesteinskörnungen (insgesamt je 86%, 77% und 87 % der untersuchten rezyklierten Gesteinskörnungen) zukünftig in eine Klasse größer Z2 (Sulfat > 100 mg/l im Eluat) hochgestuft würden und somit von einer Verwertung ausgeschlossen wären. Dies führte zu der Besorgnis, dass dadurch die bisherige Recyclingwirtschaft im Bausektor massiv beeinträchtigt würde, wenn nicht sogar ganz zum Erliegen käme [ISTE 2004].

3.3 Existierende Boden-Konzentrationen als Orientierung für neue Grenzwerte

Auf Druck der Recyclingwirtschaft wurden modifizierte Vorschläge gemacht, die sich an existierenden Konzentrationen in natürlichen Böden aus Verwertungsmaßnahmen in Deutschland orientieren. Diese liegen bei Sulfat zwischen 5-300 mg/l im S4-Eluat [Doetsch und Leuchs 2004].

Daraus resultierend wurden Grenzwerte bzw. Zuordnungswerte vorgeschlagen, die zwischen den Werten der bestehenden LAGA Mitteilung 20 [LAGA20 1997] und der zum Schutz des Bodens vorgeschlagenen Werte liegen [Doetsch und Leuchs 2004]. Dieser Kompromiss ergibt eine Verschärfung der Sulfatzuordnungswerte für den offenen Einbau (Z0/Z1.1) von 50/150 mg/l S4-Eluat auf 20 mg/l S4-Eluat, für schon belastete Flächen (Z1.2) von 300 mg/l S4-Eluat auf 50 mg/l S4-Eluat und für den Einbau

³ H.U.Bertram, Umweltministerium Niedersachsen, war Obmann der Bund/Länder-AG im Rahmen der LAGA "Vereinheitlichung der Untersuchung und Bewertung von mineralischen Abfällen" (sog. LAGA-AG "Mineralische Abfälle")

mit technischen Sicherungsmaßnahmen (Z2) von 600 mg/l S4-Eluat auf 200 mg/l S4-Eluat.

Diese Vorschläge zur TR Boden führten im Laufe des Jahres 2004 zu keiner Einigung⁴. So ist z.B. Baden-Württemberg mit den beschriebenen Erlassen den Bedenken der Recyclingindustrie entgegengekommen und hat die Zuordnungswerte im offenen Einbau heraufgesetzt, vgl. Tabelle 3-2. Würde sich diese Position bundesweit auf lange Sicht durchsetzen, so könnte sogar mehr RC-Gesteinskörnung als bisher im offenen Einbau (Z1.1/Z1.2) verwertet werden.

Die Umweltministerkonferenz (UMK) hat die LAGA TR Boden auf ihrer Sitzung im November 2004 zwar zur Kenntnis genommen, jedoch nicht angenommen. Gleichzeitig hat die UMK beschlossen, den Bund zu bitten, eine Bundes-Verwertungsverordnung zu erlassen⁵.

3.4 Immissionsschutzrecht und Genehmigung

Für eine Genehmigung einer großtechnischen Produktionsanlage, die sowohl Zementklinker als auch Schwefelsäure produziert, existieren entsprechend der 4. BImSchV [4. BImSchV 2004] im Prinzip zwei Varianten, die in der Tabelle 3-3 dargestellt sind.

⁴ Die LAGA hat auf ihrer 82. Sitzung des Abfalltechnikausschusses (ATA) am 23./24. März 2004 die LAGA-Arbeitsgruppe "Mineralische Abfälle" aufgelöst und damit einer Verordnung des Bundes zur Verwertung mineralischer Abfälle den Weg bereitet.

⁵ Die Wirtschaftsministerkonferenz (WMK) fordert im Dezember 2004 ebenfalls eine bundeseinheitliche Regelung und die Verknüpfung der zu schaffenden TR Boden mit der TR Bauschutt. Zuvor soll es kein Vorpreschen einzelner Länder geben. Gescheitert ist damit auch der Versuch, Fachleute aus der betroffenen Wirtschaft in die Unterarbeitsgruppen einzubeziehen. In der Übergangsphase wird der fortgeschriebene Allgemeine Teil (Stand: 06.11.2003) zusammen mit den Teilen II und III (Stand: 06.11.1997) veröffentlicht.

Tabelle 3-3: Genehmigung einer Anlage zur Herstellung von Zementklinker und Schwefelsäure

Variante	Eintrag 4. BImSchV, Spalte 1
1	<p>2. Steine und Erden, Glas, Keramik, Baustoffe</p> <p>2.3 Anlagen zur Herstellung von Zementklinker oder Zementen</p>
2	<p>4. Chemische Erzeugnisse, Arzneimittel, Mineralölraffination und Weiterverarbeitung</p> <p>4.1. Anlagen zur Herstellung von Stoffen oder Stoffgruppen durch chemische Umwandlung in industriellem Umfang, insbesondere ...</p> <p>m zur Herstellung von Säuren wie Chromsäure, Flusssäure, Phosphorsäure, Salpetersäure, Salzsäure, Schwefelsäure, Oleum, schwefelige Säuren, ...</p>

Die Genehmigung kann im Prinzip als Anlage zur Schwefelsäureherstellung mit dem Nebenprodukt Zementklinker erfolgen. Oder der Zementklinker stellt das Hauptprodukt und die Schwefelsäure das Nebenprodukt dar, so dass für die Genehmigung die Anlage als Zementproduktionsanlage aufgefasst wird.

Im Rahmen des Immissionsschutzrechts ist für die Mitverbrennung von Abfällen bei Hochtemperaturprozessen die Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen [17. BImSchV 2003] zu beachten. Diese Verordnung wurde für die Umsetzung der europäischen Verbrennungsrichtlinie [RL 2000/76] 2003 neu gefasst. Eine wesentliche Veränderung ist die weitgehende Abschaffung der sogenannten Mischungsregel, die eine Emissionsgrenzwertberechnung aus verschiedenen deutschen Rechtsvorschriften vorsah.

3.5 Fazit für gipshaltige RC-Gesteinskörnung

Für gipshaltigen Bauschutt würde eine Verschärfung der Grenz- bzw.- Zuordnungswerte bedeuteten, dass geringere Mengen an gipshaltigem Bauschutt in Form von RC-Gesteinskörnung in den teiloffenen Einbau gelangen würden als bisher und damit eine gewisse Umweltentlastung erreicht würde. Gleichzeitig würden größere Mengen Bauschutt in sonstige Verwertungsmaßnahmen als bisher fließen oder zu deponieren sein. Die Folge wäre ein verstärkter Einsatz von natürlicher Gesteinskörnung in den bisherigen Einsatzbereichen. Dass sich aus den Änderungen im Abfallrecht ein zusätzlicher Druck zur Behandlung gipshaltiger Abfälle ergibt ist eher nicht zu erwarten.

4 Problemhintergrund Gipsverwertung in Bodensubstraten

In einem Projekt „Bodensubstrat im Landschaftsbau“, im Jahr 1989 von den EVUs Nordwürttembergs und Nordbadens in Auftrag gegeben, wurden Kraftwerksreststoffe aus Kohlekraftwerken mit unterschiedlicher Entschwefelungstechnik auf ihre Eignung als Einsatzstoffe im Landschaftsbau untersucht [Grotheer 2000]. Dabei wurden Pellets als Bodensubstrate aus Gips und Flugasche in vergleichbar hohen Anteilen und geringen Anteilen Zement zur mechanischen Stabilisierung hergestellt und eingesetzt, Tabelle 4-1.

Tabelle 4-1: Konditionierung der Ausgangssubstrate durch Pelletierung mit Hilfe von Portland-Zement

	Flugasche	Entschwefelungs- produkt	Zement
	Anteile		zusätzlich
FA +Gips	4	3	3 M-%
FA + SAV	3	7	5 M-%

nach [Grotheer 2000]

In Lysimeterversuchen kommt es zu hohen Sulfatkonzentrationen (vgl. Tabelle 4-2) und verstärkt zur Auswaschung von Schwermetallspurenelementen. Bestehende LA-GA-Zuordnungswerte (z.B. Chromat ges. 15/30 µg/l für Z0/Z1.1) für den uneingeschränkten Einbau werden überschritten. Details der Versuche befinden sich in einer Zusammenfassung in Anhang 1 dieser Arbeit.

Tabelle 4-2: Konzentration ausgewählter Ionen in der Bodenlösung [Grotheer 2000]

Ion	Normale Böden		FA/G-Anfang		FA/G-Ende		SAV-Anfang		SAV-Ende	
	[mg/l]	[meq/l]	[mg/l]	[meq/l]	[mg/l]	[meq/l]	[mg/l]	[meq/l]	[mg/l]	[meq/l]
SO ₄ ²⁻	50-500	0,5-5	4700	97,9	1700	35,4	0	0	1100	22,9
CrO ₄ ²⁻	-	-	20	0,3	20	0,3	0,70	0,01	0,7	0,01
MoO ₄ ²⁻	<0,01	<0,001	1	0,01	1,5	0,02	1	0,01	1,2	0,02

Im Hinblick auf die gefundene Freisetzung von Schwermetallen aus Gips/FA Bodensubstraten in Untersuchungen von Grotheer [Grotheer 2000] würden verschärfte Sulfatgrenzwerte einen sehr hohen Sicherheitsabstand bedeuten und die Besorgnis verstärkter Schwermetallfreisetzung unbegründet erscheinen lassen. Eine Diskussion über die Vergleichbarkeit von Flugasche und Bauschutt würde sich dann erübrigen.

Wenn demgegenüber die Festsetzung von höheren Sulfatwerten als bisher in einigen Bundesländern erfolgt, insbesondere für den offenen Einbau, und so um einen Faktor 10 höhere Zuordnungswerte für Sulfat möglich sind, als nach den Vorschlägen für die TR Boden am Ende vorgesehen waren, verringert sich der Sicherheitsabstand zu den nicht mehr tragbaren Gipskonzentrationen⁶. Hier wären (zusätzlich zu [Schenk et al. 2003]) vertiefte Untersuchungen an Bauschutt zur Feststellung möglicher Grenzkonzentrationen mit Sicherheit hilfreich, zumal ein möglicher Effekt in der Diskussion um die Festsetzung der Grenzwerte bei den Gegnern der strengen Grenzwerte bisher nicht berücksichtigt wurde und Sulfatkonzentrationen im Wasser von 1000 mg/l in Heilquellen entlastend herangezogen werden [ISTE 2004].

Fazit

Die Ergebnisse haben die Projektverantwortlichen sichtlich überrascht. Die hohen Chromatausträge sind eine Folge des gemeinsamen Aufbringens von FA und Gips zu gleichen Teilen in bodenähnlichen Strukturen und den dadurch sehr hohen Sulfatkonzentrationen. Welche Rolle dabei zusätzlich Zement spielt und ob überhaupt wird nicht klar.

Die Unterschiede des Verhältnisses von Gips und restlichen mineralischen Anteilen im untersuchten Bodensubstrat und im Bauschutt sowie die Unterschiede der Zusammensetzung der mineralischen Anteile sind groß. Dies bedeutet, dass aus der Arbeit von Grotheer keine aussagekräftigen Analogien und geschweige denn Schlussfolgerungen im Hinblick auf mögliche zukünftige Gefahren durch Sulfat im Bauschutt gezogen werden können. Die Besorgnis der Auslösung von Schwermetallen bei ungünstigen Stoffkombinationen und Einbauverhältnissen kann jedoch andererseits ohne vertiefende Untersuchungen auch nicht ausgeräumt werden.

⁶ Als nicht mehr tragbar werden Gipskonzentrationen verstanden, die im Bauschutt zur Auslösung von Schwermetallen führen, die über den zulässigen Grenzwerten liegen. Der Sulfatwert selbst kann dabei unterhalb einer erlaubten Schwelle liegen.

5 Haupteinsatzstoffe und Produkte einer GRC-Anlage

5.1 Gipshaltige Einsatzstoffe aus dem Bauschutt

Gips ist eines der weltweit meist verwendeten Mineralien. Man unterscheidet bei den Gipsprodukten grundsätzlich nach ihrer Herkunft zwei Arten [BVG 2003;[Anon] 2003b]:

- Natürlicher Gips: Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Hemihydrat ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$) und Anhydrit (CaSO_4)
- Gips aus technischen Prozessen/ synthetischer Gips: z. B. Rauchgasentschwefelungsgips (REA-Gips), Neutralisationsgips, Flußsäureanhydrit, Phosphorgips etc.

Natürlicher Gips kommt in der Natur als reiner Gips und Anhydrit vor. Reiner Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) verliert durch Erhitzen Wasser und wandelt sich im Niedertemperaturbereich in Hemihydrat ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$) um. Bei weiterer Entwässerung und Temperaturen über 200°C bildet sich Anhydrit [Härig et al. 1996].

Gips aus technischen Prozessen entsteht in Deutschland vor allem bei der Entschwefelung von Rauchgasen aus Kohlekraftwerken (REA-Gips). Andere vorkommende synthetische Gipse sind Neutralisationsgips, Flußsäureanhydrit, etc. Phosphorgips, das bei der Herstellung von Phosphorsäure anfällt, spielt international aufgrund der hohen anfallenden Mengen eine sehr wichtige Rolle [Rutherford et al. 1994]. In Deutschland hingegen wurde die Phosphorsäureproduktion im Jahre 1991 eingestellt [Fleischer et al. 1995b] und es fällt daher kein Phosphorgips mehr an.

Während die Verwendung von natürlichem Gips und REA-Gips Kosten für den Betreiber einer Gipsschwefelsäureanlage verursachen, können durch die Verwertung von Abfallgips Erlöse erwirtschaftet werden. Im Rahmen dieser Untersuchungen werden daher die gipshaltige Abfallströme aus dem Bausektor, die mengenmäßig den größten Anteil an den Abfallgipsströmen darstellen, näher betrachtet. Zunächst wird eine Übersicht der Gipsströme in Deutschland gezeigt.

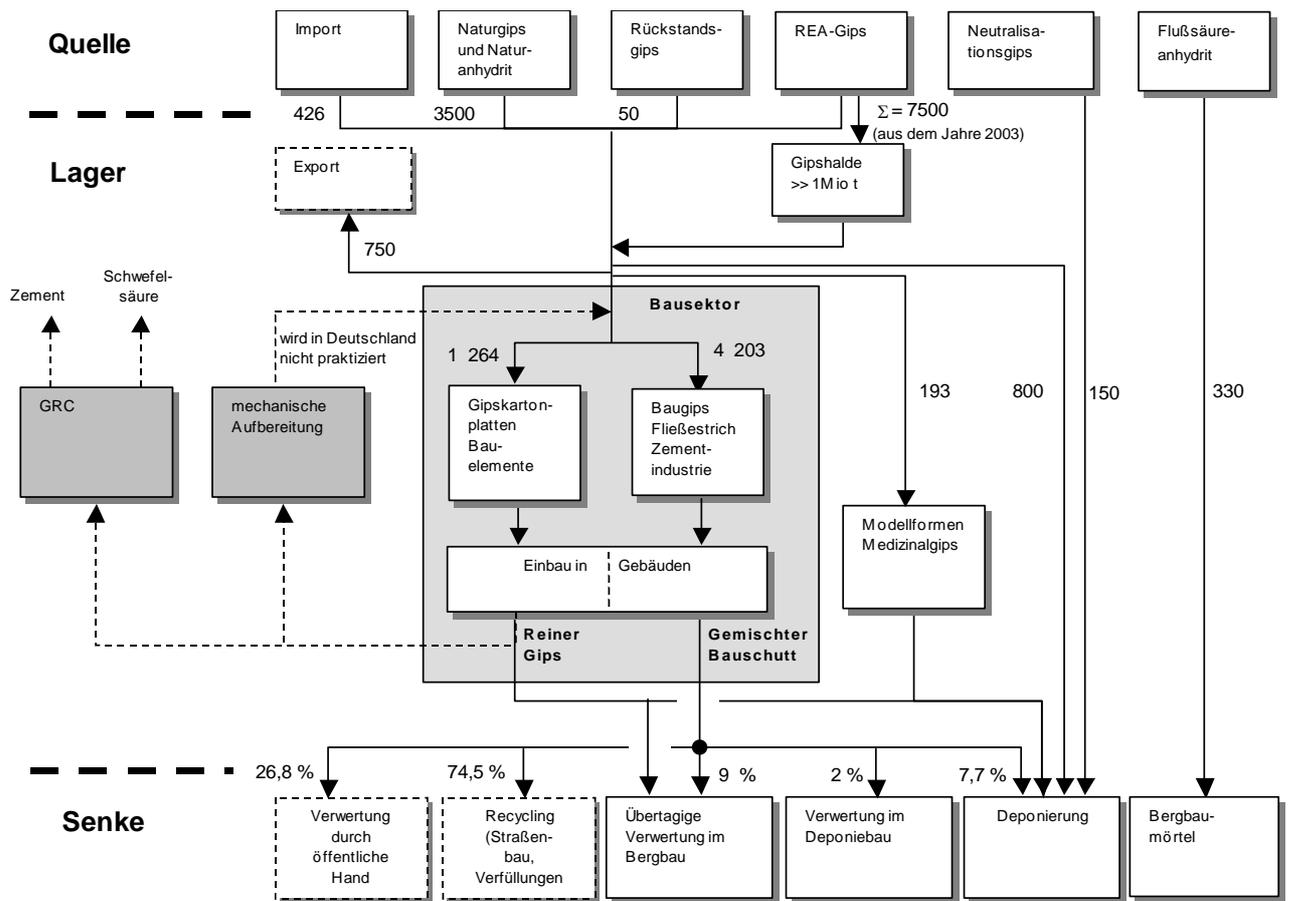
5.1.1 Übersicht der Gipsströme in Deutschland

Abbildung 5-1 zeigt in einer prinzipiellen Darstellung die Gipsflüsse in Deutschland, (in Anlehnung an [Fleischer et al. 1995b] und [Arendt 2001]). Die Mengenangaben beruhen im wesentlichen auf Darstellungen in [Fleischer et al. 1995b; Hamm et al. 2004]. Angaben zu der Bauschuttverwertung und -beseitigung sind dem 3. Monitoring-Bericht Bauabfälle der Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau entnommen [AK Bau 2003].

Zu berücksichtigende Gipsquellen sind in erster Linie der bei der Entschwefelung von braun- und steinkohlebefeuerten Kraftwerken entstehende Rauchgasentschwefelungsgips (REA-Gips) sowie abgebauter Naturgips und Naturanhydrit. Weniger bedeutende Quellen sind Rückstandsgips, Neutralisationsgips, Flußsäureanhydrit und Importe aus dem Ausland [Fleischer et al. 1995b].

Der überwiegende Anteil des Gipses geht in den Bausektor und wird für die Herstellung von Gipskartonplatten, Bauelementen, Baugips, Fließestrich und in der Zementindustrie verwendet. Der Baubereich stellt dabei lediglich ein Gipslager dar, aus welchem der Gips nach einer gewissen Verweilzeit frei wird und zur Wiederverwertung oder zur endgültigen Beseitigung gelangt.

Gips-Senken sind die übertägige Verwertung im Bergbau, die Verwertung im Deponiebau, und die Verwendung als Bergbaumörtel. Außerdem wird Gips auf Deponien durch Einlagerung in den Deponiekörper entsorgt. Dieser Weg wird abfallrechtlich als Beseitigung eingestuft. Daneben gibt es noch weitere Verwertungspfade (in Abbildung 5-1 gestrichelt gezeichnet), die entweder Recyclingpfade oder nicht weiter aufgeschlüsselte Bereiche, wie beispielsweise die Verwertung durch die öffentliche Hand, sind.



Veränderte und erweiterte Darstellung in Anlehnung an [Fleischer et al. 1995b] und [Arendt 2001], Mengenangaben zu Gipsflüssen aus [Fleischer et al. 1995b; Hamm et al. 2004]; Bauschuttverwertung und -beseitigung nach [AK Bau 2003]

Abbildung 5-1: Gipsflüsse in Deutschland

5.1.2 Gipsströme aus dem Bausektor für das GRC-Verfahren

Die Identifizierung der zur Verfügung stehenden Mengen an Gips und der möglichen Erlöse für die Aufarbeitung von Gips für ein mögliches GRC-Verfahren erfordert eine detaillierte Untersuchung der Gipsströme in Deutschland. Die Ergebnisdarstellung dieser Untersuchung wird auf den Bausektor konzentriert.

Zur Darstellung der Verwertungsmöglichkeiten von Gipsabfällen wird eine Unterteilung der Gipsströme im Bausektor vorgenommen. Es werden zum einen reiner Gips und zum anderen Gips im gemischten Bauschutt (vgl. Abbildung 5-2) unterschieden.

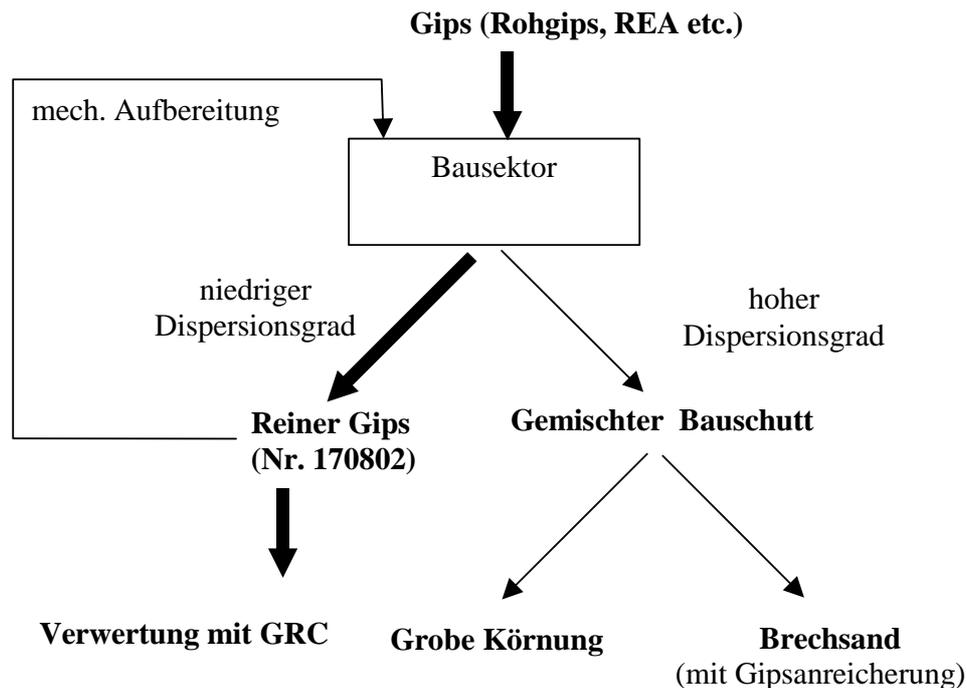


Abbildung 5-2: Vereinfachte Darstellung der betrachteten Gipsströme aus dem Bausektor

Reiner Gips wird für die Herstellung von Gipskartonplatten und Bauelementen verwendet und kann – in Abhängigkeit von der Abbruchtechnik – nach dem Abbruch eines Gebäudes als sehr konzentrierter /gering verunreinigter Gips erhalten werden (durch selektive Gebäudedemontage, vgl. [Andrä et al. 1994]). Reiner Gips als Abfall wird nach der Abfallverzeichnis-Verordnung als Baustoff auf Gipsbasis mit Ausnahme derjenigen, die unter 170801⁷ fallen, gekennzeichnet.

Gips im gemischten Bauschutt wird verursacht durch Baugips, Fließestrich und Gips, der bei der Zementherstellung beigemischt wird. Er fällt mit anderen Stoffen in gemischtem Bauschutt an und wird im Abfall der Hauptabfallkomponente, wie z.B. dem Beton, zugeordnet. Der Bauschutt kann nach der Aufbereitung weiter in die Fraktionen grobe Körnung und Brechsand unterschieden werden. Im Brechsand ist gewöhnlich eine höhere Gipsanreicherung als in der Grobkörnung.

⁷ 170801 Baustoffe auf Gipsbasis, die durch gefährliche Stoffe verunreinigt sind

Das Brechsandproblem wurde bereits innerhalb des Forschungsprojektes Baustoffkreislauf im Massivbau (BIM) erkannt und dabei alternative Verwertungsmöglichkeiten untersucht [Schießl und Müller 1998]. Aktuelle Untersuchungen zu rezykliertem Brechsand haben unterschiedliche Strategien um eine Verwertung zu ermöglichen, wie Brechsandvermeidung durch Optimierung von Brechern, Aufbereitung von Brechsanden zu „hochwertigen“ Produkten und Untersuchung neuer Einsatzgebiete von Brechsanden. Eine Übersicht hierzu gibt [Weil 2004].

Die erfasste Menge an Bau- und Abbruchabfällen betrug nach den Ergebnissen der Umweltstatistikerhebung des 3. Monitoring-Berichts Bauabfälle, der 2003 von der Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau veröffentlicht wurde, rund 252,2 Mio. t [AK Bau 2003]. Diese Abfälle werden unterschieden in

- Straßenaufbruch: Dazu gehören mineralische Stoffe, die hydraulisch, mit Bitumen (oder Teer) gebunden oder ungebunden im Straßenbau verwendet werden, z.B. Asphalt, Beton, Sand, Schotter, Pflaster- und Randsteine u.a. [Statistisches Bundesamt Deutschland 2002]
- Bauschutt: Mineralische Stoffe aus Bautätigkeit, auch mit geringfügigen Fremdanteilen. Zum Bauschutt gehören Beton, Ziegel, Kalksandstein, Mörtel, Leichtbaustoffe, Fliesen u.a. [Statistisches Bundesamt Deutschland 2002]
- Baustellenabfälle: Nichtmineralische Stoffe aus Bautätigkeit, auch mit geringfügigen Fremdanteilen. Baustellenabfälle sind Mischabfälle, bestehend aus Metallen, Holz, Farben, Lacken, Emballagen, Klebstoffe, Isoliermaterial u.a.[Statistisches Bundesamt Deutschland 2002]
- Bodenaushub: Nicht kontaminiertes, natürlich gewachsenes oder bereits verwendetes Erd- oder Felsmaterial. [Statistisches Bundesamt Deutschland 2002]

Mit 163,6 Mio. t (64,9%) stellt der Bodenaushub den größten Anteil dar, gefolgt von 54,5 Mio. t Bauschutt (21,6%), Straßenaufbruch (22,3 Mio. t bzw. 8,8 %) und Baustellenabfälle (11,8 Mio. t bzw. 4,7 %) [AK Bau 2003].

Gemischter Bauschutt wird zum größten Teil wiederverwendet. Nach Daten des statistischen Bundesamtes (zitiert in [AK Bau 2003] [[Anon] 2003a] wurden im Jahr 2000 74,5 % des Bauschuttes rezykliert, 6,8 % durch die öffentliche Hand verwertet, 9 % übertage im Bergbau verwertet, 2 % im Deponiebau verwertet und die verbleibenden

7,7 % deponiert (vgl. Abbildung 5-1). Eine genauere Aufteilung der Recyclingpfade wird in dem Bericht nicht gemacht. Ein Hinweis über das Verbleiben rezyklierten Bauschuttes liefert eine Untersuchung von Schmidt Consult, wonach im Jahr 1997 37-53 % aller hergestellten rezyklierten Gesteinskörnungen in überwiegendem Maße für den nicht klassifizierten Straßenbau und für Verfüllungen, 22-35% für Wegebau und im Erdbau und 15-30 % im klassifizierten Straßenbau eingesetzt wurden [Schmidt 2000]. RC-Produkte haben im Mittel einen Beton-Anteil von knapp 49 M-% und einen Ziegel-Anteil von knapp 19 M-%. Die verbleibenden 32 M-% verteilen sich auf die Stoffgruppen Erde und Steine (aufbereiteter Boden bzw. Boden-Bauschutt-Gemisch), Asphalt (pech- und teerhaltige Ausbaustoffe nicht eingeschlossen) und gemischte Bau- und Abbruchabfälle (Keramik, Fliesen, Kalksandstein, Gips und weitere mineralische Baustoffe). Der Brechsandanteil aus Bauschutt des Hochbaus liegt bei 9 Mio. t (1998) [Weil 2004].

5.1.3 Gipsanteile und -mengen im Bauschutt

Bezogen auf den gesamten mineralischen Eintrag in den Hochbau machen die 8 Mio. t/a Gips für Zement und Gipsprodukte (1998) einen Mengenanteil von 3-3,5% aus [Weil 2004]. In der weiteren Literatur sind Schätzungen zu den Mengen an reinen Gipsabfällen und gipshaltigen Abfällen aus dem Bausektor dokumentiert, weisen jedoch eine weite Spanne auf. Im Monitoring - Bericht Bauabfälle [Anon] 2001 wird ein Prozentsatz von 0,1 der Bauschuttabfälle für sortenrein erfasste Gipsplattenabfälle angegeben. Für die Menge an rezyklierbaren Gipskartonplatten gibt der Bundesverband der Gipsindustrie ein Potential von 0,3 Mio. t/a an [Kersten 2004]. Andere Quellen geben einen Gipsanteil im Bauschutt von 1 % (z. B. in [Hummel 1997] und [Arendt 2001]) an, ohne jedoch die Zusammensetzung und Herkunft näher zu spezifizieren. Bei einem gegenwärtigen Bauschuttanfall von 53,5 Mio. t/a bedeutet dies eine Gipsmenge im Bereich von 0,535 Mio. t/a. Eine einfache Übertragung des Gipsanteils am gesamten mineralischen Eintrag in den Hochbau (3-3,5%) auf die Baurestmassen würde einen 3-3,5-fach höheren Gipsanteil als bei [Hummel 1997] angenommen, ergeben (entsprechend ca. 1,6 bis 1,9 Mio t/a). Szenarienrechnungen für die Zukunft [Arendt 2001] gehen aufgrund von Kohorten- und Lebensdauerannahmen davon aus, dass sich die Gipsmenge in Baurestmassen in ca. 30 Jahren um einen Faktor 3 erhöhen wird.

5.1.4 Verwertungs- und Beseitigungsmöglichkeiten für reinen Gips

Eine bestehende Option zum stofflichen Gipsrecycling ist die Abtrennung von stückigem Gips aus dem Bauschutt und dessen mechanische Aufarbeitung und Wiederverwendung für die Herstellung neuer Gipskartonplatten [Anon 2003d;Musick 1992;Musick 1992]. Weitere Möglichkeiten, die auf einer Weiterverarbeitung nach einer mechanischen Aufarbeitung beruhen, sind die Zugabe des aufgearbeiteten Gipses bei der Zementherstellung [Jang und Townsend 2001] sowie die Verwendung des aufgearbeiteten Gipses in der Landwirtschaft und als Bodenverbesserer [Jang und Townsend 2001;Wolkowski 2000;Munn und Carr 1996;White und Burger 1993;Wallace 1994].

In der Forschung und Entwicklung befindlichen Verfahren sind folgende:

- **Biologische Umwandlung:** Das Recycling von REA-Gips zur Herstellung von Calciumcarbonat und Elementarem Schwefel wurde erfolgreich im Labormaßstab durchgeführt. Der biologische Prozess wird mit sulfat-reduzierenden Bakterien und anaerob abgebautem Klärschlamm als Kohlenstoffquelle betrieben [Kaufman et al. 1996;Kaufman et al. 1997].
- **Herstellung von Glaskeramiken:** Die Herstellung von Glaskeramiken aus Phosphorgips wird am Florida Institute of Phosphate Research untersucht [Chapman et al. 1999].
- **Beimengung bei der Kompostierung** [Anon 1999;Marvin 2000]: Durch die Beimengung von Gips wird bei der Kompostierung die Schüttdichte eingestellt und ggf. Feuchte absorbiert. In der Regel wird dies mit der Zugabe von Holzschnitzel oder Sägemehl durchgeführt. Durch die Zugabe von Gips werden zusätzliche Mineralien (Schwefel und Kalzium) in den Kompost eingebracht.

Der Recyclingpfad wird in Deutschland aus wirtschaftlichen Gründen nicht beschritten. Eine Ausnahme bildet das Recycling zur Wiederaufbereitung von Gipsplatten in einer Wiederaufbereitungsanlage von Knauf am Standort Iphofen [Hummel 1997]. Dabei werden jedoch ausschließlich Produktionsrückstände, wie z.B. Fehlchargen, aufgearbeitet und für die Herstellung neuer Gipskartonplatten verwendet. Andere Gipsabfälle, wie Baustellenabfälle, Abfälle aus Rückbaumaßnahmen, etc. werden nicht angenommen, da Qualitätseinbußen bei den späteren Produkten befürchtet werden [Appel 2005].

Der Grund für die geringe Recyclingquote ist in der Konkurrenz durch günstigere Verwertungsmöglichkeiten, insbesondere durch die Verwertung im Bergbau über Tage, zu sehen. Die Verwertung von Gips über Tage findet bei der Rekultivierung von Salzhaldden, beim Ausgleich des Massendefizits, das durch den Tagebau im Braunkohlebergbau entstanden ist, sowie zur Rekultivierung von Bergehalden und Absetzteichen des Steinkohlenbergbaus statt [Länderausschuss Bergbau 2002].

Kalibergwerke befinden sich in Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen [BMWA 2003]. Eine weitere nahegelegene Kalihalde befindet sich im Süd-Elsass (nördlich von Mühlhausen). Preise bei Anlieferung für die Verwertung über Tage beginnen bei 9 €/t [Menteroda Recycling 2005].

Die Verwertung von Gipsabfällen durch Bergversatz unter Tage ist für Gipsabfälle aus dem Bausektor bereits ab 30 € pro Tonne möglich. Je nach Kontaminierungsgrad und Art des Versatzes liegen die Preise zwischen 30 und 110 Euro/t. Dabei ist für Gipsabfälle aus dem Bausektor der untere Wert von 30 Euro heranzuziehen [Wetzig 2005].

Die mechanische Aufarbeitung kostet inklusive Sammelsystem und Verarbeitung zu einem Gipspulver etwa 70 €/t [Lund-Nielsen 2005]. Das von Gypsum Recycling International A/S vertriebene Sammelsystem besteht aus speziell entwickelten Sammelcontainern, einem Logistiksystem sowie mobilen Recycling-Einheiten. Das System wurde im Jahr 2001 in Dänemark eingeführt. Mittlerweile sind die Hälfte der öffentlichen Abfallabnehmer sowie verschiedene Bau- und Abbruchunternehmen an das System angeschlossen. Nach Angaben des Unternehmens werden dadurch etwa 30 % des in Dänemark anfallenden Gipsabfalls wiederverwertet. Das Recycling-System wird zur Zeit auf Schweden und Norwegen erweitert. Der mechanisch aufgearbeitete Gips wird an Gipskartonhersteller abgegeben. Dort können bis 25 % des sonst eingesetzten Gipses durch den rezyklierten Gips ersetzt werden. Eine mechanische Aufarbeitung zur Verwendung bei der Gipskartonplattenherstellung wird auch von der New West Gypsum Recycling Inc. angeboten. Das Unternehmen bereitet nasse und trockene Gipsabfälle, Gipsbauplatten und Trockenbauabfälle auf, die bei der Herstellung neuer Gipsbauplatten mit einem Anteil von mehr als 25 % verwendet werden [Anon 2003d;Musick 1992;Musick 1992].

Eine Deponierung in einer Hausmülldeponie kostet bei der Direktanlieferung in Baden-Württemberg im Durchschnitt etwa 106 €/t [Landratsamt Lörrach 1997]. In Karlsruhe werden nach der aktuellen Abfallgebührensatzung für Hausmüll und Bauschutt 244,00 € pro Tonne Gipsabfall verlangt [Stadt Karlsruhe 2003]. Allerdings muss dabei berücksich-

sichtigt werden, dass der Preis für die Annahme von Abfällen auf der deponiefern Umladestation gilt und daher bereits Kosten für Logistik und Transport zur Deponie einschließt.

In anderen Staaten, in denen es keine Möglichkeit zur Verwertung im Bergbau über Tage gibt (z.B. Dänemark), wird das stoffliche Recycling bereits erfolgreich für Baustellenabfälle und Abfälle aus Rückbaumaßnahmen praktiziert, ohne dass sich die gesetzlichen Rahmenbedingungen und Deponiekosten prinzipiell von der Situation in Deutschland unterscheiden würden. Für die Abschätzung von Gesamtkosten inklusive Transport wäre daher eine vertiefte Analyse regionaler Gegebenheiten erforderlich. Hierfür wäre auch ein Transportmodell heranzuziehen.

Insgesamt ergibt sich aus den obigen Angaben eine Konkurrenzsituation für das GRC-Verfahren durch bestehende Verwertungs- und Beseitigungswege.

Abbildung 5-3 stellt die Verwertungs- und Beseitigungsmöglichkeiten von reinem Gips und deren Preise in einer Grafik dar.

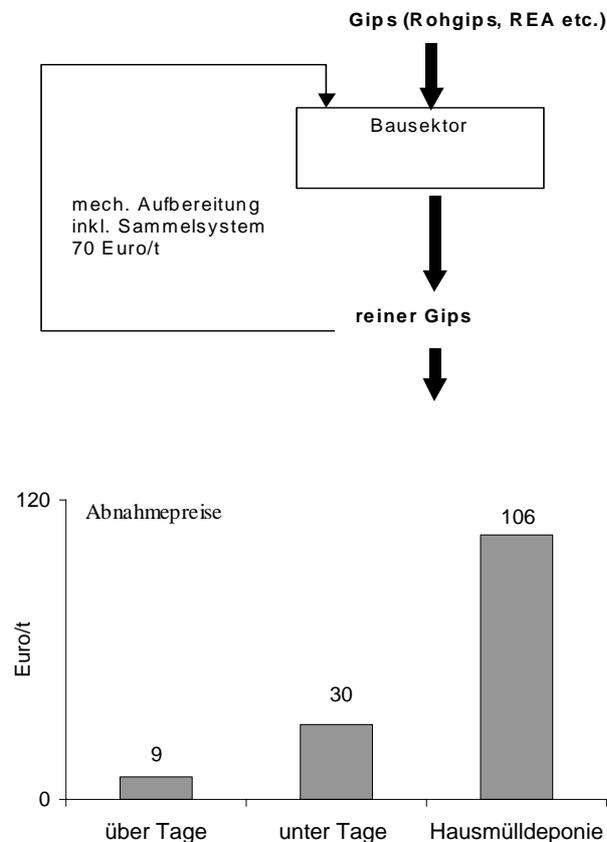


Abbildung 5-3: Verwertungs- und Beseitigungsmöglichkeiten von reinem Gips und deren Preise

5.1.5 Vorabsieb und Brechsand von aufbereitetem Bauschutt

Bei der Anlagenführung von stationären und modernen mobilen Bauschutt-Aufbereitungsanlagen zur Erzeugung rezyklierter Gesteinkörnung fallen zwei Problemfraktionen an: Vorabsieb und Brechsand.

Vorabsieb-Material, das insbesondere aus qualitativen Gründen abgetrennt wird, enthält vor allem erdige aber auch alkalien- oder sulfathaltige Bestandteile (z.B. Putze, Mörtelreste). Die Qualitäten des Vorabsieb-Materials und die Anfallmenge schwanken je nach Inputmaterial stark. Der Anteil Vorabsieb beträgt 10-30 M-% der angelieferten Stoffmenge. Die Einsatzgebiete beschränken sich meist auf die Verfüllung von Leitungsgräben oder aber auf eine Verwendung bei der Haldenkultivierung.

Brechsand kann bei der Aufbereitung je nach Sortenreinheit des Aufgabematerials sowohl sortenrein als auch gemischt anfallen. Der Anteil des Brechsandes an der aufbereiteten Menge beträgt 25-35%. Die Qualität und Menge des Brechsandes sind nicht nur vom Inputmaterial der Aufbereitungsanlage, sondern auch von den Anlagenkomponenten und der Prozessführung der Anlage abhängig.

Brechsand findet als separates Produkt ähnlich wie das Vorabsieb-Material nur begrenzte Anwendungen im Erd- und Straßenbau. Aus diesem Grund wird versucht, möglichst hohe Anteile des Brechsandes in den Hauptprodukten für den Erd- und Straßenbau unterzubringen. Diese Mengenanteile sind allerdings durch die entsprechenden Anforderungen (Korngrößenverteilung der Produkte-Sieblinie, Frost-Tau-Beständigkeit der Produkte, Eluatwerte der Produkte, etc.) Grenzen gesetzt (vgl. [TL Min-StB 2000]).

So wird z. B. bei der derzeitigen Überarbeitung der Richtlinie Beton mit rezyklisiertem Zuschlag [6Entw. DAfStb Richtl. 2002] angestrebt den Brechsand nicht mehr für die Betonherstellung zuzulassen. Dann müssen andere Verwertungsoptionen für den Brechsand gefunden werden.

Hier vergrößert sich nun durch die in Aussicht stehende Verschärfung der LAGA Grenz- und Zuordnungswerte die Schwierigkeit, diese Verwertungsoptionen tatsächlich zu finden. Es kann begründet angenommen werden, dass die bisher in den Hauptprodukten des Erd- und Straßenbaus untergebrachten Anteile des Brechsandes dorthin ohne weitere Aufbereitung nicht mehr fließen könnten und damit einerseits die verbleibende Grobfraction verschärfte Grenzwerte eher einzuhalten vermag aber andererseits die zu deponierenden Brechsandmengen ansteigen dürften.

5.2 Einsatzstoff Sekundärbrennstoff

Als Brennstoffe für das Gips-Schwefelsäureverfahren können ähnliche Sekundärbrennstoffe wie in der Zementindustrie eingesetzt werden (z. B. Altholz, Ölschlämme, organische Destillationsrückstände usw.; siehe hierzu [VDZ 2003; Achternbosch et al. 2003]).

Ein möglicher Brennstoffmix, wie er für einen Betrieb einer Gips-Schwefelsäure-Anlage in Wolfen vorgeschlagen wird [Meininger 2000], ist bereits in Abschnitt 2.2 beschrieben. Der Massenanteil des nicht näher spezifizierten Sägemehls beträgt bei dieser Zusammensetzung 50 % und trägt an den von Meininger zugrunde gelegten Erlösen von 77 Euro/t zu mehr als 76 % bei. Der hohe Preis für Sägemehl erklärt sich nur, wenn es sich hierbei um kontaminiertes und bereits zerkleinertes Altholz handelt. Teeröle sind zu 22% an dem Inputmassenstrom beteiligt und sind zu 16 % an den möglichen Erlösen beteiligt. Von geringer Bedeutung hinsichtlich Mengen und möglichen Erlösen sind die eingebrachten Destillationsrückstände und Lösemittel.

Aufgrund der Mengenrelevanz und des hohen Kostenanteils bei der Anlage in Wolfen wurden die Preise und zur die zur Verfügung stehenden Mengen an kontaminiertem Altholz eingehender analysiert.

5.2.1 Zur Verfügung stehenden Mengen an kontaminiertem Altholz

Eine Kategorisierung von Altholz wird in der Altholzverordnung [Anon 2002] in 4 Kategorien (AI bis A IV), sowie einer weiteren Kategorie für PCB-Altholz durchgeführt. Entscheidend für die Zuordnung zu einer Kategorie ist der Gehalt an holzfremden Stoffen, die durch Verleimung, Beschichtung etc. eingetragen wurden. Tabelle 5-1 gibt einen Überblick über die Altholzkategorien und entsprechend Mengenaufkommen an Holz in den einzelne Kategorien [Lang 2002].

Nach dem Monitoring-Bericht zur Wirkung der Biomasseverordnung auf Basis des Erneuerbare- Energien-Gesetzes (EEG) [Anon 2003c] ist davon auszugehen, dass Altholz in den nächsten 2 bis 5 Jahren fast vollständig der energetischen Verwertung zugeführt wird. Damit werden „keine signifikanten freien Mengen mehr auf dem Markt“ sein [Anon 2003c].

Tabelle 5-1: Altholzkategorien und entsprechend Mengenaufkommen an Holz in den einzelnen Kategorien

Altholz-kategorie	Eigenschafts-Charakterisierung nach der Altholzverordnung [AltholzV 2002]	Geschätzte Menge	
		Mio t/a	%
A I	naturbelassenes oder lediglich mechanisch bearbeitetes Altholz, das bei seiner Verwendung nicht mehr als unerheblich mit holzfremden Stoffen verunreinigt wurde	2,0	25
A II	verleimtes, gestrichenes, beschichtetes, lackiertes oder anderweitig behandeltes Altholz ohne halogenorganische Verbindungen in der Beschichtung und ohne Holzschutzmittel	2,4	30
A III	Altholz mit halogenorganischen Verbindungen in der Beschichtung ohne Holzschutzmittel,	0,4	5
A IV	mit Holzschutzmitteln behandeltes Altholz, wie Bahnschwellen, Leitungsmasten, Hopfenstangen, Rebpfähle, sowie sonstiges Altholz, das aufgrund seiner Schadstoffbelastung nicht den Altholzkategorien A I, A II oder A III zugeordnet werden kann, ausgenommen PCB-Altholz	3,2	40
PCB-Altholz	Altholz, das nach deren Vorschriften der PCB/PCT-Abfallverordnung [PCBAbfallV 2000] zu entsorgen ist, insbesondere Dämm- und Schallschutzplatten, die mit Mitteln behandelt wurden, die polychlorierte Biphenyle enthalten	vernachlässigbar	

Nach Angaben in [Lang 2002]

5.2.2 Mögliche Erlöse aus der Mitverbrennung kontaminierten Altholzes

Eine Übersicht über die Preisentwicklung für kontaminiertes Altholz zwischen 1997 und 2004 zeigt Abbildung 5-4. Für die Preiszusammenstellung wurden die im Brancheninformationsdienst EUWID-Recycling und Entsorgung regelmäßig veröffentlichten Marktpreise von 1997 bis 2004 ausgewertet (zuletzt [Anon 2004]).

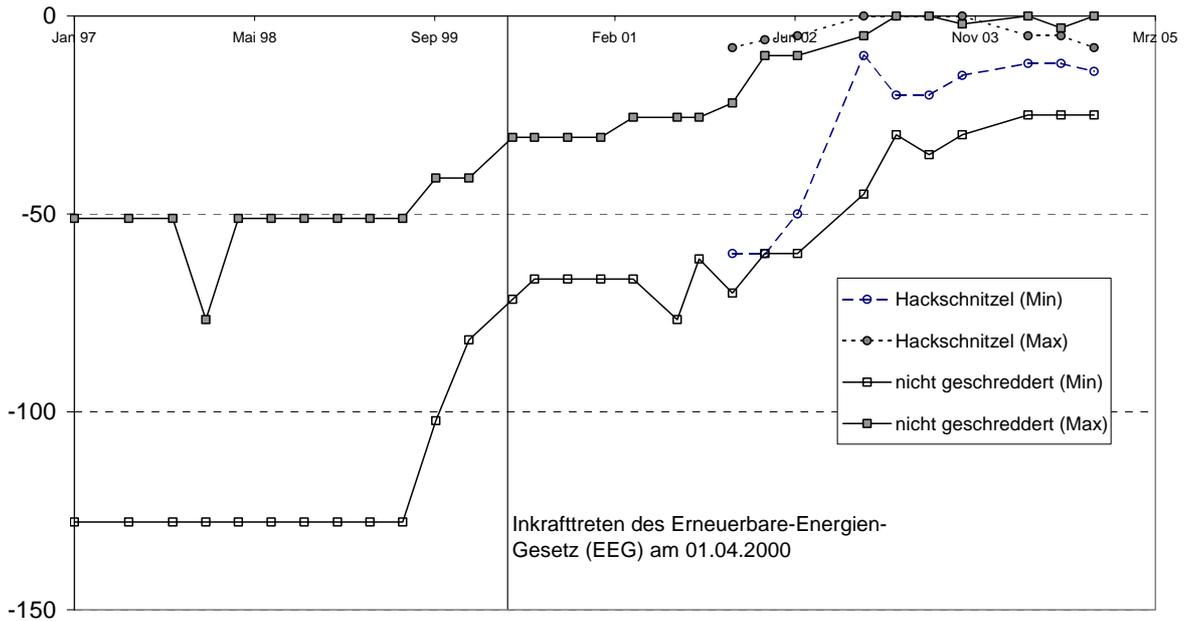


Abbildung 5-4: Preisentwicklung für kontaminiertes Altholz bei Abnahme größerer Mengen frei Verwerter, Auswertung von EUWID-Recycling und Entsorgung 1997-2004.

Während bis in das Jahr 1998 hinein noch Erlöse von bis zu 125 Euro für die Tonne kontaminiertes geschreddertes Altholz zu erzielen waren, sind die möglichen Erlöse seither kontinuierlich gefallen und haben sich erst in der letzten Zeit auf sehr niedrigem Niveau stabilisiert. Die erzielbaren Erlöse liegen heute (Oktober 2004) in einer Preisspanne von 0 – 25 Euro/t für vorgebrochenes Altholz (0-300 mm), und in einer Preisspanne von 8 – 14 Euro/t für kontaminierte Hackschnitzel (0- 150 mm). Die angegebenen Preise gelten bei Abnahme größerer Mengen frei Verwerter und sind regional unterschiedlich.

Ursache für den Preisverfall ist das am 01.04.2000 in Kraft getretene Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), dass die Abnahme und Vergütung von aus erneuerbaren Energiequellen (Wasserkraft, Windkraft, Solarstrahlung, Geothermie, Deponie-, Klär- und Grubengas oder aus Biomasse) gewonnenen Strom durch Versorgungsunternehmen, die Netze für die allgemeine Stromversorgung betreiben (Netzbetreiber), regelt. Eine novellierte Fassung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes [EEG 2004], die eine reduziertere Förderung von Windkraftanlagen und eine Erhöhung der Zuschüsse für Energie aus Sonne, Biomasse und Erdwärme vorsieht, ist am 1. August 2004 in Kraft getreten.

Die Vergütung für Strom aus Biomasse ist gestaffelt und beträgt für Strom aus Biomasse in Abhängigkeit der Anlagengröße zwischen 8,4 und 11,5 Cent pro Kilowattstunde. Wird Altholz der Kategorie A III und A IV nach der Altholzverordnung [AltholzV 2002] eingesetzt, so vermindert sich die Vergütung auf 3,9 Cent pro Kilowattstunde. Bei Altholz der Kategorie A III handelt es sich um Altholz mit halogenorganischen Verbindungen in der Beschichtung ohne Holzschutzmittel; zu Altholz der Kategorie A IV zählen mit Holzschutzmitteln behandeltes Altholz, wie Bahnschwellen, Leitungsmasten, Hopfenstangen, Rebpfähle, sowie sonstiges Altholz, das aufgrund seiner Schadstoffbelastung nicht den Altholzkategorien A I, A II oder A III zugeordnet werden kann. Ausgenommen hiervon ist PCB-Altholz.

Die Festlegung einer Vergütung für den Einsatz von Biomasse und insbesondere die Tatsache, dass für die Verwendung von kontaminiertem Altholz ebenfalls der abgegebene Strom nach den Festlegungen des EEG vergütet wird, hat in der Folge dazu geführt, dass eine hohe Nachfrage nach diesem Brennstoff herrscht und damit sinkende Erlöse für die Verwerter auf dem Markt zu erzielen sind. Abbildung 5-4 zeigt den deutlichen Einschnitt im Jahr 2000 und bereits zuvor zurückgehende Preise. Altholz ist die wichtigste Fraktion bei neu errichteten Biomasseanlagen mit einem Anteil von mehr als 70% [EUWID 45 2004]

Fazit Altholz

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Entwicklung der Preise für kontaminiertes Altholz in starkem Maße von Stromerlösen, die in dem EEG geregelt werden, abhängen. Für die zukünftige Preisentwicklung ist es daher entscheidend, ob weiterhin eine solche geregelte Vergütung erfolgt.

Am Beispiel des Altholzes kann man verfolgen, wie die sich verändernden Rahmenbedingungen auf dem Markt, in diesem Fall die Einführung des Erneuerbare Energie-Gesetzes [EEG 2000], auf die Preise eines Abfalls auswirken können. Es verdeutlicht, dass bei einer Konkurrenzsituation von Verwertern innerhalb kurzer Zeit Erlöse für Ersatzbrennstoffe erheblich zurückgehen können.

5.3 Produkt Zement

Zement ist ein hydraulisches Bindemittel, das nach Zugabe von Wasser erhärtet [Bartels et al. 2002]. Der in Deutschland hergestellte Zement besteht aus den Hauptbestandteilen Portlandzementklinker, Gips, Anhydrit, Hüttensand, natürliche Puzzolane

(z.B. Trass), Flugasche, gebrannter Ölschiefer oder Kalkstein [VDI Verein Deutscher Ingenieure 2003].

Produktionsmengen an Zement

Die Weltproduktion von hydraulischem Zement war im Jahr 2002 nach Angaben der United States Geological Survey (USGS) 1800 Mio t . Dabei ist China mit 704 Mio t der größte Produzent, was etwa 39 % der Weltproduktion entspricht, gefolgt von Indien (100 Mio, t) und den USA (91,3 Mio t). In Abbildung 5-5 ist die Weltproduktion an hydraulischem Zement seit 1980 dargestellt. Sei zeigt den kontinuierlichen Zuwachs der Produktion, die einem jährlichen Wert von ca. 5 % entspricht. Die Zunahme wird stark von China vorangetrieben. Während Chinas Anteil an der Weltproduktion im Jahr 1990 noch etwa 18 % war, ist er mittlerweile auf einen Prozentsatz von 39 gestiegen.

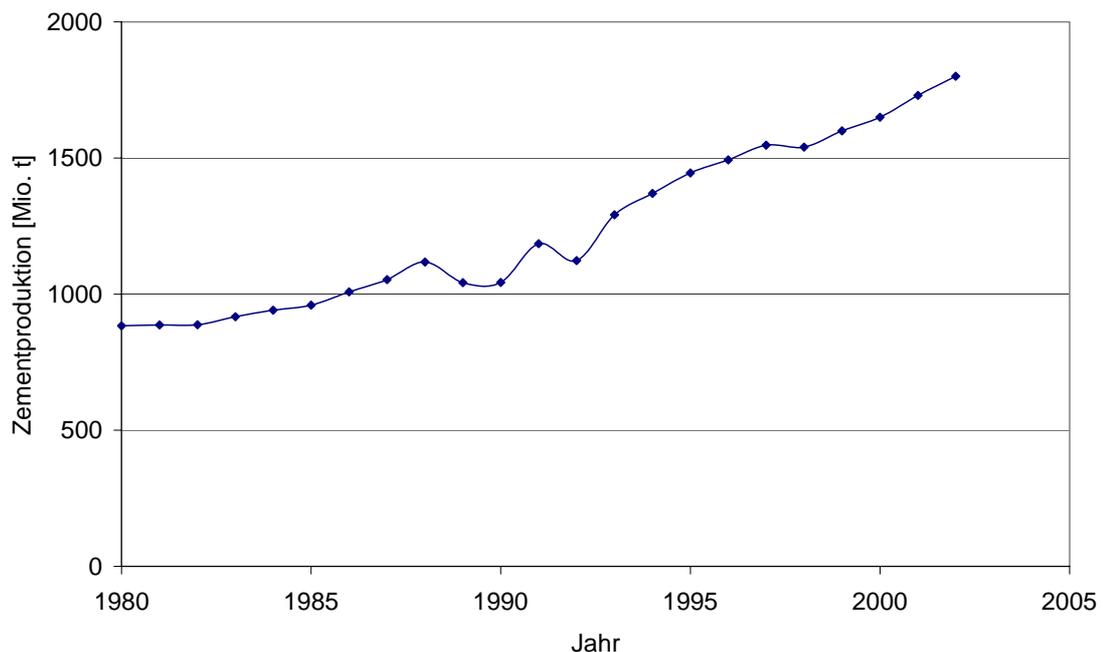


Abbildung 5-5: Weltproduktion an hydraulischem Zement nach Angaben in [van Oss 2002]

Die Entwicklung der Zementproduktion in Deutschland folgt nicht dem stetigen Trend der Weltproduktion. Nach Angaben des statistischen Bundesamtes und Statistiken des Bundesverbandes der Deutschen Zementindustrie wurden im Jahr 2003 29,3 Mio. t Zement abgesetzt, ein Jahr zuvor waren es 27,0 Mio. t. Insgesamt ist ein stagnierender

Absatz seit 1980 und seit Mitte der Neunziger Jahre ein rückläufiger Absatz zu verzeichnen, was auf die rückläufige Baukonjunktur in Deutschland zurückzuführen ist. Der Anstieg in 2003 erfolgt trotz einer weiterhin rückläufigen Baukonjunktur und wird mit zunehmendem Einsatz des Baustoffes Zement in Bereichen, wie Straßen- und Tiefbau, erklärt [Zement Jahresbericht 2003 – 2004]. Für 2004 wird mit einem Sinken des Zementverbrauches gerechnet. Abbildung 5-6 zeigt die Entwicklung der Zementabsatzes von 1980 – 2003.

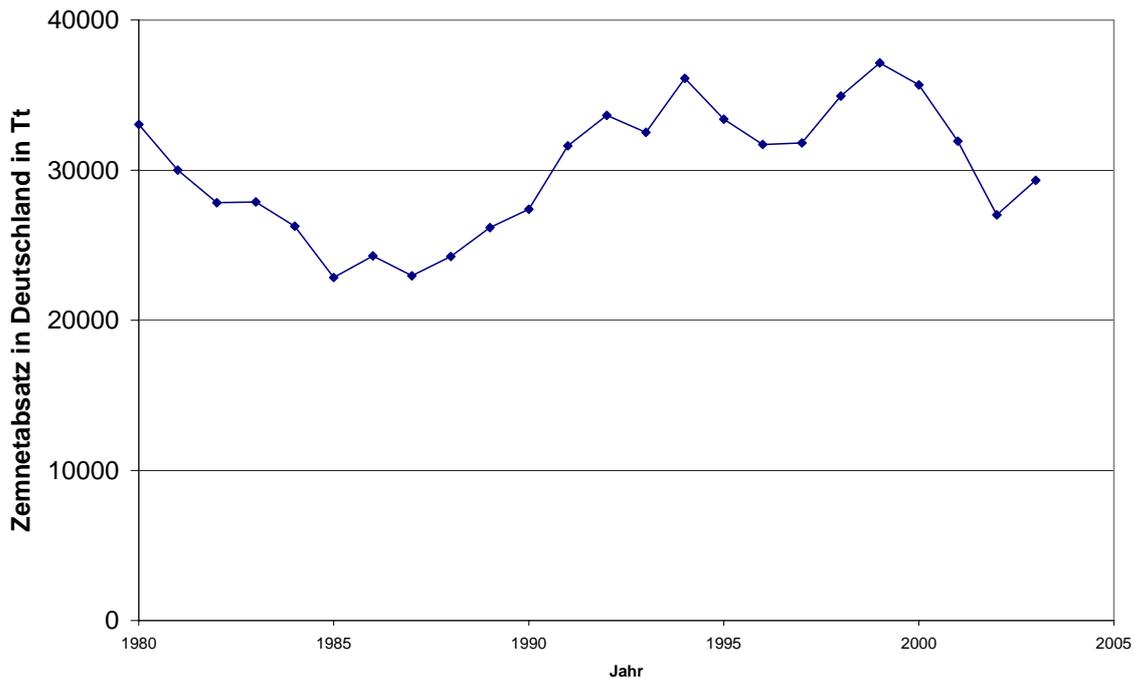


Abbildung 5-6: Entwicklung der Zementabsatzes in Deutschland von 1980 – 2003, nach Angaben des statistischen Bundesamtes und des Bundesverbandes der Deutschen Zementindustrie

Mögliche Erlöse für den Verkauf von Zement

In Deutschland ist die Nachfrage nach Zement seit Mitte der Neunziger Jahre rückläufig, was auf die rückläufige Baukonjunktur zurückzuführen ist. In der Zukunft wird ebenfalls mit einem Sinken Senkung des Zementverbrauches gerechnet. Eine Analyse der Preisentwicklung für das Beispiel USA hat gezeigt, dass der inflationsbereinigte Zementpreis seit 1980 gefallen ist [Kelly et al. 2004]. In Deutschland ist der Preis in jüngster Zeit wieder angestiegen. Aktuell liegt er für eine Tonne Zement bei etwa 80 € [Weil 2005], während noch vor wenigen Jahren der Preis bei unter 50 € lag.

5.4 Produkte Schwefelsäure und Oleum

Schwefelsäure ist eine anorganische Säure und zählt aufgrund der vielfältigen Verwendungsmöglichkeiten zu den wichtigsten Grundchemikalien der chemischen Industrie. Die Produktionsmenge bzw. der Verbrauch wird als Indikator für den allgemeinen Zustand der Ökonomie eines Staates angesehen [Müller 2002]. Der weltweit größte Einzelverbraucher an Schwefelsäure ist die Düngemittelindustrie. In Deutschland wird Schwefelsäure u.a. für die Herstellung von Kunststoffen, Chemiefasern, in der Petrochemie, bei der Titandioxid-Herstellung und in der nichtchemischen Industrie zum Metallbeizen verwendet [Fleischer et al. 1995a].

In Westeuropa wird Schwefelsäure ausschließlich nach dem Kontaktverfahren hergestellt [Müller 2002]. Dabei wird Schwefeldioxid (SO_2) katalytisch zu Schwefeltrioxid (SO_3) umgesetzt. Anschließend reagiert das Zwischenprodukt SO_3 mit Wasser und zu Schwefelsäure.

Die Herstellung von SO_2 erfolgt aus den Rohstoffen Schwefel und Pyrit (FeS_2) vor allem nach den folgenden Verfahren [ESA/EFMA 2000]:

- Pyritabröstung
- Verbrennung von elementarem Schwefel mit Luft
- Verarbeitung von sulfidischen Erzen von Nichteisen-Metallen
- Regenerierung von Schwefelsäure
- Spaltung von Gips und Metallsulfaten.

Einzelheiten zu den genannten Verfahren und weitere Verfahren sind im Bericht zu den Best Verfügbaren Techniken der Schwefelsäureherstellung beschrieben [ESA/EFMA 2000]. Das Doppelkontaktverfahren, das als Best Verfügbare Technik zur Umsetzung von SO_2 aus der Schwefelverbrennung angesehen wird [ESA/EFMA 2000], ist in Anhang 3 beschrieben.

Oleum, auch rauchige Schwefelsäure genannt, besteht aus einer 100%iger Schwefelsäure (H_2SO_4), in der Schwefeltrioxid (SO_3) gelöst ist. Großtechnisch wird Oleum in Kontaktanlagen hergestellt, in der SO_3 -haltige Gase durch einen speziellen Oleum-Turm geleitet werden. Die Konzentration von freiem SO_3 ist mindestens 20% und höchstens 36% [Müller 2002].

Produktionsmengen von Schwefelsäure

Schwefelsäure ist die weltweit am meisten produzierte Chemikalie. In Westeuropa wurden nach einer Übersicht der British Sulphur Consultants Division im Jahr 2003 etwa 18,4 Mio. t H_2SO_4 produziert, wovon 5,5 Mio. t auf Deutschland entfielen. Weltweit wurden im gleichen Jahr etwa 180 Mio. t der Säure produziert.

Der zeitliche Rahmen erstreckt sich von 1982 bis 2003 und verdeutlicht die insbesondere in den letzten Jahren stark ansteigende Produktionsmengen von H_2SO_4 . Seit Mitte der Neunziger Jahren ist eine 50 %-ige Produktionssteigerung festzustellen.

Abbildung 5-7 zeigt das Ergebnis einer Auswertung unterschiedlicher Quellen [Müller 1999;Kitto 2004;ESA/EFMA 2000] zu den Produktionsmengen für Schwefelsäure in Deutschland. Der zeitliche Rahmen erstreckt sich von 1982 bis 2003 und verdeutlicht die insbesondere in den letzten Jahren stark ansteigende Produktionsmengen von H_2SO_4 . Seit Mitte der Neunziger Jahren ist eine 50 %-ige Produktionssteigerung festzustellen.



Abbildung 5-7: Produktion von Schwefelsäure in Deutschland; Auswertung verschiedener Quellen [Müller 1999;Kitto 2004;ESA/EFMA 2000].

Mögliche Erlöse für das Produkt Schwefelsäure

Aufgrund der gestiegenen Nachfrage nach Schwefelsäure ist auch der Preis stark angestiegen und hat sich allein seit 2000 verdoppelt. Eine Tonne technische Schwefelsäure mit ca. 96% bis 98% H_2SO_4 kostet derzeit auf dem Markt etwa 50 € [Nettkette 2004]. Auch in Zukunft wird mit einer großen Nachfrage nach Schwefelsäure gerechnet. Für Oleum wird von einer gleichsinnigen Preisentwicklung ausgegangen.

Die Trendumkehr und hohe Nachfrage lässt sich auch an den in jüngster Zeit gestiegenen Preisen für Schwefel als Ausgangsprodukt der Schwefelsäureproduktion erkennen. Der Preise für elementarem Schwefel basierend auf den gesamten in den USA verschifften Mengen ist von 2002 auf das Jahr 2003 um 142% gestiegen [Ober 2003].

5.5 Fazit für Haupteinsatzstoffe und Produkte

Tabelle 5-2 fasst in einer Übersicht die wichtigsten Erkenntnisse zu den Haupteinsatzstoffen und Produkten einer GRC-Anlage hinsichtlich Verfügbarkeit bzw. Nachfrage, aktuellen Marktpreisen, und Tendenzen zusammen. Insgesamt zeigt sich in den letzten Jahren bei allen untersuchten Preisen eine sehr hohe Volatilität, und damit für die Zukunft eine Preistendenz, die mit großen Unsicherheiten behaftet ist.

Tabelle 5-2: Ergebnisse im Überblick: Verfügbarkeit, Nachfrage, Preise und Tendenzen der Haupteinsatzstoffe und Produkte

		Verfügbarkeit (Input)/ Nachfrage (Output)	Spez. Erlöse	Preisänderung 2000 bis heute	Tendenz bei den Preisen
			[€/t]	[%]	
Input	Gipsabfälle	Starke regionale Schwankungen	9-106	k.A.	konstant
	Altholz	sehr niedrig, kon- stant	8-14	-88	konstant
	Rücksäuren	k.A.	36	k.A.	k.A.
Output	Zement	Nachfrage mäßig	80	+25 ⁸	steigend
	Schwefelsäure	Nachfrage hoch	50	+100	steigend
	Oleum	Nachfrage hoch	120	+100	steigend

k.A. = keine Angabe

⁸ Änderung bezogen auf das Jahr 2001

6 Analyse der Kosten

Für die Beurteilung des Potentials einer Verwertung von Abfallgips mit dem GRC-Verfahren sind die Verfahrenskosten ein wichtiger Entscheidungsfaktor. Im Rahmen des Projektes wurde eine Analyse der jährlichen Kosten und Erlöse durchgeführt, und die erforderlichen Einnahmen für einen wirtschaftlichen Betrieb der Anlage bestimmt. Diese entsprechen dem Geldbetrag, der in einem Jahr durch Erlöse und den Verkauf der Produkte⁹ erzielt werden muss, um die mit dem Bau und Betrieb verbundenen Kosten für dieses Jahr zu decken. Darüber hinaus muss durch den Verkauf der Produkte die Erwirtschaftung eines Gewinnes gewährleistet werden.

Die Kosten ergeben sich als Summe aus Verpflichtungen, die mit den Investitionen verbunden sind (d.h. kapitalgebundene Kosten), den verbrauchsgebundenen Kosten (d.h. Brennstoff- und Energiekosten) und den betriebsgebundenen Kosten (d.h. Betriebs- und Wartungskosten) [Bejan et al. 1996].

Die von Meininger zusammengetragenen Kosten zu den Stoffströmen wurden anhand der Stoffe Gips, des Sekundärbrennstoffes Altholz, und der beiden Produkte Zement und Schwefelsäure überprüft. Die nachgeprüften Zahlen deckten sich mit den Angaben in [Meininger 2000]. Auch die Zahlenangaben zu den übrigen Sekundärbrennstoffen sind von der Größenordnung her noch immer zutreffend [Reinhardt 2005]. Für eine genauere Beurteilung der Preissituation ist die genaue Kenntnis der Zusammensetzung der einzelnen Stoffe erforderlich. Dies ist aber nur aufgrund von tatsächlichen Stoffanalysen am konkreten Abfall möglich.

6.1 Vorgaben für die Wirtschaftlichkeitsanalyse

Für die Durchführung der Wirtschaftlichkeitsanalyse sind zahlreiche Annahmen und Vereinfachungen zu treffen, die im Folgenden beschrieben werden.

Bei der Berechnung wird eine lineare Abschreibung auf 20 Jahre zu Grunde gelegt. Steuern, Versicherungen und zeitliche Faktoren werden bei den Berechnungen nicht berücksichtigt. Es wird ein Anlagenwert von 118 Mio. € zugrunde gelegt [Meininger

⁹ Der Verkauf der Produkte schließt die Erlöse für das Rohmehl, Sekundärbrennstoff und Rücksäuren auf der Inputseite und die Erlöse für Zement, Schwefelsäure und Oleum auf der Outputseite ein.

2000] und davon ausgegangen, dass diese Kosten die Erstellung einer schlüsselfertigen Anlage inklusive sämtlicher direkter und indirekter Kosten (Planung, Inbetriebnahme, Umlaufkapital, etc.) ermöglichen. Die Grundstückskosten seien ebenfalls in den Kosten enthalten. Die Auswirkungen des CO₂-Emissionshandels auf die Wirtschaftlichkeit des GRC-Verfahrens können zwar, wie in Abschnitt 2.4 besprochen, beträchtlich sein, bleiben jedoch aufgrund der nicht bekannten energiebedingten Emissionen in der folgenden Wirtschaftlichkeitsanalyse unberücksichtigt. Tabelle 6-1 fasst die wichtigsten Annahmen für die Wirtschaftlichkeitsanalyse zusammen.

Tabelle 6-1: Wichtigste Annahmen für die Wirtschaftlichkeitsanalyse

	Einheit	Wert	Quelle
Anlagenwert	€	118.000.000	[Meiningen 2000]
Abschreibung, linear	a	20	Annahme
Verzinsung	%	6	Annahme
kalkulatorischer Unternehmerlohn	%	4	Annahme
Personalbedarf	Personen	100	[Meiningen 2000]
Personalkosten	€/Person	25600	[Meiningen 2000]
Betriebszeit	h/a	8000	[Meiningen 2000]
Grundstück und Infrastruktur	€	Im Anlagenwert enthalten	Annahme

In Tabelle 6-2 sind die Vorgaben für die Berechnung der Kosten der Stoffströme zusammengetragen. Die Betriebskosten werden auf Basis einer Gipsschwefelsäureanlage mit einem Durchsatz von 160 kt/a Rohmehl bestimmt und wurden von [Meiningen 2000] übernommen. Die jährlich anfallenden Kosten sind Tabelle 6-3 zu entnehmen.

Tabelle 6-2: Materialströme und Erlöse einer Gipsschwefelsäureanlage

	Materialströme [kt/a]	Erlöse [€/t]	Quelle
Input			
Gips	116	9-106 ¹⁰	variabel
Rest-Mineralien (vgl. Tabelle 1)	44	21	[Meininger 2000], [Reinhardt 2005]
Sägemehl	16	9	[EUWID 14 2004]
Dest. Rückstände	6,4	18	[Meininger 2000], [Reinhardt 2005]
Teeröle	10,24	36	[Meininger 2000], [Reinhardt 2005]
Lösemittel	2,56	10	[Meininger 2000], [Reinhardt 2005]
Rücksäuren	15	36	[Meininger 2000], [Reinhardt 2005]
Output			
Zement	100	80	[Weil 2005]
Schwefelsäure	50	50	[Nettke 2004]
Oleum	20	120	Basispreis [Meininger 2000] und Preissteigerung [Nettke 2004]

¹⁰ Hierbei handelt es sich um Annahmepreise zum einen für die Verwertung im Bergbau über Tage und zum anderen für die Deponierung auf einer Hausmülldeponie (vgl. Abschnitt 5.1).

Tabelle 6-3: Betriebskosten einer Gipsschwefelsäureanlage mit einem Durchsatz von 160 kt/a Rohmehl.

	Kosten in € pro Jahr
Reparatur und Wartung	1.022.600
Versicherung	117.600
El. Energie	1.166.800
Kohle und Erdgas (Anfahrprozess)	102.300
Dampf	301.700
Kaltwasser (Sommer)	61.400
Druckluft	368.100
Stickstoff	4.100
Brauchwasser	61.400
Trinkwasser	5.100
Abwasser	306.800
Ausmauerung	112.500
Schmieröl, Chemikalien, Laborbedarf etc	127.800
Reguliergips	81.800
Trass	35.800
Wartungsverträge, Eichamt, Gebühren etc	51.100
Standortverwaltung	102.300
Entsorgung Abwasserschlämme	10.200
Kleinausgaben	51.100
Summe	4.090.500

Nach Angaben in [Meininger 2000]

6.2 Ergebnisse

Mit den zuvor beschriebenen Vorgaben wird eine Berechnung der Kosten und Erlöse einer Gipsschwefelsäureanlage mit einem Durchsatz von 160 kt/a Rohmehl durchgeführt. Unter Zugrundelegung der Erlöse entsprechend Tabelle 6-2 wird der Preis ermittelt, ab dem sich eine ausgeglichene Kosten/Erlös-Situation ergibt (Break-Even-Point). Tabelle 6-4 fasst die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 6-4: Kosten und Erlöse einer Gipsschwefelsäureanlage mit einem Durchsatz von 160 kt/a Rohmehl.

Kosten	Wert €/a	Summe €/a
Personal	2.560.000	
Betriebsmittel, etc	4.090.500	
Abschreibung	5.900.000	
Kapitaldienst	7.080.000	
kalkulatorischer Unternehmerlohn	4.720.000	24.350.500
Erlöse		
Erlöse Input	5.724.778	
Erlöse Output	18.625.722	24.350.500

Die vereinfachte Kostenrechnung ergibt, dass bei einem zum Ansatz gebrachten Preis von 80 € pro Tonne Zement eine Verwertung mit dem GRC-Verfahren ab einem für den GRC-Betreiber erzielbaren Preis von etwa 31 €/t für angelieferte Gipsabfälle rentabel ist. Dies bedeutet, dass zur Zeit eine solche Verwertung aufgrund der Konkurrenzsituation mit günstigeren Verwertungsoption nicht beschränkt werden würde. Dabei ist insbesondere die Konkurrenzsituation mit der Verwertung im Bergbau über Tage und im Versatz unter Tage zu nennen.

Für eine weitergehende Analyse des GRC-Verfahrens werden auf dem Markt zu erzielenden Preise für Zement in Abhängigkeit der Erlöse für eingesetzten Abfallgips dargestellt. Dabei werden die übrigen Parameter (Personalkosten, Preise für Sekundär-

brennstoffe, Oleum, Schwefelsäure etc.) konstant gehalten. Bei einer späteren Sensitivitätsuntersuchung wird der Einfluss der unterschiedlichen Parameter auf das Ergebnis untersucht.

In Abbildung 6-1 sind die Zementherstellungskosten in Abhängigkeit möglicher Einnahmen für eingesetzte Gipsabfälle als Gerade dargestellt. Unter der Annahme einer kostenneutralen Entsorgung des Gipses, d. h. für den Gips gibt es keine Erlöse bei der Verwertung, beträgt der zu erlösende Zementpreis 151,9 €/t. In der Grafik wird dies durch den Schnitt der Kostengerade mit der y-Achse verdeutlicht.

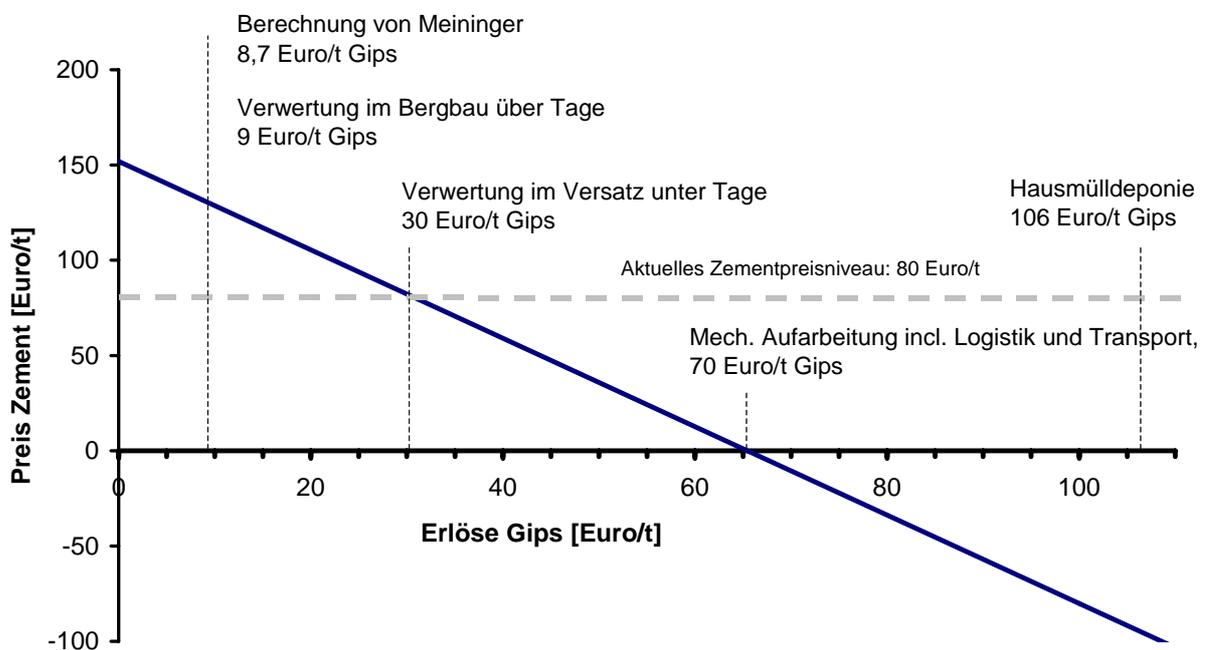


Abbildung 6-1: Zementherstellungskosten in Abhängigkeit möglicher Einnahmen für den eingesetzten Gipsabfall

Mit Hilfe des derzeitigen Marktpreises von Zement kann man die für einen wirtschaftlichen Betrieb der Anlage mindestens zu erzielenden Erlöse für das Rohmehl ermitteln. Bei aktuellen Preisen von etwa 80 Euro/t liegen die Grenzkosten bei 31 €/t.

Zur Einordnung der Ergebnisse sind in der Abbildung die Kosten der Wolfener Anlage (Erlöse für den Gips betragen 8,7 €/t) eingetragen. Außerdem sind als Orientierung die Preise für die Verwertung im Bergbau über Tage (ab 9 €/t) und den Versatz unter Tage

(ab 30 €/t) dargestellt. Der zuvor errechnete aktuelle Kostendeckungspunkt (Break-Even-Punkt) ist durch den Schnitt der Zementkostengerade mit der 80 Euro-Horizontalen festgelegt.

Ein Vergleich mit den derzeitigen Kosten für die von Gipsabfällen auf Hausmülldeponien, die in Baden-Württemberg bei durchschnittlich 106 €/t liegen, zeigt mögliche Perspektiven für das Verfahren auf.

6.3 Sensitivitätsanalyse

Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse sind mit Unsicherheiten behaftet, die einerseits mit der Genauigkeit der Kostenabschätzungen für die Errichtung einer Anlage und zum anderen mit der zukünftigen Entwicklung der Brennstoff-, Betriebs- und Wartungskosten in Zusammenhang stehen. Viele der Kostenfaktoren variieren in Abhängigkeit der lokalen Gegebenheiten und der Anlagenkonfiguration. Folglich sind für die Berechnung Annahmen zu treffen, die das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsanalyse zum Teil wesentlich beeinflussen. Um den Einfluss der Vorgaben und getroffenen Annahmen auf das Endergebnis zu untersuchen wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt.

Es wird die Sensitivität folgender Parameter untersucht:

- Veränderung der Investitionskosten einer Gipsschwefelsäureanlage
- Veränderung der Personalkosten
- Veränderung möglicher Erlöse für Gips
- Veränderung möglicher Erlöse für Sekundärbrennstoff (Altholz und andere Sekundärbrennstoffe)
- Veränderung möglicher Erlöse für Schwefelsäure und Oleum

Ausgehend von einem Basisszenario werden die einzelnen Parameter um 50% erniedrig bzw. erhöht. Als Referenz wird der Kostendeckungspunkt genommen. Die dabei bestimmten Rohmehleinnahmen, die einen wirtschaftlichen Betrieb der Anlage unter aktuellen Preisbedingungen gewährleisten, wurden zuvor mit etwa 31 €/t Gips bestimmt.

Abbildung 6-2 zeigt den Einfluss der Parameteränderungen auf die Zementherstellungskosten. Für das vorliegende Anlagenkonzept bewirken verändernde Investitionskosten für die Errichtung der Anlage die größten Veränderungen auf die Produktkosten. Ausgehend vom Referenzpunkt bewirkt eine 50%ige Erhöhung der Investitionskosten eine Veränderung der Zementpreise um +110 %. Demgegenüber bewirkt eine Halbierung der Investitionskosten eine Reduzierung der Herstellungskosten um 110%, was mit einem Vorzeichenwechsel bei den Zementherstellungskosten verbunden ist (vgl. auch Abbildung 6-1).

Die Erlöse für den eingesetzten Abfallgips sind der nachfolgend sensitive Parameter. Eine Erhöhung (bzw. Senkung) der Erlöse um 50% führt zu einer Senkung (bzw. Erhöhung) der Zementherstellungskosten von 45%.

Einen geringen Einfluss auf das Ergebnis haben veränderte Erlöse für die Sekundärbrennstoffe und Personalkosten. Der Einfluss der Sekundärbrennstoffpreise ist gering, da die Erlöse für eine Verwertung mittlerweile drastisch gesunken sind (vgl. 5.2.2) und in der Gesamtrechnung einen geringen Beitrag liefern.

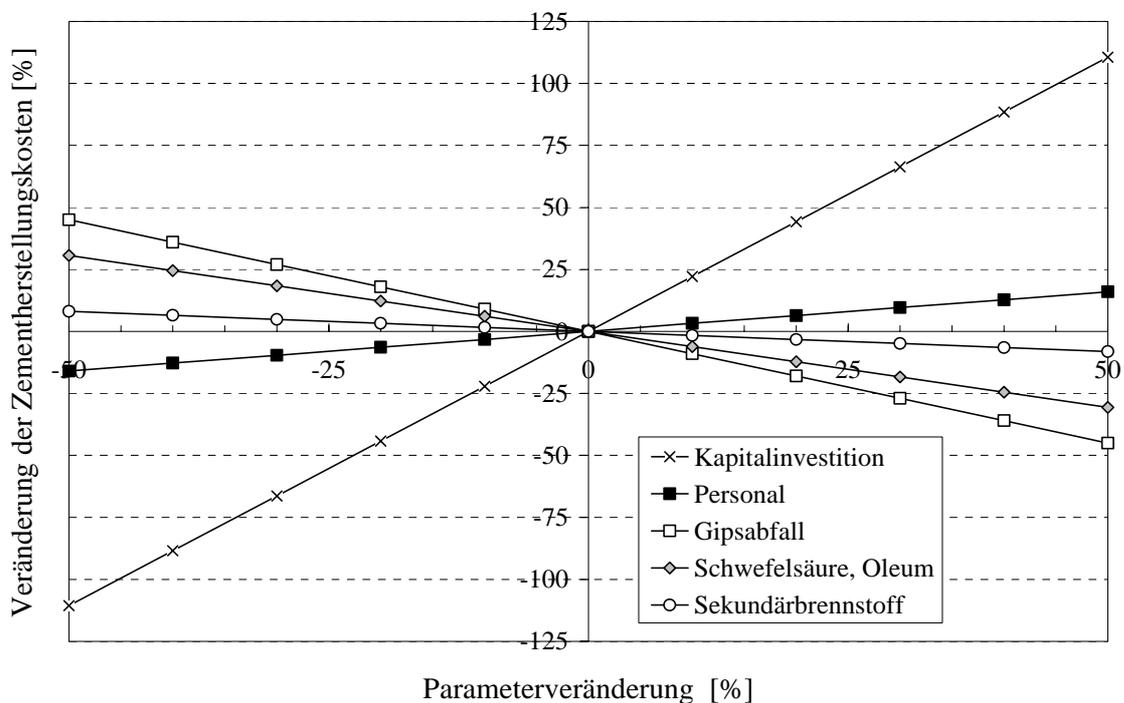


Abbildung 6-2: Ergebnis der Sensitivitätsanalyse für die Kostenrechnung einer Gipsschwefelsäureanlage

6.4 Vergleich mit dem Sekundärrohstoff-Verwertungszentrum Schwarze Pumpe

Für eine Bewertung der zukünftigen Einsatzmöglichkeiten des GRC-Verfahrens im großtechnischen Maßstab ist ein Vergleich mit der "Sekundärrohstoff-Verwertungszentrum Schwarze Pumpe GmbH" (SVZ) zweckmäßig. Literatur zum SVZ siehe zum Beispiel [Obermeier und Markowski 2002] und [Seifert et al. 1998]. An diesem Standort wurden zu Zeiten der DDR u.a. Stadtgas aus Braunkohle mit Hilfe von Vergasungsprozessen produziert. Nach einer Modernisierung und Neubau von Anlagenteilen werden die Vergasungsanlagen für die thermische Behandlung ausgewählter bzw. aufbereiteter Abfälle eingesetzt. Als Produkt entsteht unter anderem Methanol, ein wichtiges Basisprodukt der Chemieindustrie, wodurch die Anerkennung des SVZ als stoffliches Verwertungsverfahren, z. B. für Schredderrückstände [EUWID 27 2003], möglich ist. Die Situation, Abfälle anzunehmen, zu verwerten und hochwertige Produkte auf dem Markt zu verkaufen, ist vergleichbar mit der des GRC-Verfahrens.

Das SVZ besitzt mit der angewandten Technologie in Deutschland eine Monopolstellung. Mit Kosten im Bereich von 100 EUR/t für aufbereiteten Hausmüll und deutlich über 100 EUR/t für Schredderrückstände [EUWID 27 2003] liegen die Kosten im Bereich der thermischen Abfallbehandlung (72 - 340 EUR/t [EUWID 49 2004]), die jedoch nicht als stoffliche Verwertung anerkannt ist. Trotz der Möglichkeit einer stofflichen Verwertung, bei im Vergleich zur thermischen Abfallbehandlung ähnlichen Behandlungspreisen, hatte das SVZ massive wirtschaftliche Schwierigkeiten, die zur Insolvenz geführt haben [EUWID 18 2004].

7 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Projektes wurden die Rahmenbedingungen für die Verwertung mineralischer Reststoffe als Problemstoffe mit Sulfatgehalt und potentielle Einsatzstoffe für ein GRC-Verfahren (Gypsum reduction with carbon GRC) untersucht. Das GRC-Verfahren ist eine Modifikation des Gipsschwefelsäure-Verfahrens nach Müller-Kühne und basiert auf der Spaltung von Calciumsulfat mit Kohlenmonoxid bei hohen Temperaturen in einem Drehrohrofen. Neben der Frage, ob durch die Verwertung von Gips im GRC-Verfahren ein Umweltproblem gelöst werden kann, wurden in dieser Arbeit die stofflichen Rahmenbedingungen und die Wirtschaftlichkeit eines GRC-Verfahrens untersucht.

Eine mögliche Rohmehlzusammensetzung für ein GRC-Verfahren besteht nach den Erfahrungen mit dem Müller-Kühne-Verfahren zu etwa 73 % aus Gipseinsatzstoffen, wie Sprühabsorptionsprodukt, Chemie-Gips, Feuchtgips oder Gips-Karton. Die übrigen Einsatzstoffe sind $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ sowie Kohlenstoffträger und können aus Wirbelschichtaschen, Braunkohleflugasche, Filter-Stäuben, gebrauchte Katalysatormassen (Katalysator- SiO_2) sowie Aktiv-Kohle bestehen. Die erforderliche Menge an $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ wird durch die geforderte Zusammensetzung des Zementklinkers bestimmt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Input- und Outputströme eines GRC-Verfahrens auf Basis vorhandener Daten einer Gipsschwefelsäureanlage analysiert, wobei Gips aus Bau- und Abbruchabfällen als Haupteinsatzstoff, kontaminiertes Altholz als möglicher Sekundärbrennstoff, sowie die Produkte Zement und Schwefelsäure näher untersucht wurden.

Zur Darstellung der Verwertungsmöglichkeiten von Gipsabfällen wurde eine Unterteilung der Gipsströme im Bausektor vorgenommen. Es wurden zum einen reiner Gips und zum anderen Gips im gemischten Bauschutt unterschieden. Insbesondere die reine Gipsfraktion, die durch selektive Gebäudedemontage nach dem Abbruch eines Gebäudes als sehr konzentrierter /gering verunreinigter Gips erhalten werden kann, ist für das GRC-Verfahren verwendbar. Inwieweit sich auch gipshaltige Abfälle mit einem hohen Inertstoffanteil mit diesem Verfahren verwerten lassen, bedarf einer vertieften verfahrenstechnischen Untersuchung, was nicht Gegenstand dieser Arbeit war.

Bezogen auf den gesamten mineralischen Eintrag in den Hochbau machen die 8 Mio. t Gips für Zement und Gipsprodukte (1998) einen Mengenanteil von 3-3,5 Masse-% aus.

Für den Austrag wurde ein Bereich von etwa aktuell 0,5 bis zukünftig 1,9 Mio. t/a ermittelt. Davon entfallen aktuell nach Angaben des Bundesverbandes der Gipsindustrie 0,3 Mio. t/a auf rezyklierbare Gipskartonplatten. Erhöhte Anteile an Gips im Vergleich zur groben Gesteinskörnung befinden sich in den derzeit 9 Mio. t Brechsand. Die Menge an Brechsand hängt zukünftig von der Abbruchtätigkeit einerseits und den Verwertungsmöglichkeiten andererseits ab und kann derzeit nicht belastbar prognostiziert werden.

Aus verschärften Zuordnungswerten für die Verwertung der mineralischen Abfälle als Folge der Anpassung der LAGA Mitteilung 20 [TR Boden, TR Bauschutt] würde sich eine verstärkte Tendenz zur Deponierung gipshaltigen Bauschutts ergeben. Über neue Zuordnungswerte zur Verwertung von mineralischen Abfällen ist es nach langer Vorarbeit bei der LAGA im Jahr 2004 jedoch zu keiner Einigung gekommen. Nunmehr ist der Bund aufgefordert, eine entsprechende Verordnung zu erlassen. Insbesondere die Recyclingindustrie drängt auf gegenüber dem Ist-Stand erhöhte Zuordnungswerte. Einige Bundesländer, wie z. B. Baden-Württemberg, sind dem durch entsprechende Erlasse bereits gefolgt.

Aufgrund einer Entscheidung des Rats der Europäischen Union zur Festlegung von Kriterien und Verfahren für die Annahme von Abfällen auf Abfalldeponien [2003/33/EG] in Ergänzung zur europäischen Deponierichtlinie [1999/31/EG] werden die Ablagerungsverordnung und die Deponieverordnung voraussichtlich geändert und voraussichtlich auch Angaben zu Sulfat enthalten. Die bisherigen Zuordnungskriterien der deutschen Verordnungen entsprechen nicht den umfangreicheren europäischen Vorgaben. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist noch nicht geklärt, wie die Entscheidung des Rats im Detail umgesetzt werden wird. Bei aller Unübersichtlichkeit der Lage kann dennoch begründet vermutet werden, dass sich von der Deponierichtlinie her kein verstärkter Druck auf eine Ausschleusung gipshaltigen mineralischen Bauschutts in Behandlungsanlagen ergibt.

Im Hinblick auf die gefundene verstärkte Freisetzung von Schwermetallen aus Boden substraten, die bei den Untersuchungen von Grotheer [Grotheer 2000] zu in etwa gleichen Anteilen aus Gips und Flugasche zusammengesetzt waren, würden verschärfte Sulfatgrenzwerte einen sehr hohen Sicherheitsabstand bedeuten und die Besorgnis verstärkter Schwermetallfreisetzung unbegründet erscheinen lassen. Wenn demgegenüber die Festsetzung von höheren Sulfatwerten als bisher in einigen Bundesländern erfolgt, insbesondere für den offenen Einbau, und so um einen Faktor 10 höhere Zuordnungswerte für Sulfat möglich sind, als nach den Vorschlägen für die TR Boden

am Ende vorgesehen waren, verringert sich der Sicherheitsabstand zu den nicht mehr tragbaren Gipskonzentrationen. Hier wären vertiefte Untersuchungen zur Feststellung möglicher Grenzkonzentrationen mit Sicherheit hilfreich, zumal ein möglicher Effekt in der Diskussion um die Festsetzung der Grenzwerte bei den Gegnern der strengen Grenzwerte bisher nicht berücksichtigt wurde.

Die für ein GRC-Verfahren infragekommenden Gipsmengen aus dem Bauschutt betragen je nach Quelle 0,05 bis 0,3 Mio. t/a. Der Vorteil ihrer Abtrennung aus dem Bauschutt läge in der Vermeidung lokal hoher Gips-Konzentrationen in der Durchmischung mit anderen Baustoffen, insbesondere mit flugaschehaltigem Betonbruch. Doch auch hier liegen gesicherte Erkenntnisse nicht vor.

Eine Absammlung von stückigem Gips zur Verwertung würde eine entsprechende Logistik erfordern und dann auf konkurrierende Verfahren des mechanischen Recyclings treffen, die in anderen Ländern bereits etabliert sind, oder auf die günstigere bergmännische Verwertung, die in Deutschland möglich ist. Die Rahmenbedingungen in Deutschland fördern gegenwärtig die Verwertung von reinem Gips aus Bauschutt auf neuen Verwertungswegen, bzw. mit neuen Verfahren, nicht. Änderungen sind nicht absehbar.

Eine vereinfachte Gegenüberstellung des Gips-Schwefelsäureverfahrens und der Zementherstellung unter dem Gesichtspunkt der CO₂-Emissionen und des Emissionshandels hat gezeigt, dass durch den geringeren Anteil prozessbedingter Emissionen im Vergleich zu konventionellen Verfahren die Herstellung von Zementklinker aus gipshaltigen Baureststoffen mit dem Gips-Schwefelsäure- bzw. GRC-Verfahren einen Geldwertevorteil von derzeit 1,3 EUR je Tonne Zementklinker führt. Diesem Vorteil steht aber ein höherer Energiebedarf gegenüber und daher auch eine größere Menge energiebedingter Kohlendioxidemissionen. Für eine genauere Untersuchung der Emissionen und sämtlicher Umweltauswirkungen des GRC-Verfahrens sowie der Auswirkungen durch den Emissionshandel wäre ein detaillierter Vergleich mit der konventionellen Zementherstellung erforderlich. Dabei wären die Funktionen der Zementherstellung, der Schwefelsäureherstellung und der Verwertung von Gips in einem Systemvergleich zu erfassen.

Dem Recycling von Gipsabfällen sowohl für den Einsatz für das GRC als auch durch eine mechanische Aufbereitung sind Grenzen gesetzt. Diese sind verknüpft mit der Versorgung von Rohstoffen, die gleichmäßig und ausreichend vorhanden sein muss, dem Vorhandensein eines Endmarktes für den wiederaufgearbeiteten Gips bzw. für die

hergestellten Produkte, sowie dem Transport und den damit verbundene Transport- und Logistikkosten. Bei den untersuchten Preisen der einsetzbaren Stoffe und der erzeugten Produkte zeigt sich in den letzten Jahren bei allen untersuchten Preisen eine sehr hohe Volatilität. Geht man davon aus, dass die Transport- und Logistikkosten zu einer GRC-Anlage und zu einer Verwertungsstelle über Tage etwa gleich hoch sind, dann folgt hieraus, dass als limitierender Kostenfaktor für die Gipsverwertung/Beseitigung in Deutschland der Preis für die Haldenrekultivierung von 9 €/t zu berücksichtigen ist. Allerdings ist es ungewiss, wie lange dieser Weg noch zur Verfügung steht.

Für die Beurteilung des Potentials einer Verwertung von Abfallgips mit dem GRC-Verfahren wurde die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens untersucht. Eine Überprüfung der Kosten einzelner Stoffströme zeigte die Zuverlässigkeit der von Meininger in [Meininger 2000] gemachten Angaben. Eine vereinfachte Kostenrechnung ergab, dass bei einem zu Grunde gelegten Zementpreis von 80 € pro Tonne eine Verwertung mit dem GRC-Verfahren ab einem für den GRC-Betreiber erzielbaren Preis von etwa 31 €/t für angelieferte Gipsabfälle rentabel ist. Bei den gegenwärtigen Rahmenbedingungen und möglichen Erlösen für die Verwertung von Gipsabfällen ist daher das GRC-Verfahren aufgrund der Konkurrenzsituation mit günstigeren Verwertungsoptionen in Deutschland noch unwirtschaftlich.

Um den Einfluss der Vorgaben und getroffenen Annahmen auf das Endergebnis zu untersuchen wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Für das vorliegende Anlagenkonzept bewirken verändernde Investitionskosten für die Errichtung der Anlage die größten Veränderungen auf die Produktkosten. Ausgehend vom untersuchten Referenzpunkt bewirkt eine 50%ige Erhöhung bzw. Senkung der Investitionskosten eine Veränderung der Zementpreise um + bzw. - 110 %. Die weiteren Parameter, die auf Veränderungen sensitiv wirken sind in der Reihenfolge: Erlöse für den eingesetzten Abfallgips, Erlöse für Schwefelsäure und Oleum, Personalkosten und schließlich Erlöse für Sekundärbrennstoff. Insgesamt sind die stoffgebundenen weniger sensitiv als die kapitalgebundenen Kosten. Dabei sind jedoch die stoffgebundenen Kosten größeren Schwankungen unterworfen.

8 Literaturverzeichnis

- [AbfAbIV 2001] Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen AbfAbIV - Abfallablagerungsverordnung. 20. Februar 2001.
- [Achternbosch et al. 2003] Achternbosch, M., K.R. Bräutigam, und U. Richers, 2003. Analyse des Einsatzes von Abfällen als Sekundärbrennstoffe in Zementwerken. Derzeitige Situation, Potentiale und Stoffströme. In: Stein, G.H. (ed.), Umwelt und Technik im Gleichklang: Technikfolgenforschung und Systemanalyse in Deutschland, Springer-Verlag, Berlin [u.a.], pp. 387-404.
- [AK Bau 2003] AK Bau. 3. Monitoring-Bericht Bauabfälle. 2003. Berlin-Düsseldorf-Duisburg, Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau.
- [AltfahrzeugV] Verordnung über die Überlassung, Rücknahme und umweltverträgliche Entsorgung von Altfahrzeugen AltfahrzeugV - Altfahrzeug-Verordnung. 21.6.2002.
- [AltholzV] Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz AltholzV - Altholzverordnung. 15. August 2002.
- [Andrä et al. 1994] Andrä, H., R. Schneider, und T. Wickbold, 1994. Baustoff-Recycling: Arten, Mengen und Qualitäten der im Hochbau eingesetzten Baustoffe; Lösungsansätze für einen Materialkreislauf, ecomed, Landsberg .
- [Anon 1977] [Anon], 1977. Getting rid of phophogypsum - II. Phosphorus & Potassium 89: 36-44.
- [Anon 1999] [Anon], 1999. Drywall improves the compost mix. Biocycle 40: 51.
- [Anon 2001] [Anon], Monitoring - Bericht Bauabfälle. 2001. Berlin-Düsseldorf-Duisburg, Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau.
- [Anon 2002] [Anon]. Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz (Altholzverordnung -AltholzV) vom 15. August 2002, (BGBl. I S. 3302). 2002.
- [Anon 2003a] [Anon]. 3. Monitoring-Bericht Bauabfälle. 2003a. Berlin-Düsseldorf-Duisburg, Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau.
- [Anon 2003b] [Anon]. Gips-Datenbuch. 2003b. Darmstadt, Bundesverband der Gipsindustrie e.V.
- [Anon 2003c] [Anon]. Monitoring zur Wirkung der Biomasseverordnung auf Basis des Erneuerbare- Energien-Gesetzes (EEG). 2003c. Berlin, Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) .

- [Anon 2003d] [Anon], 2003d. Profitable Gypsum Wallboard Recycling. Global Gypsum magazine 20-23.
- [Anon 2004] [Anon], 2004. Marktbericht für Altholz. EUWID Recycling und Entsorgung 14: 21-22.
- [Appel 2005] Appel, D. Recycling von Gips bei Kanuf Ipshofen, persönliche Mitteilung per eMail vom 10.01.2005.
- [Arendt 2001] Arendt, M. Kreislaufwirtschaft im Baubereich: Steuerung zukünftiger Stoffströme am Beispiel von Gips. 2001. Dissertation, Universität Heidelberg.
- [Bartels et al. 2002] Bartels, H., Basten, M., Gimpel, R., Hauer, B., Schneider, M., et al. Nachhaltigkeit und Zementindustrie - Dokumentation von Beiträgen und Handlungsoptionen. 2002. Düsseldorf, Verlag Bau + Technik.
- [Bauschutt BaWü 2004] „Vorläufige Hinweise zum Einsatz von Baustoffrecyclingmaterial“ vom 13. April 2004 und ergänzender Erlass vom 10. August 2004, überreicht durch (ISTE 2004).
- [Bejan et al. 1996] Bejan, A., G. Tsatsaronis, und M. Moran, 1996. Thermal design and optimization, Wiley, New York u.a.
- [Bertram 2003] Bertram, H.U.: Fachliche Grundlagen für die Überarbeitung der LAGA-Mitteilung 20, Umweltministerium Niedersachsen, Nov 2003 (http://www.laga-online.de/download/vortrag_bertram.pdf).
- [Bhattacharya 1976] Bhattacharya, A., 1976. Production of Sulphuric Acid and Cement from Phosphogypsum using the OSW Process. Chemical Age of India 27: 1009-1014.
- [BMWA 2003] BMWA. Der Bergbau in der Bundesrepublik Deutschland 2002. 2003. Berlin, Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) in Zusammenarbeit mit den Bergbehörden der Länder.
- [BVG 2003] BVG. Gips-Datenbuch. 2003. Darmstadt, Bundesverband der Gipsindustrie e.V.
- [Cesnovar 2004] Cesnovar, R. Laborversuche zur Reduktion von CaSO₄ durch Kohlenstoff. 2004.
- [Chapman et al. 1999] Chapman, C., Peters, R., und Wojak, B., Development of Process to Manufacture Glass Products from Phosphogypsum. 1999. Florida Institute of Phosphate Research. FIPR Publication #01-153-163.
- [DepV 2002] Verordnung über Deponien und Langzeitlager DepV - Deponieverordnung. 24. Juli 2002.

- [DIN 38414] DIN 38414 Teil 4. Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser-, und Schlammuntersuchung. Schlamm und Sedimente (Gruppe S). Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S. 4). Oktober 1984.
- [Doetsch und Leuchs 2004] LAGA Mitteilung 20. Überarbeitung der Zuordnungswerte Eluat im Rahmen der UAG Bodenwerte. Ergebnisvermerk der Gespräche zwischen Prof. Doetsch und Dr. Leuchs im Dezember 2003 und Januar 2004, 1.HJ 2004, LAGA-Dokument „Hintergrundpapier_Eluat_040331.pdf“.
- [EEG 2000] Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG), April 2000
- [EEG 2004] EEG. Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich (EEG). Bundesgesetzblatt (BGBl. I, S. 1918 ff). 2004.
- [Erlass BaWü 2004] Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg: "Vorläufige Hinweise zum Einsatz von Baustoffrecyclingmaterial" vom 13. April 2004 und ergänzender Erlass vom 10. August 2004.
- [ESA/EFMA 2000] ESA/EFMA. Production of Sulphuric Acid. Booklet No 3 of 8. 2000. The European Sulphuric Acid Association (ESA) and the European Fertilizer Manufacturers Association (EFMA).
- [EUWID 27 2003] NN: "SVZ darf Shredderleichtfraktion aus Altautos stofflich verwerten". EUWID Nr. 27 vom 01. Juli 2003, S. 7.
- [EUWID 14 2004] EUWID, 2004. Marktbericht für Altholz. EUWID Recycling und Entsorgung 14, S. 21-22.
- [EUWID 18 2004] NN: " Verwertungszentrum Schwarze Pumpe droht in wenigen Wochen Stilllegung". EUWID Nr. 18 vom 27.04.2004, S. 3.
- [EUWID 45 2004] Altholz weitaus wichtigste Fraktion bei neu errichteten Biomasseanlagen. EUWID Recycling und Entsorgung 45: 3.
- [EUWID 49 2004] NN: "Preise und Gebühren der Abfallverbrennung und Deponierung Oktober/November 2004". EUWID Nr. 49 vom 30.11.2004, S. 18.
- [Fleischer et al. 1995a] Fleischer, G., Bargfrede, M. und Schiller, U. Untersuchung des Standes der Technik zur Vermeidung und Verwertung von Abfallsäuren und Gipsen mit produktionsspezifischen Beimengungen-Band I: Säuren aus der chemischen Industrie. Forschungsbericht 10301375/06. 1995a. Berlin, Umweltbundesamt. Texte / Umweltbundesamt ; 95,8.
- [Fleischer et al. 1995b] Fleischer, G., Bargfrede, M. und Schiller, U. Untersuchung des Standes der Technik zur Vermeidung und Verwertung von Abfallsäuren und Gipsen mit produktionsspezifischen Beimengungen-Band II: Rückstandsgipse aus

- der chemischen Industrie und Säuren aus der NE- Metall-Industrie. Forschungsbericht 10301375/06. 1995b. Berlin, Umweltbundesamt. Texte / Umweltbundesamt ; 95,8.
- [GAP 2002] LAWA. Grundsätze des vorsorgenden Grundwasserschutzes bei Abfallverwertung und Produkteinsatz – (GAP-Papier), Mai 2002
- [GewAbfV] Verordnung über die Entsorgung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen GewAbfV - Gewerbeabfallverordnung. 19. Juni 2002.
- [Grotheer 2000] Grotheer, J (2000): Umweltverträglichkeit von Kraftwerksreststoffen bei ihrem Einsatz im Landschaftsbau. Labor-und Lysimeteruntersuchungen von bodenhydrologischen Prozessen und anorganischen Schadstoffausträgern. Dissertation, Göttingen 1998. Abteilung Landschaftsökologie am Geographischen Institut der Universität Göttingen. EcoRegio Heft 3, 10/2000. ISBN 3-933 441-04-8
- [Haase 1987] Haase, R. Beitrag zur Verwertung von Abprodukten im Gips-Schwefelsäure-Verfahren. 1987. Halle, Univ., Fak. für Naturwissenschaften.
- [Hamm et al. 2004] Hamm, H., H.J. Kersten, und R. Hueller, 2004. 25 years experience gained in the European Gypsum Industry with the use of FGD gypsum. CEMENT INTERNATIONAL 2: 93-102.
- [Härig et al. 1996] Härig, S., K. Günther, und D. Klausen, 1996. Technologie der Baustoffe, C.F. Müller Verlag, Hüthig.
- [Hull et al. 1957] Hull,W.Q., F.Schon, und H.Zirngibl, 1957. Sulphuric Acid from Anhydrite. Industrial and Engineering Chemistry 49: 1204-1214.
- [Hummel 1997] Hummel, H.-U. (1997): Recycling von Gipsplatten. Beitrag zum Darmstädter Massivbau-Seminar , Band 18, Oktober 1997. <http://www.b-i-m.de/>
- [Jang und Townsend 2001] Jang, Y.C. und T. Townsend, 2001. Sulfate leaching from recovered construction and demolition debris fines. Advances in Environmental Research 5: 203-217.
- [ISTE 2004] LÖSUNGSWEG statt SONDERWEG für Baden-Württemberg. Stellungnahme der Fachgruppe Recycling-Baustoffe im Industrieverband Steine und Erden Baden-Württemberg e.V. (ISTE) zum Erlass des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg vom 13.04.2004: "Vorläufige Hinweise zum Einsatz von Baustoffrecyclingmaterial" (inkl. Produktstatus), Ostfildern
- [Kaufman et al. 1996] Kaufman, E.N., M.H. Little, und P.T. Selvaraj, 1996. Recycling of FGD gypsum to calcium carbonate and elemental sulfur using mixed sulfate-reducing bacteria with sewage digest as a carbon source. Journal of Chemical Technology and Biotechnology 66: 365-374.

- [Kaufman et al. 1997] Kaufman, E.N., M.H. Little, und P.T. Selvaraj, 1997. A biological process for the reclamation of flue gas desulfurization gypsum using mixed sulfate-reducing bacteria with inexpensive carbon sources. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 63-5: 677-693.
- [Kelly et al. 2004] Kelly, T., Buckingham, D., DiFrancesco, C., Porter, K., Goonan, G., Sznoppek, J., Berry, B., und Crane, M. Historical Statistics for Mineral and Material Commodities in the United States, Version 8.8. U.S. Geological Survey Open-File Report 01-006. 2004. Washington, DC, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.
- [Kersten 2004] Kersten, H. J. Informationen zu den Gipsströmen in Deutschland, Bundesverband der Gipsindustrie. 2004.
- [Kitto 2004] Kitto, M., 2004. Recent Trends in the sulphur and sulphuric acid markets. *Sulphur* 24-28.
- [Klauss 2000] Klauss, J., 2000. Reduzierendes Brennen von Zementklinker im Drehofen, ein Weg zur Senkung der NO_x-Emissionen? *Zkg International* 53: 132-144.
- [Kouloheris 1981] Kouloheris, A.P., 1981. Evaluation of Potential Commercial Processes for the Production of Sulfuric Acid from Phosphogypsum.
- [Kouloheris 1982] Kouloheris, A.P., Evaluation of Fluid Bed Decomposition of Phosphogypsum. 1982. Florida Institute of Phosphate Research. FIPR Publication #01-002-002.
- [KrW-/AbfG] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen KrW-/AbfG - Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz. 27. September 1994.
- [Kühne1949] Kühne,H., 1949. Entwicklung des Gips-Schwefelsäure-Verfahrens nach Müller-Kühne. *Chemie Ingenieur Technik* 21: 227-229.
- [LAGA 1997] LAGA-Merkblatt 20 "Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen - technische Regeln" Stand 06.11.1997.
- [LAGA20 2004] Mitteilung 20. Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen - Technische Regeln - (Stand 6. November 2003) Herausgegeben von der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA), 5., erweiterte Auflage 2004, ISBN: 3-503-06395-1, Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- [LAGA TR Boden 2003] Zuordnungswerte LAGA TR Boden (Entwurf vom 9.07.03), wiedergegeben bei [Doetsch und Leuchs 2004].

- [Länderausschuss Bergbau 2002] Länderausschuss Bergbau. Entwurf Anforderungen an die Verwertung von bergbaufremden Abfällen im Bergbau über Tage - Technische Regeln, Stand 03.12.2002. 2002.
- [Landratsamt Lörrach 1997] Landratsamt Lörrach. Abfallgebühren Baden-Württemberg Ergebnisse der Umfrage 1997. 1997. Lörrach, Landratsamt Lörrach, Abfallwirtschaft Landkreis Lörrach.
- [Lang 2002] Lang, A., Altholzverwertung, Altholzverordnung. 2002. Quedlinburg , Fachverband für Holzschutz und Holzbau Sachsen-Anhalt e.V. 9. Quedlinburger Holzbautagung "Ökologischer Holzschutz und Holzbau".
- [Lund-Nielsen 2005] Lund-Nielsen, H., Informationen über das Sammelsystem der Gips Recycling A/S. 2005.
- [Marvin 2000] Marvin, E., Gypsum Wallboard Recycling and Reuse Opportunities in the State of Vermont. 2000. Vermont Department of Environmental Conservation, Waste Management Division.
- [Meininger 2000] Meininger, S., Konzept zur Wiederinbetriebnahme der Gipsschwefelsäureanlage BTF-Wolfen, ehemals WSZ Wolfener Schwefelsäure und Zement GmbH. 2000.
- [Menteroda Recycling 2005] Menteroda Recycling. Auszug Preisliste für die Verwertung von Gips zur Haldenrekultivierung. 2005. Menteroda Recycling.
- [Müller 1999] Müller, A., Materialbilanzen und Verwertungswege für Baustellenabfälle. 1999. Weimar. 7. Weimarer Fachtagung über Abfall- und Sekundärrohstoffwirtschaft 1999.
- [Müller 2002] Müller, H., 2002. Sulfuric Acid and Sulfur Trioxide. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH Verlag.
- [Munn und Carr 1996] Munn, D.A. und J. Carr, 1996. Cropland utilization of ground drywall. Biocycle 37: 57.
- [Musick 1992] Musick, M., 1992. Recycling Gypsum from C&D Debris. Biocycle 33: 34-36.
- [Nettke 2004] Nettke. Aktuelle Marktpreis für technische Schwefelsäure. 17-12-2004.
- [Ober 2003] Ober, J.A., 2003. Sulfur. Minerals Yearbook, Volume I, Metals and Minerals, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Washington, DC.
- [Obermeier und Markowski 2002] Obermeier, T., Markowski, J., "Gasification of shredder residue at SVZ Schwarze Pumpe". International Automobile Recycling Congress. Geneva, März 2002.

- [PCBAfallIV 2000] PCBAfallIV. Verordnung über die Entsorgung polychlorierter Biphenyle, polychlorierter Terphenyle und halogenerter monomethyldiphenylmethane (PCB/PCT-Abfallverordnung - PCBAfallIV). BGBl. I 2000 Nr. 28 S. 932. 2000.
- [RL 2000/76] Richtlinie 2000/76/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Dezember 2000 über die Verbrennung von Abfällen. ABl. Nr. L 332. Stand Mai 2001.
- [Reinhardt 2005] Reinhardt, T., Forschungsstelle Industrielle Stoffkreisläufe bei der HIM GmbH. Preise von Sekundärbrennstoffen, persönliche Mitteilung. 2005.
- [Rutherford et al. 1994] Rutherford, P.M., M.J. Dudas, und R.A. Samek, 1994. Environmental impacts of phosphogypsum. The Science of the Total Environment 149: 1-38.
- [Schaller 1988] Schaller, K., Praktikum zur Bodenkunde und Pflanzenernährung, Geisenheimer Berichte, 2, 458 S., Geisenheim, 1988, zitiert bei [Grotheer, 2000].
- [Schießl und Müller 1998] Schießl, P. und Müller, C., Verwendungsmöglichkeiten von Materialien, die bei der Aufbereitung von Altbeton/Bauschutt anfallen und nicht wiederverwertbar sind. BiM-Projekt-Nr. B/04, Zwischenbericht F4550/2, Statusseminar 19.02.1998. 1998. Baustoffkreislauf im Massivbau (BiM). <http://www.b-i-m.de>.
- [Schenk et al. 2003] Schenk, D., Hofmann, T. und Karnuth, M., Elution von Stoffen aus Recyclingmaterial im Bauwesen. Abschlussbericht BBR Forschungsprojekt, Universität Mainz, 2003.
- [Schmidt 2000] Schmidt, M., 2000. Recycling-Baustoffe - Ersatz oder Ergänzung für Kies, Sand und Naturstein? Kies und Sand 13-16.
- [Seifert et al. 1998] Seifert, W., Buttke, B., Vierrath, H., "Brenn- und Synthesegas aus Abfall". Brennstoff Wärme Kraft 50 (1998) Heft 10. Spezialteil. S. S14-S18.
- [Stadt Karlsruhe 2003] Stadt Karlsruhe. Satzung der Stadt Karlsruhe über Gebühren für die Abfallentsorgung. vom 9. Mai 1989 in der Fassung vom 16. Dezember 2003. 2003.
- [Statistisches Bundesamt Deutschland 2002] Statistisches Bundesamt Deutschland. Erhebung über die Aufbereitung und Verwendung von Bauschutt, Baustellenabfälle, Bodenaushub und Straßenaufbruch 1998. April 2002. Wiesbaden, Statistisches Bundesamt Deutschland.
- [TA Abfall 1991] Zweite allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen, biologischen Be-

handlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen. TA Abfall. 12. März 1991.

[TA Sied 1993] Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen. TA Siedlungsabfall. 14. Mai 1993.

[Tauber 1988] Tauber, Clemens, Spurenelemente in Flugaschen. Kohle-Kraftwerk-Umwelt. TÜV Rheinland, Köln, 1988.

[TEHG 2004] TEHG. Gesetz für die Umsetzung der Richtlinie 2003/87/EG über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft (Treibhausgas-Emissionshandels-Gesetz – TEHG). 2004.

[Theis, Wirth 1977] Theis, T.L., Wirth, J.L., Sorptive Behavior of Trac Metals on Fly Ash in Aqueous Systems. Environ. Sci.Techn., 11, 1096-1100, 1977.

[TL Min-StB 2000] Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau (Gesteinskörnungen und Werksteine im Straßenbau) Ausgabe 2000.

[van Oss 2002] van Oss, H., 2002. Cement. Minerals Yearbook, Volume I, Metals and Minerals, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Washington, DC.

[VDI 2003] VDI Verein Deutscher Ingenieure. VDI-Richtlinie: VDI 2094, Emissionsminderung - Zementwerke. VDI Verein Deutscher Ingenieure. 2003. Düsseldorf.

[VDZ 2003] VDZ. Umweltdaten der deutschen Zementindustrie. 2003. Düsseldorf , Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) .

[VersatzV 2002] Verordnung über den Versatz von Abfällen unter Tage VersatzV - Versatzverordnung. 24. Juli 2002.

[Wachs, B. 1988] Wachs, B.: Gewässerrelevanz der gefährlichen Schwermetalle. Stoffe im Abwasser und Oberflächenwasser. Münchener Beiträge Abwasser, Fischerei und Flussbiologie, 42, S.176-243, zitiert bei [Grotheer, 2000].

[Wallace 1994] Wallace, A., 1994. Use of Gypsum on Soil Where Needed Can Make Agriculture More Sustainable. Communications in Soil Science and Plant Analysis 25: 109-116.

[Weber, J. 2001] Weber, J., Bestandsaufnahme zur Umweltverträglichkeit von RC-Baustoffen – Ein Beitrag zur Produktdefinition. In Tagungsdokumentation der Recycling-Baustoff-Tage in Berlin, November 2001.

- [Weil 2004] Weil, M., Ressourcenschonung und Umweltentlastung bei der Betonherstellung durch Nutzung von Bau- und Abbruchabfällen, Dissertation, Darmstadt 2004.
- [Weil 2005] Weil, M., Preise für Zement, mündliche Information. 2005.
- [Wetzig 2005] Wetzig, Preise für Verwertung von Gipsabfällen durch Bergversatz unter Tage, persönliche Mitteilung, 31.01.2005, K+S Entsorgung GmbH. 2005.
- [Wheelock und Boylan, 1960] Wheelock, T. und D. Boylan, 1960. Reductive Decomposition of Gypsum by Carbon Monoxide. Industrial and Engineering Chemistry 52: 215-218.
- [Wheelock und Boylan, 1963] Wheelock, T. und Boylan, D., Reductive Decomposition of Calcium Sulfate. [US Patent # 3,087,790]. 1963.
- [Wheelock und Boylan 1971] Wheelock, T und Boylan, D., Process for High-Temperature Gaseous Reduction of Calcium Sulfate. [US Patent # 3,607,045]. 1971.
- [White und Burger 1993] White, E.H. und M.E. Burger, 1993. Available Gypsum - Construction Drywall As A Soil Amendment. Biocycle 34: 70-71.
- [Wolkowski 2000] Wolkowski, R.P., 2000. Land application of crushed gypsum wall-board waste for alfalfa. Communications in Soil Science and Plant Analysis 31: 187-199.
- [Zement Jahresbericht 2003 – 2004] Zement Jahresbericht 2003 - 2004. 2004. Düsseldorf, Bundesverband der Deutschen Zementindustrie.
- [ZuG 2007] Gesetz über den nationalen Zuteilungsplan für Treibhausgas-Emissionsberechtigungen in der Zuteilungsperiode 2005 – 2007 (Zuteilungsgesetz 2007 – ZuG 2007). Bundesgesetzblatt Jahrgang 2004 Teil I Nr. 45, ausgegeben zu Bonn am 30. August 2004.
- [ZuV 2007] Verordnung über die Zuteilung von Treibhausgas-Emissionsberechtigungen in der Zuteilungsperiode 2005 – 2007 (Zuteilungsverordnung 2007 – ZuV 2007). Bundesgesetzblatt Jahrgang 2004 Teil I Nr. 46, ausgegeben zu Bonn am 31. August 2004.
- [17. BImSchV 2003] Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes 17. BImSchV - Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen. Stand Aug. 2003.
- [1999/31/EG] Richtlinie 1999/31/EG des Rates vom 26. April 1999 über Abfalldeponien.

[2003/33/EG] Entscheidung 2003/33/EG des Rates vom 19. Dezember 2002 zur Festlegung von Kriterien und Verfahren für die Annahme von Abfällen auf Abfalldeponien gemäß Artikel 16 und Anhang II der Richtlinie 1999/31/EG.

[4. BImSchV 2004] Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes 4. BImSchV - Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen. Stand Januar 2004.

[6Entw. DAfStb Richtl. 2002] Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach 4226-100. Teil 1: Anforderungen an die Betonzusammensetzung für die Bemessung nach DIN 1045-1. 6. Entwurf, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb). Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.), Beuth, Berlin, Oktober 2002.

[75/442/EWG] Richtlinie des Rates 75/442/EWG vom 15. Juli 1975 über Abfälle.

Anhang 1:

Lysimeterversuche zum Einsatz von Flugasche und REA-Gips im Landschaftsbau

Vorbemerkung

In einem Projekt „Bodensubstrat im Landschaftsbau“, 1989 von den Energieversorgungsunternehmen Nordwürttembergs und Nordbadens in Auftrag gegeben, wurden Kraftwerksreststoffe aus Kohlekraftwerken mit unterschiedlicher Entschwefelungstechnik auf ihre Eignung als Einsatzstoffe im Landschaftsbau untersucht (vgl. Tabelle 8-1, aus [Grotheer 2000]).

Diese Versuche haben Anlass zur Besorgnis bei gemeinsamer Ablagerung von Gips und zementhaltigem Bauschutt gegeben. Deshalb wird im Folgenden eine Zusammenfassung der im Zusammenhang mit Sulfat wesentlichen Ergebnisse der Arbeit gegeben.

Tabelle 8-1: Herkunft der Kraftwerksreststoffe für die Lysimeterversuche

	Flugasche	REA-Gips	SAV-Produkt	Technik
Rheinhafendampfkraftwerk, Block 7 (EnBW, damals Badenwerk AG)	X 90 % FA-Anteil an Gesamtasche	X		Trockenfeuerung mit nasser Rauchgasentschwefelung
Kraftwerk Walheim, Block 1 und 2 (Neckarwerke AG)	60 % FA-Anteil an Gesamtasche (bei Rückführung 0%)		X 5 % Anteil an verbrannter Kohlemenge	Schmelzkammerfeuerung und quasitrockener Rauchgasentschwefelung

Anforderungen an das Bodensubstrat

An den Ober- und Unterboden wurden bodenphysikalisch unterschiedliche Anforderungen gestellt. Der Oberboden sollte über eine gute Wasserspeichereigenschaft verfügen und der Unterboden über eine gute hydraulische Leitfähigkeit.

Erfasst wurde die bodenphysikalische Charakteristik der Testsubstrate im Vergleich zu Sandboden und Tonboden.

Untersucht wurden

- der Schadstoffaustrag ins Grundwasser
- die Optimierung der Schadstofffixierung durch hinreichende Aggregation beim Pelletierungsvorgang
- die Durchwurzelbarkeit des Substrates
- die Wasserspeicherfähigkeit und
- der Oberflächenabfluss

Die Versuche wurden an einer existierenden und entsprechend nachgerüsteten Lysimeteranlage in Scheibhardt durchgeführt.

Herstellung des Bodensubstrates

Zur Herstellung des Bodensubstrates wurden die Ausgangssubstrate unter Zugabe von 3-5 % Portland-Zement pelletiert. Angestrebt wurde eine Korngröße von 1-2 mm bei insgesamt 800 m³.

Es galt einen Wassergehalt von 16 Vol.-% in einem sehr engen Variationsbereich (+/- 2-3%) zuzuführen. Änderungen im Wassergehalt wirkten sich auf das Korngrößenspektrum aus. Beim Gips/Zement Substrat konnte vermutlich aufgrund der Wasserkonkurrenz keine vollständige Hydratation des Zements erreicht werden. Dies ging zu Lasten der Pelletstabilität. Daten zur Konditionierung der Ausgangssubstrate durch Pelletierung mit Hilfe von Portland-Zement siehe Tabelle 4-1 in Abschnitt 4.

Salzgehalt der Bodensubstrate

Charakteristisch für das Substrat ist z. B. ein relativ hoher Salzgehalt der sich auf die Verfügbarkeit des gespannten Wassers im Substrat auswirkt. Sättigungsextrakte mitteleuropäischer Böden enthalten gewöhnlich pro kg 0,2 – 0,5g Salz [Schaller 1988], (zitiert in [Grotheer 2000]). Das FA/G Substrat enthält das Vierfache, das SAV-Substrat das 20-fache des „normalen“ Salzes im Sättigungsextrakt. Im Mittel tritt eine Beeinträchtigung des Pflanzenwachses ab 1g Salz pro kg Boden ein. Nach zwei Jahren wurde dieser Wert bei beiden Substratböden bis in 1m Tiefe unterschritten.

Näherungswerte für die Änderung der Salzzusammensetzung in den Bodenlösungen finden sich in ([Grotheer 2000], Abb. 25, S.86).

Die Konzentration ausgewählter Ionen in der Bodenlösung normaler Böden und der Substrate am Anfang und am Ende des dreijährigen Testzeitraums zeigt Tabelle 4-2 in Abschnitt 4 (ausführlich in [Grotheer 2000], Tab 38, S.87).

Hier soll das Augenmerk auf die Freisetzung von Schwermetallen in den Lysimeterversuchen gelegt werden. (Denn diese Freisetzungen sind es, die angesichts der Ergebnisse den Anlass zur Besorgnis bei möglicher gemeinsamer Ablagerung von Gips und zementhaltigem Bauschutt gegeben haben.) Im Hinblick auf aquatische Ökosysteme wurden Toxizitätsklassen erstellt [Wachs 1988].

Tabelle 8-2: Toxizitätsklassen für das aquatische Ökosystem [Wachs 1988]

Tox-Klasse	sehr toxisch	kritisch toxisch	mäßig toxisch	gering toxisch
Schwermetalle	Ag, Cd, Cr(VI), Cu, Hg	Pb, Ti, Zn	Co, Ni, Sn, V	Fe, Cr(III), Mo

Löslichkeit und PH-Wert

Weiter hängt die Löslichkeit der Elemente vom pH-Wert ab. Anionische Elemente wie B, Mo, F, Se, Cr, und V sind in alkalischer Umgebung sehr löslich. Dagegen steigt die Löslichkeit der kationischen Elemente Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn bei niedrigen pH-Werten.

Die basischen Oxide CaO und MgO haben bei Steinkohlenflugaschen einen Anteil von 10% und bei Braunkohlenflugaschen einen Anteil von 50%. Die SiO₂-Oxide haben Anteile von 50% und 10% respektive. Die pH-Werte der beteiligten Stoffe und der Lysimeterwerte zeigt Tabelle 8-3.

Tabelle 8-3: pH-Werte der beteiligten Stoffe und Lysimeterwerte

	Einzelbestandteile	beim Befüllen der Lysimeter	Über gesamte Profiltiefe im Lysimeter
FA/G	-	8,9	10,8-7,4
SAV	-	10,8	10,1-6,8
Gips	7,6		
FA	12,2		
Porenwasser des Zementssteins	13		

Spurenelemente in Flugaschen

Flugaschen setzen sich zu 70-90 % aus kugeligen Teilen, im wesentlichen Quarzit und Mullit, zusammen, deren kristalliner Kern häufig von einer Glasschicht umhüllt ist. Teilchen > 125 µm sind häufig sehr porös, bestehen aus nicht vollständig ausgebrannter Kohle und enthalten deutliche Schwefelanteile. Die Kornform hängt –unabhängig von der Feuerungsart – vom mazeralformbedingten¹¹ Schwellvermögen ab [Grotheer 2000].

Weit überwiegend bestehen Flugaschen aus Alumosilikatverbindungen sowie aus Oxiden von Eisen, Alkalien und Erdalkalien. Mineralogisch handelt es sich um Gemenge aus unterschiedlichen kristallinen und amorphen Verbindungen. Bei den amorphen Phasen handelt es sich um Koks und Gläser, bei den kristallinen um Quarz, Mullit, Hämatit, Magnetit, und Anhydrid. Alumosilikatverbindungen sowie aus Oxiden von Eisen, Alkalien und Erdalkalien. Außer Quarz werden alle Phasen neu gebildet.

Der Verbrennungsprozess in Staubfeuerungen führt durch Verdampfungs-, Kondensations-, Sublimations-, Sorptions- und Diffusionsvorgänge zu einer Umverteilung der in den Kohlen enthaltenen Spurenelemente [Tauber 1988]. Zitiert wird die Arbeit [Theis, Wirth 1997], nach der die Spurenelemente hauptsächlich auf den Oberflächen der

¹¹ Das organische Material in Sedimenten und Kohlen ist heterogen zusammengesetzt. Die Mazerale in den Kohlen können als Analogie zu den Mineralen in den anorganischen Gesteinen betrachtet werden. Ein Mazerale ist definiert als ein mikroskopisch identifizierbarer in sich einheitlicher Bestandteil, der keine Mineralsubstanzen enthält (International Handbook of Coal Petrography, 1971, 1985). Die Mazerale werden in drei Hauptgruppen, die Vitrinite (Huminiten), die Liptinite und die Inertinite eingeteilt. Die Gruppen werden nach den unterschiedlichen Ausgangsmaterialien, den verschiedenen Erhaltungsformen und den unterschiedlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften unterteilt. Ausgangsprodukte der Liptinite sind z. B. Wachse und Cuticulen, der Vitrinite Zellulose und Lignin und der Inertinite oxidierte kohlige Bestandteile. Generell führt die zunehmende Aromatisierung von organischen Makromolekülen und die Kondensation der aromatischen Gruppen zu einer Erhöhung der Vitrinit-Reflexion. Die verschiedenen Mazeralegruppen zeigen aber bei gleicher progradier Diageneseentwicklung einen unterschiedlichen Inkohlungspfad (Abb. 27). Vitrinit zeigt im Gegensatz zu Liptinit und Inertinit einen linearen Inkohlungspfad und wird deshalb zur Bestimmung des Inkohlungsgrades verwendet.

Die Frankenwälder Querzone: Entwicklung einer thermischen Anomalie im Saxothuringikum Inaugural-Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften der Justus-Liebig-Universität Gießen (Fachbereich Geowissenschaften und Geographie) vorgelegt von Volker Kunert Gießen, Juni 1999

Flugaschen angelagert sind. Es handelt sich dabei um chalkophile Elemente wie Zn, Ga, As, Se, Mo, Cd, Sb, W oder Pb [Tauber 1988]. Bei Pb und Zn betrug der an Oberflächen von Trockenfeuerungsflugaschen gebundene Anteil knapp 50 %, bei Cd 17% des Gesamtgehaltes. Schmelzfeuerungsflugaschen weisen höhere Gesamtgehalte und höhere Oberflächenanteile auf.

Der Spurenelementgehalt von Flugaschen und Böden ist größenordnungsmäßig ähnlich. Eine Ausnahme bilden die in der Flugasche angereicherten biologisch toxischen Elemente B, Mo und Se [Grotheer 2000, S. 144].

Die Aluminiumsilikat-Glasphase enthält vor allem Alkali- und Erdalkalimetalle, As, Cd, und Pb. In der Phase der magnetischen Verbindungen sind die Übergangselemente V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni sowie Cu und Zn stark angereichert. Die Mullit Quarzphase ist relativ spurenelementfrei. [Tauber 1988, zitiert bei Grotheer 2000, S. 144]

Spurenelementkonzentrationen der Testsubstrate

Die höchsten Spurenelementkonzentrationen in den Testsubstraten stammen aus der Flugasche (vgl. Tab 76, S. 157, [Grotheer 2000]). REA-Gips enthält nur geringe Spurenelementkonzentrationen. Dazwischen liegen die Spurenelementkonzentrationen von Zement, der jedoch nur mit 3-5% am Substrat beteiligt ist, vgl. Tabelle 8-4.

Tabelle 8-4: Schwermetallgehalte der Substrate und der Einzelkomponenten

[mg/kg]	Cd	Co	Cr	Cu	Mo	Ni	Pb	Zn
FA	2,6	127	413	272	37	306	330	653
Gips	0,3	1,4	8	4	0,3	6	6	18
PZ35	0,6	21	116	55	4,9	59	58	91
FA/G-Pellets	1,6	69	236	170	21	167	188	423
SAV-Pellets	2,4	41	75	94	19,5	106	218	259
HF-HClO ₄ -HNO ₃ -Aufschluss								

Durch [Grotheer 2000] hervorgehoben werden besonders hohe Werte:

FA/G-Substrat: Pb, Cr, Mo

SAV-Substrat: Pb, Cd, Mo

Mobilisierbare Spurenelementgehalte

Der aus den Testsubstraten mobilisierbare Chromatgehalt stellte das größte Problem im Projekt dar. Die FA/G-Sickerwässer weisen Chromkonzentrationen zwischen 15.000 und 20.000 µg/l und die SAV-Sickerwässer 200-800µg/l auf. Der Chromatgehalt entspricht bei FA/G den Gesamtchromwerten und bei SAV in den ersten Monaten bei 40%, dann bei 85-95% des Gesamtchromwertes. Solche Werte gelten als extrem umweltunverträglich. [Grotheer 2000, S. 178/179]. Demgegenüber treten Überschreitungen auch bei anderen Spurenelementen in den Hintergrund.

Besonders hohe Spurenelementverluste (>10%) traten in den Lysimeterversuchen auf bei

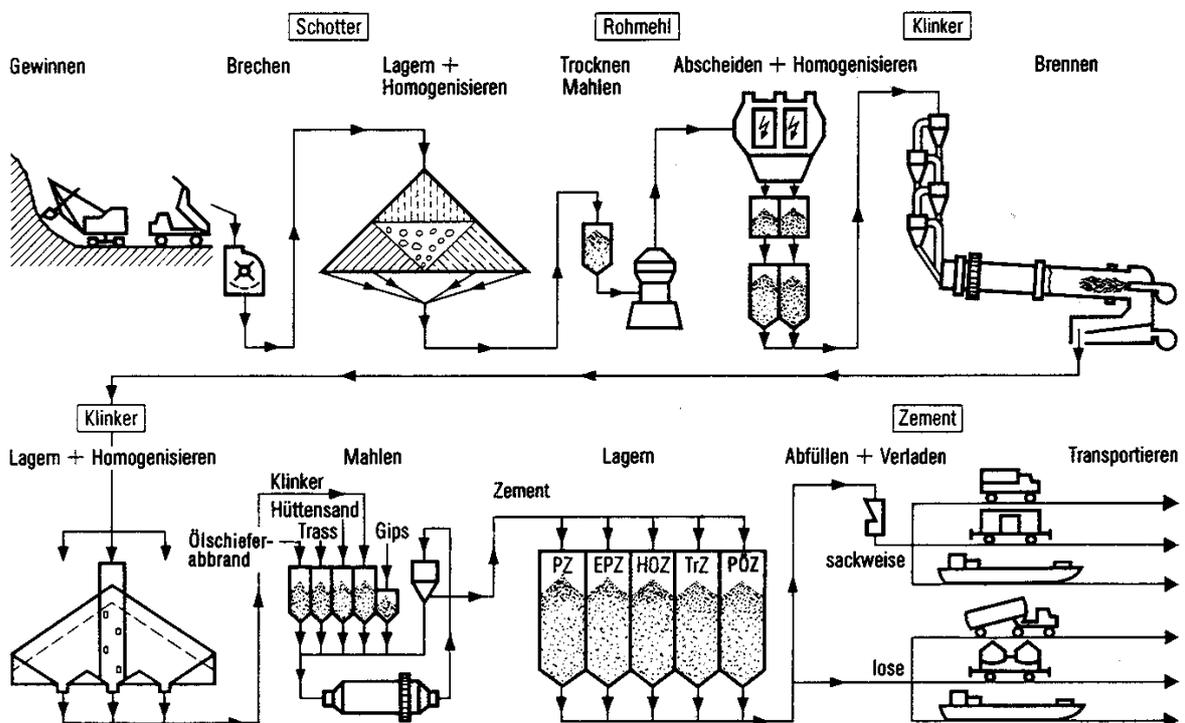
FA/G-Substrat: Pb, Cr, Cu, Mo, Zn

SAV-Substrat: Pb, Cd, Mo

Anhang 2:

Zementherstellung

Die konventionelle Herstellung von Zement beginnt mit dem Abbau der Rohstoffe Kalkstein, Mergel und Ton mit einer anschließenden Vorzerkleinerung im Steinbruch (vgl. [Härig et al. 1996]). Anschließend wird ein Rohstoffgemisch erzeugt, das die einzelnen Bestandteile in einem genau festgelegten Mengenverhältnis enthält. Teilweise ist die Verwendung von Korrekturstoffen wie z. B. Sand, Eisenerz und Tonerde notwendig. Anstelle der natürlichen Rohstoffe gewinnen Abfallstoffe immer mehr an Bedeutung. Das Rohstoffgemisch wird, wie in Abbildung 8-1 dargestellt, in der Rohmühle zu Rohmehl gemahlen. Im nachfolgenden Elektrofilter wird das Rohmehl abgeschieden und anschließend zu den Rohmehlsilos transportiert. Das staubförmige Rohmehl wird zunächst einem Vorwärmer, in der Abbildung ein vierstufiger Zyklonvorwärmer, und dann dem Drehrohr-Ofen zugeführt. Durch den Brennprozess entstehen im Ofen bei Temperaturen zwischen 1250 bis 1500 °C Klinkergranalien. Der entstandene Klinker, wichtigster Bestandteil der unterschiedlichen Zementsorten, muss nach Verlassen des Drehrohr-Ofens gekühlt werden.



Darstellung aus [Härig et al. 1996]

Abbildung 8-1: Schema der Zementherstellung

Im nachfolgenden Elektrofilter wird das Rohmehl abgeschieden und anschließend zu den Rohmehlsilos transportiert. Das staubförmige Rohmehl wird zunächst einem Vorwärmer, in der Abbildung ein vierstufiger Zyklonvorwärmer, und dann dem Drehrohr-Ofen zugeführt. Durch den Brennprozess entstehen im Ofen bei Temperaturen zwischen 1250 bis 1500 °C Klinkergranalien. Der entstandene Klinker, wichtigster Bestandteil der unterschiedlichen Zementsorten, muss nach Verlassen des Drehrohr-Ofens gekühlt werden.

Die notwendige Wärmeenergie wird durch den Einsatz von Kohle, Öl, Gas oder Sekundärbrennstoffen am Drehrohrofenende (Primärfeuerung) und teilweise auch am Drehrohrofenanfang (Sekundärfeuerung) bereitgestellt. Die bei der Verbrennung entstehenden heißen Rauchgase durchströmen im Gegenstrom zum Feststoff den Drehrohrofen und Vorwärmer. Im sogenannten Verbundbetrieb wird das staubhaltige Abgas aus dem Vorwärmer zur Trocknung und Transport des Rohmehls von der Rohmühle zum Silo verwendet. Der Direktbetrieb erfolgt ohne Nutzung der Rohmühle. Das Rohmehl wird dem Ofen direkt aus dem Silo zugeführt, das staubhaltige Abgas aus dem Ofen wird gekühlt und anschließend im Elektrofilter entstaubt (In Abbildung 8-1 nicht dargestellt).

Im letzten Arbeitsschritt der Zementherstellung entstehen die unterschiedlichen Zementsorten. Der Zementklinker wird mit Gips und anderen Zuschlagstoffen, wie Kalkstein, Hüttensand, Steinkohlenflugasche, Trass etc., gemischt und anschließend gemahlen.

Das in Abbildung 8-1 dargestellte Schema gibt einen Überblick über den Aufbau von Anlagen zur Zementherstellung. Sowohl für die Rohmehlvorwärmung als auch für die Klinkerkühlung werden unterschiedliche Techniken eingesetzt. Außerdem existieren für die Unterbrechung von Materialkreisläufen, die sich aufgrund der Flüchtigkeiten einzelner Elemente und chemischer Verbindungen ausbilden, innerhalb der Anlage verschiedene Bypass-Systeme.

Anhang 3: Schwefelsäureherstellung

In Westeuropa wird Schwefelsäure ausschließlich nach dem Kontaktverfahren hergestellt [Müller 2002]. Dabei wird Schwefeldioxid (SO_2) katalytisch zu Schwefeltrioxid (SO_3) umgesetzt. Anschließend reagiert das Zwischenprodukt SO_3 mit Wasser und zu Schwefelsäure. Als Best Verfügbare Technik wird für den Bau neuer Anlagen das Doppelkontaktverfahren empfohlen [ESA/EFMA 2000].

Ein für sämtliche Verfahren gültiges Schema für Prozesse zur Herstellung von Schwefelsäure zeigt Abbildung 8-2 in Anlehnung an eine Darstellung in [ESA/EFMA 2000].

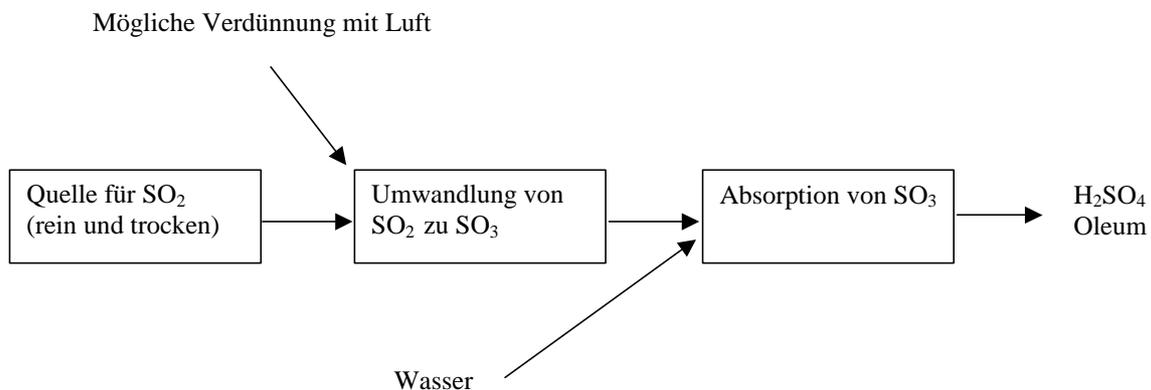


Abbildung 8-2: Allgemeine Darstellung der Schwefelsäureherstellung

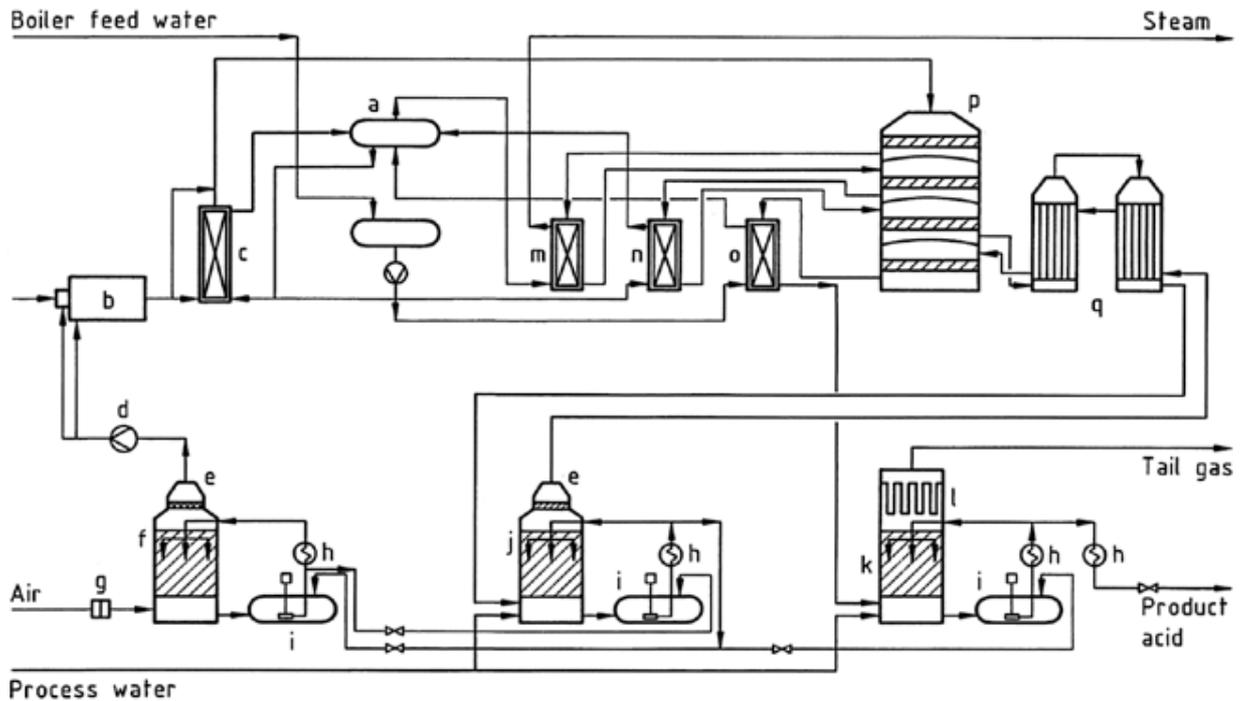
Die Herstellung von SO_2 erfolgt aus den Rohstoffen Schwefel und Pyrit (FeS_2) vor allem nach den folgenden Verfahren:

- Pyritabröstung
- Verbrennung von elementarem Schwefel mit Luft
- Verarbeitung von sulfidischen Erzen von Nichteisen-Metallen
- Regenerierung von Schwefelsäure
- Spaltung von Gips und Metallsulfaten.

Die entstehenden Rohgase weisen SO_2 -Gehalte im Bereich von 0,3 bis 12 Vol.-% auf. Vor der weiteren Verwendung wird das Rohgas abgereinigt. Es erfolgt eine trockene Grob- und Feinstaubabscheidung, eine nasse Gaswäsche, bei der flüchtige und gasförmige Störstoffe abgeschieden werden, eine Gaskühlung und -trocknung sowie eine nasse Feinstaubabscheidung mit einem nassen Elektrofilter.

Beim Kontaktverfahren erfolgt eine exotherme Reaktion des gereinigten SO_2 zu SO_3 an V_2O_5 -Katalysatoren bei Temperaturen im Bereich von 420- 620 °C. Das Doppelkontaktverfahren wird als Best Verfügbare Technik zur Umsetzung von SO_2 aus der Schwefelverbrennung angesehen [ESA/EFMA 2000].

Abbildung 8-3 zeigt den schematischen Aufbau einer Doppelkontakthanlage mit vier Katalysatorhorden.



Darstellung aus [Müller 2002]

a) Dampftrammel; b) Schwefelofen; c) Abhitzekegel; d) Hauptgebläse; e) Feuchtabscheider; f) Trockenurm; g) Luftfilter; h) Kühlturm; i) Säurepumpentank; j) Zwischenabsorber; k) Endabsorber; l) Kerzenfilter; m) Dampfüberhitzer; n) Verdampfer; o) Economizer; p) Katalysatorhorden; q) Zwischenwärmeübertrager

Abbildung 8-3: Prinzipieller Aufbau einer Doppelkontakthanlage mit vorgeschalteter Schwefelverbrennung.

Beim abgebildeten Prozess wird zunächst SO_2 durch Schwefelverbrennung erzeugt. Die Verbrennungsgase gelangen in einen Abhitzekegel, in dem eine Abkühlung auf 420 – 450 °C erfolgt, und anschließend in den Kontaktkessel. Nach der ersten Katalysatorhorde ist das SO_2 -haltige Gas zu 60% in SO_3 umgewandelt. Das gebildete SO_3 wird nach der zweiten oder dritten Katalysatorhorde in einem Zwischenabsorber absorbiert. Hierbei werden die Gase vor dem Zwischenabsorber mit den aus dem Zwischenabsorber austretenden Gasen im Gegenstrom abgekühlt, wobei sich die aus dem Zwischenabsorber austretenden Gase erwärmen. Diese Gase gelangen anschließend

in die nachgeschalteten Katalysatorhorden und in einen Endabsorber. Weitere Verfahren zur Konversion von SO_2 sind in der Literatur (z. B. [ESA/EFMA 2000, Müller 2002]) detailliert beschrieben.

