

Thiel • Thomé-Kozmiensky  
Senk • Wotruba • Antrekowitsch • Pomberger

# MINERALISCHE NEBENPRODUKTE UND ABFÄLLE 10

– Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –



Stephanie Thiel • Elisabeth Thomé-Kozmiensky  
Dieter Georg Senk • Hermann Wotruba †  
Helmut Antrekowitsch • Roland Pomberger

# **Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 10**

– Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky,  
Dieter Georg Senk, Hermann Wotruba,  
Helmut Antrekowitsch, Roland Pomberger (Hrsg.):

**Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 10**

– Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –

ISBN 978-3-944310-72-5 Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Copyright: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc., Dr.-Ing. Stephanie Thiel  
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH • Neuruppin 2023  
Redaktion: Dr.-Ing. Stephanie Thiel  
Erfassung und Layout: Martin Graß, Carolin Pawel, Claudia Naumann-Deppe, Cordula Müller,  
Roland Richter, Janin Burbott-Seidel, Lena Stucke

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

# Inhaltsverzeichnis



## Erhaltung von Bausubstanz versus Rückbau & Recycling

### **Materialkreisläufe in der Bauwirtschaft – Grundlagen einer Circular Economy und des Urban Minings im Gebäudesektor am Beispiel des Berliner Huthmacherhauses**

Sybille Mai und Hannes Giese.....2

## Abfallende und Recyclingbaustoffe

### **Abfallende für Recyclingbaustoffe als wesentliches Element in einer europäischen Kreislaufwirtschaft – ein grenzüberschreitender Vergleich**

Thomas M. Kasper und Dirk Buchsteiner ..... 14

### **Vom Abfall zum Bauprodukt**

Marthe-Louise Fehse..... 26

## Bauabfälle

### **Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen für die Herstellung von Bauprodukten – erforscht, aber kaum umgesetzt**

Frank Hlawatsch ..... 36

### **Verstopfungsfreier Langteilabscheider zur Aufbereitung von Bauschutt und MVA-Rostaschen**

Rainer Bunge ..... 46

### **Technische und logistische Konzepte zum Recycling von Gipskartonplatten**

Jörg-Michael Bunzel und Patrick Farago ..... 62

### **Der Beitrag des Betonrecyclings zu Ressourceneffizienz und Dekarbonisierung**

Christoph Müller.....74

### **Intelligente Robotik im Umgang mit mineralischen Abfällen bei Sanierungsvorhaben**

Philipp Woock..... 86

## Schadstoffe – Grenzen der Kreislaufwirtschaft

### **Abfallmineralogie – Anwendung mineralogischer Methoden und Konzepte zur Bewertung mineralischer Sekundärrohstoffe**

Daniel Vollprecht und Roland Pomberger ..... 100

### **LAGA Mitteilung 23: Vollzugshilfe zur Entsorgung asbesthaltiger Abfälle – Leitplanke Gefahrstoffverordnung und Verwertungskonzept**

Falk Fabian ..... 114

### **Geogene Spurengehalte von Asbest und asbestähnlichen Mineralien in Baumaterialien**

Werner Wruss, Michael Kochberger, Christoph Sutter,  
Oliver Mann und Klaus Wruss ..... 126

### **Forschungsprojekt RECBest – Recyclingmaterial vor Asbest absichern, Erfassung und Ausschleusung von Asbest als Störstoff aus Bau- und Abbruchabfällen zur Recyclingmaterialabsicherung –**

Robert Texter und Dirk Pieper ..... 140

### **Aktuelle Waschverfahren zur erfolgreichen Reinigung von Böden mit PFAS-Belastung**

Benjamin Faigle, Bernhard Volz und Hans-Georg Edel ..... 154

## Rückgewinnung von Ressourcen aus Rost- und Flugaschen

### **Projekt S-CEM im Einsatz für die Zement- und Baustoffindustrie – ein Beitrag zur Produktentwicklung, Dekarbonisierung und Ressourcenschonung**

Marco Abis, Georg Bachmann, Michael Larisch und Jörn Richter ..... 164

### **Ash2Salt – Ressourcenrückgewinnung aus Waste2Energy-Aschen im Industriemaßstab**

Christian Kabbe und Giovanna Chiara ..... 182

## Eisen- und Stahlindustrie – Stoffstromverschiebungen durch Umrüstung

### **Umstellungen in der Eisen- und Stahlindustrie sowie resultierende Herausforderungen**

Dieter Georg Senk und Felix Firsbach ..... 196

### **Strategien für die Nutzung von Schlacken zukünftiger wasserstoffbasierter Stahlproduktionsrouten – Herstellung von Schlacken aus der Elektrohoheisen-Produktion für die Zementindustrie**

David Algermissen, Andreas Ehrenberg, Dominik Ebert und Volkert Feldrappe ..... 212

## **Strategien für die Nutzung von Schlacken zukünftiger wasserstoff-basierter Stahlproduktions- routen – Herstellung von Stahlwerksschlacke basierten Ausgangsstoffen für die Zementindustrie**

Christian Adam, Joachim Schneider, Katharina Schraut, David Algermissen,  
Dominik Ebert, Andreas Ehrenberg, Lars Gronen und Volkert Feldrappe ..... 222

### **RecoDust – von der Pilot- zur industriellen Anlage?**

Wolfgang Reiter, Johannes Rieger, Klaus Doschek-Held und Christoph Thaler ..... 234

## **Kohleausstieg – Stoffstromverschiebungen**

### **Stoffstromverschiebungen durch die Abschaltung der Kohlekraftwerke sowie resultierende Herausforderungen**

Andreas Hugot und Kilian von Bartenwerffer ..... 246

## **Substitutionspotentiale in der Zementindustrie**

### **Mineralische Abfälle als CO<sub>2</sub>-neutrale Rohmaterialien in der Klinkerproduktion**

Mirjam Wolfers, Urs Häseli, Paula Dörfler, Gisela Weibel und Urs Eggenberger ..... 258

### **Bereitstellung von alternativen Bindemittelkomponenten aus Reststoffkombinationen mittels thermischer Behandlung**

Klaus Doschek-Held, Anna Krammer, Florian Roman Steindl, Theresa Sattler  
und Dominik Wohlmuth ..... 270

## **Deponien**

### **Klimaschutzbelange bei der Zulassung von Deponien**

Peter Kersandt ..... 286

### **Einfluss von hydraulischen Effekten auf die Sickerwasserqualität von Schlackendeponien in der Schweiz**

Philipp Ingold und Gisela Weibel ..... 296

### **Sanierung und Rückgewinnung von metallischem Aluminium aus der Aluschlackendeponie Wiener Neustadt (Projekt N6)**

Johannes Czeziel ..... 306

**Dank**..... 319

**Autorenverzeichnis** ..... 323

**Inserentenverzeichnis**..... 327

**Schlagwortverzeichnis** ..... 335

# Wissensplattform



Bislang sind bei uns etwa 2.000 digitale Fachbeiträge erschienen, die in ihrer Gesamtheit einen guten Überblick über technische, wirtschaftliche, rechtliche und politische Entwicklungen geben. Mit unserer Wissensplattform, die im Laufe des Jahres an den Start geht, haben Sie Zugriff auf unsere Veröffentlichungen. Sie können zwischen drei Arten von Lizenzen wählen:

## Unser Angebot für Neugierige: Testlizenz für 0 EUR

Uneingeschränkter Zugriff auf eine kleine Vorauswahl an Beiträgen. Mit jedem neuen Konferenzbuch erscheinen zwei weitere Artikel in Ihrem Portfolio.

## Unser Angebot für Fokussierte: thematische Monats- oder Jahreslizenzen

(Preise variieren je nach Thema und Dauer der Lizenz)

Sie haben Zugriff auf alle Fachbeiträge zu einem Themengebiet.

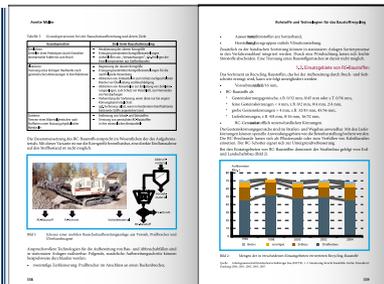
## Unser Angebot für Generalisten: unlimitierte Jahreslizenz für 220 EUR pro Jahr

Sie haben Zugriff auf alle Fachbeiträge der Wissensplattform. Alle Neuveröffentlichungen des TK Verlags werden Ihnen zeitnah zur Verfügung gestellt.

[books.vivis.de](https://books.vivis.de)

Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Dorfstraße 51  
16816 Nietwerder-Neuruppin  
Tel. +49 3391-45 45-0  
E-Mail: [order@vivis.de](mailto:order@vivis.de)



# **Erhaltung von Bausubstanz versus Rückbau & Recycling**

## **Material Cycles in the Building Industry**

### **– Basics of a Circular Economy and Urban Mining Strategy**

### **in the Building Sector Using the Example of the Huthmacherhaus in Berlin –**

Sybille Mai and Hannes Giese

The article outlines the necessity as well as the prerequisites and potentials of a Circular Economy in the construction and real estate industry. To this end, the text first looks at the role of cities as raw material depots for future construction projects and the practice of urban mining. It shows what changes are upcoming to the planning and construction practice and what opportunities are arising for those involved. The article then describes the cradle to cradle design principle as an example of a circular economy model. Central to this is the interaction of two complementary material cycles: a biological and a technical one. In the concluding third part, the text presents the project of a partial renovation of the Huthmacher House in Berlin, which is based on the principles outlined above.

## Materialkreisläufe in der Bauwirtschaft

### – Grundlagen einer Circular Economy und des Urban Minings im Gebäudesektor am Beispiel des Berliner Huthmacherhauses –

Sybille Mai und Hannes Giese

1. Städte als Rohstofflager und Praxis des Urban Mining ..... 3
2. Grundzüge einer Circular Economy mit dem Cradle to Cradle (C2C)-Designprinzip ... 5
3. Das Huthmacher-Haus in Berlin: Teilsanierung mit Materialbewusstsein ..... 7

Der Beitrag skizziert die Notwendigkeit sowie die Voraussetzungen und Potenziale einer Circular Economy (in) der Bau- und Immobilienwirtschaft. Dazu geht der Text zunächst auf die Rolle der Städte als Rohstofflager für künftige Bauvorhaben und die Praxis des Urban Mining ein. Es wird gezeigt, welche Veränderungen auf die Planungs- und Bau-praxis zukommen und welche Chancen sich für die Beteiligten ergeben. Exemplarisch für ein Modell einer Circular Economy beschreibt der Beitrag im Anschluss das Cradle to Cradle-Designprinzip. Zentral hierfür ist das Zusammenspiel zweier komplementärer Materialkreisläufe: eines biologischen und eines technischen. Im abschließenden dritten Teil stellt der Text das Projekt einer Teilsanierung des Berliner Huthmacher-Hauses vor, das sich an den zuvor skizzierten Prinzipien orientiert.

### 1. Städte als Rohstofflager und Praxis des Urban Mining

Die Städte von heute sind die Rohstofflager für die Bauvorhaben von morgen. Das Problem: Niemand weiß so genau, wo welche Rohstoffe in welchen Mengen gebunden sind – und welcher Aufwand demzufolge für deren Rückgewinnung betrieben werden muss. Trotzdem – oder vielmehr genau deshalb – lohnt es sich bereits heute, den Bestand an Gebäuden und gebauter Infrastruktur genau zu erfassen und die darin enthaltenen Baustoffe und Materialien systematisch zu katalogisieren.

Insbesondere auch für bevorstehende Abbruchvorhaben bietet sich dadurch die Chance, Potenziale für die Wiederverwertung oder (noch unmittelbarer) Wiederverwendung zu prüfen. Bauherren können auf diesem Wege aktiv auf die Stoffströme Einfluss nehmen, neue Wege der Verteilung finden und sich mit anderen Akteuren in diesem zukunfts-trächtigen Feld vernetzen. Im Zentrum steht die Absicht, durch dieses Vorgehen Kreisläufe konsequent zu schließen und als Bau- und Immobilienbranche auf dem Weg zu einer echten Kreislaufwirtschaft voranzukommen. Parallel muss es darum gehen, die Hersteller von Bauprodukten dahin zu bringen, ihre Primärmaterialien durch die mittels Urban Mining gewonnenen Sekundärmaterialien zu ersetzen.

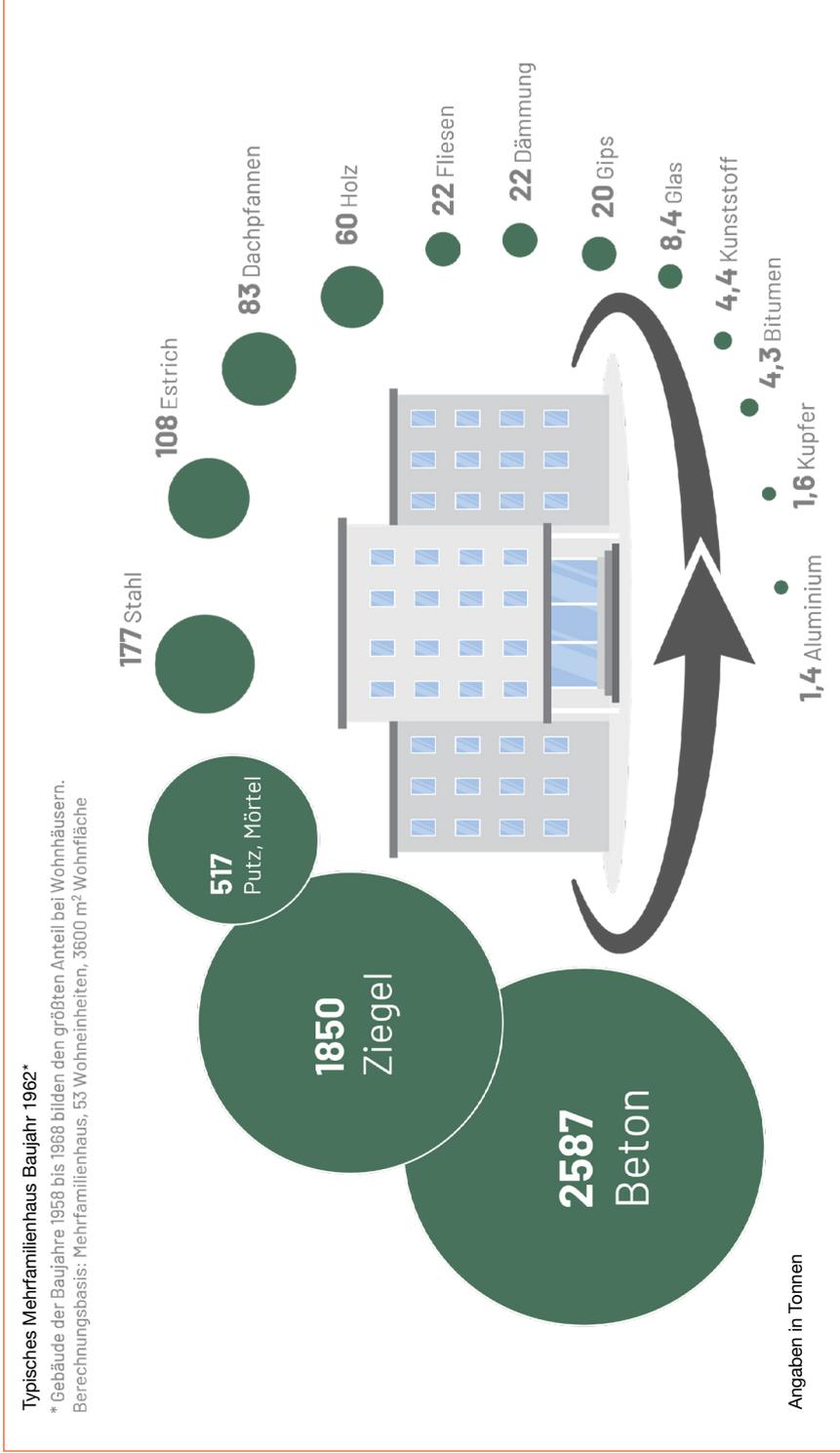


Bild 1: Materielle Zusammensetzung eines typischen Mehrfamilienhauses Baujahr 1962

Quelle: Matthias Heinrich / EPEA – Part of Drees & Sommer

Neben solchen handfesten Aspekten einer neuen Baupraxis können unsere Städte, Quartiere und Gebäude auch in funktionaler wie ästhetischer Hinsicht nur gewinnen: Das Verwenden gebrauchter Bauteile wie Fenster, Türen, Geländer, Betonfertigteile etc. wird zu einer neuen Architektursprache führen. Damit ist ein Prozess angestoßen, in dessen Verlauf sich auch die gestalterischen Horizonte der Architekten und Bauherren weiterentwickeln.

Wenn die gesamte gebaute Stadt als Rohstoffquelle in den Blick rückt, wird dies nicht nur für die Oberfläche einer architektonischen Formensprache Folgen haben. Auch für das verborgene *Innere* zieht dies grundlegende Änderungen nach sich. Beispielsweise müssen auch die Materialien der Gebäudetechnik systematisch erfasst werden. Dies betrifft unter anderem Verteilnetze oder Energie- und Steuerungszentralen. Schematisch lässt sich schon jetzt sagen: Je stärker ein Gebäude etwa bei Klimatechnik, Belüftungsanlagen oder Automatisierung technisiert ist, umso mehr kommt es darauf an, auch diese einfach und ohne Materialverluste zugänglich zu machen.

Technische Anlagen bestehen meist aus energieintensiven Rohstoffen bestehen – etwa aus Metallen. Diese sind oft besonders wertvoll, was nicht nur deren sorgfältige Erfassung notwendig macht, sondern darüber hinaus deren sachkundige Demontage und gegebenenfalls Trennung von anderen Komponenten und Materialien. Nur so lassen sich begehrte Rohstoffe wie Kupfer, Sande und Kiese, Aluminium und Stahl mit vertretbarem Aufwand zurückgewinnen.

Damit ist ein elementarer Punkt angesprochen: Demontierbarkeit und Trennbarkeit der jeweiligen Bauteile sind essentiell für die spätere Rohstoffrückgewinnung. Nur wenn diese gegeben sind, können Bauherren und Projektbeteiligte von einem sicheren Erhalt des Rohstoffwertes bei einem späteren Rückbau ausgehen.

Die praktische Projekterfahrung lehrt jedoch, dass dieses Ideal selten gegeben ist. Abhilfe schaffen können unter anderem die sich immer weiter verfeinernden Technologien zur Materialfraktionierung. Dazu zählen zum Beispiel spezielle Sortieranlagen für Baumischabfälle. Klar muss aber ebenfalls sein: Diese Prozesse benötigen wiederum selbst Ressourcen und Energie.

## 2. Grundzüge einer Circular Economy mit dem Cradle to Cradle (C2C)-Designprinzip

Unser etabliertes Wirtschaftsmodell operiert unter der Voraussetzung linearer Wachstumsprozesse. Diese sehen sich innerhalb des geschlossenen Erdsystems früher oder später mit Endlichkeitsphänomenen konfrontiert – gegenwärtig erleben wir die Folgen dieses Konflikts in Form multipler Krisen und Katastrophen wie der Klimakrise (Atmosphäre als *Mülldeponie* für CO<sub>2</sub>) oder dem globalen Artenschwund (unter anderem aufgrund des Verlustes natürlicher Lebensräume). Gegenstrategien wie beispielsweise die Steigerung von Effizienz haben bislang nicht den intendierten Erfolg – vielfach bewirken sie vor dem Hintergrund der Wachstums- und Expansionsprämisse sogar den gegenteiligen Effekt (Stichworte wären hier Rebound oder Backfire). Kurz gesagt: Eine absolute Entkopplung wirtschaftlicher Tätigkeit von einem zerstörerischen Zugriff auf die Ökosphäre ist bislang, zumindest im globalen Maßstab, ausgeblieben.

Hier setzen Modelle einer echten Kreislaufwirtschaft, einer Circular Economy, an. Am Beispiel des Cradle to Cradle-Designprinzips werden wir dies im Folgenden erläutern.

Heute setzen Unternehmen alles daran, ihren Umwelteinfluss (ökologischer Fußabdruck) möglichst effizient zu reduzieren. Sie streben eine *Null-Emission* oder *Frei-von*-Strategie an. Bei C2C geht es dagegen nicht darum, weniger schlecht zu sein, sondern sich positive Ziele zu setzen. Solch ein öko-effektives Geschäftsmodell hat qualitative Mehrwerte als Ziel.

Eine Circular Economy zielt auf eine naturverträgliche Gestaltung von Wirtschaftssystemen ab. Dabei strebt sie die Minimierung negativer Umweltauswirkungen durch qualitative Transformation sowie Schließung und Verlangsamung von Materialkreisläufen an. Circular-Economy-Ansätze können in den verschiedenen Stufen des Lebenszyklus eines Produktes greifen: Materialauswahl und Design sollten Langlebigkeit, Wiederaufbereitung und Möglichkeiten der Reparatur oder aber eine biologische Abbaubarkeit ermöglichen. Die Nutzungsphase sollte intensiviert und verlängert werden.

Am Ende ihrer Lebensdauer sollten Wertstoffe so weit wie möglich durch Sortieren und Demontage getrennt und stofflich für die erneute Nutzung aufbereitet werden. Das entstandene Framework, das sogenannte *Butterfly-Diagramm*, wird oft als ein zentrales Framework für die Circular Economy referenziert. Es beschreibt zwei komplementäre Kreisläufe, in denen Stoffe zirkulieren:

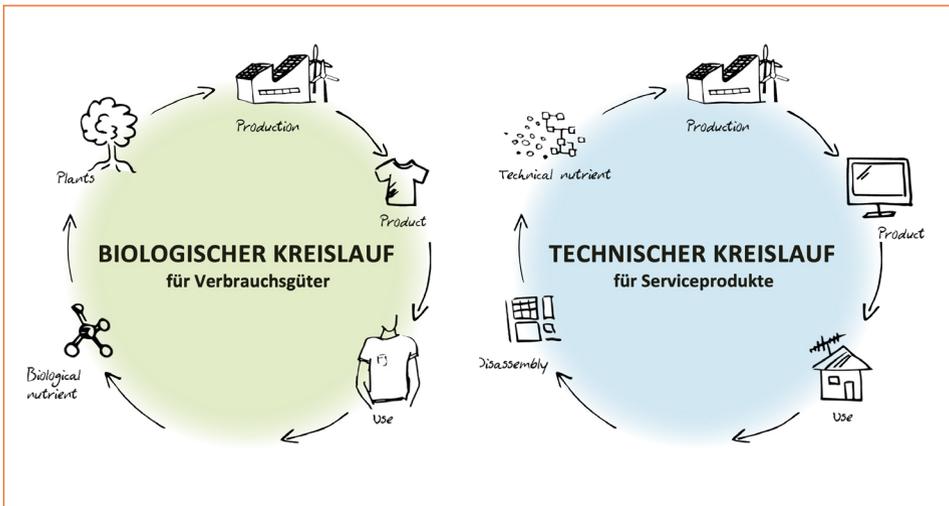


Bild 2: Biologischer und technischer Kreislauf

1. Im biologischen Kreislauf zirkulieren Verbrauchsgüter, wie zum Beispiel Naturfasern, Reinigungsmittel oder biologisch abbaubare Verpackungen, die nach ihrem Gebrauch sicher in diesen zurückgeführt werden können. Sie werden zu Kompost oder anderen Nährstoffen, aus denen neue Produkte entstehen. Der Abfall eines alten Produktes wird so zur *Nahrung* für ein neues Produkt.

2. Im technischen Kreislauf zirkulieren Gebrauchsgüter, wie beispielsweise Elektronikartikel oder Fußböden. Diese Produkte werden bereits im Design- und im Herstellungsprozess als Ressourcen für die nächste Nutzungsphase optimiert. Materialien können nach ihrer Nutzung in sortenreine Ausgangsstoffe zerlegt und einem technischen Kreislauf zugeführt werden. Dabei bleibt ihre stoffliche Güte erhalten, ein Downcycling mit Qualitätsverlust wird vermieden.

Dies ist auch der Kern des Cradle to Cradle-Designprinzips. Es wurde in den 1990er-Jahren von Prof. Dr. Michael Braungart (Gründer der EPEA GmbH) und William McDonough entwickelt. Übersetzt heißt es *Von der Wiege zur Wiege* und beschreibt die sichere und potenziell unendliche Zirkulation von Materialien und Nährstoffen in Kreisläufen. Alle Inhaltsstoffe sind chemisch unbedenklich und kreislauffähig. Müll im heutigen Sinne, wie er durch das bisherige *Take-Make-Waste*-Modell entsteht, gibt es nicht mehr, sondern nur noch nutzbare Nährstoffe.

### 3. Das Huthmacher-Haus in Berlin: Teilsanierung mit Materialbewusstsein

Am Berliner Hardenbergplatz befindet sich seit Ende der fünfziger Jahre ein unübersehbares Gebäude: das Huthmacher-Haus, erbaut 1957 nach Plänen der Architekten Paul Schwebes und Hans Schoszberger. Das Hochhaus ist mit seiner modernistischen Nachkriegsarchitektur ein markanter Hochpunkt der Berliner City West und Teil des Zentrums am Zoo. Seinen Namen hat das Haus vom ehemaligen, sehr beliebten Café und Tanzlokal Huthmacher, das sich lange Jahre im Erdgeschoss befand. Auf das Café folgte der erste McDonald's Westberlins. Das Gebäude wurde über die Jahrzehnte mehrfach umgebaut und zuletzt Mitte der achtziger Jahre saniert.

Die Bayerische Hausbau GmbH & Co. KG führt am Huthmacher-Haus eine Teilsanierung durch. In diesem Zug werden die Nachhaltigkeitspotenziale mit Blick auf Kreislaufwirtschaft und Urban Mining identifiziert. Projektpartner EPEA – Part of Drees & Sommer analysiert die bestehenden Bauteile und eingesetzten Baustoffe sowohl des Bestands wie auch der Teilsanierung und bildet die Daten in einem Gebäuderessourcenpass ab, wo sie gemäß ihrer Kreislauffähigkeit bewertet sind. Die gesammelten Daten werden dann in die Gebäudedatenbank Madaster Germany GmbH hochgeladen und können so allen relevanten Stakeholdern – auf unbestimmte Zeit – zur Verfügung gestellt werden. Auslesen lassen sich über die Datenbank eine Vielzahl von Informationen zum Gebäude, insbesondere zum Thema Urban Mining: etwa der finanzielle Wert der Materialien, deren Zirkularitätspotenzial oder der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck des Gebäudes.



Bild 3: Huthmacherhaus in Berlin

Das Huthmacher-Haus ist mit seinen 16 Stockwerken und einer Nutzfläche von etwa 15.800 m<sup>2</sup> stadtbildprägend. Im Frühjahr 2021 wurde dort mit Teilsanierungsmaßnahmen begonnen, die insbesondere eine Erneuerung des Brandschutzes, der technischen Gebäudeausrüstung (zum Beispiel Warmwasserleitungen) sowie der Gewerbeflächen umfassen. Der Bauherr hat es sich zum Ziel gesetzt, Projektentwicklungen noch ressourcenschonender im Sinne der Kreislaufwirtschaft zu gestalten. Zum Erreichen dieses Ziels, aber auch mit Blick auf steigende Rohstoff- und Entsorgungskosten, Lieferabhängigkeiten von Drittstaaten sowie eine zunehmende Rohstoffverknappung ist die Weiternutzung von derzeit im Bestand befindlichen Baustoffen – das Urban Mining – von entscheidender Bedeutung. Konkret sollen im Zuge der Teilsanierung des Huthmacher-Hauses die Potenziale von Urban Mining und Kreislaufwirtschaft identifiziert werden. Hierzu wird für das Gebäude ein Gebäuderessourcenpass erstellt und die Gebäudedaten werden digitalisiert.

Der Übergang zur Circular Economy, also zu einer systematischen und integralen Betrachtung des bestehenden *Rohstofflagers* im Gebäudebestand, ist unerlässlich, um nach Ende der Nutzung von Gebäuden möglichst viele Sekundärrohstoffe zu gewinnen, mithin Urban Mining zu betreiben. Diese Sekundärrohstoffe sollen in Zukunft Primärrohstoffe ersetzen und damit die negativen Auswirkungen des Rohstoffabbaus aus der Natur, die heute für den überwiegenden Teil des Wasserstress und des Biodiversitätsverlustes verantwortlich sind, vermeiden. Baumaterialien müssen zukünftig in hochwertigen Kreisläufen geführt und Gebäude zu Rohstoffdepots werden. Voraussetzung hierfür ist die Kenntnis über die vorhandenen Materialien im Gebäude, deren Qualität, Inhaltsstoffe und Einbausituation. Ein Circularity Passport® für Gebäude – also ein Gebäuderessourcenpass bzw. Materialausweis für Gebäude – gibt darüber Auskunft.

Dieser

- bildet das Materialinventar ab,
- bewertet gleichzeitig die Kreislauffähigkeit
- sowie den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck sowohl der Bauteile als auch des gesamten Gebäudes.

Um das Huthmacher-Haus zu einem zukünftigen Rohstoffdepot zu machen, werden sowohl die Urban-Mining-Potenziale des Bestands als auch die geplanten Modernisierungsmaßnahmen durch EPEA bewertet. Für das bestehende Tragwerk und die Fassade wurde eine Urban-Mining-Potenzialanalyse mit dem Fokus auf potenzieller Wiederverwendbarkeit (Demontierbarkeit/Trennbarkeit/Rezyklierbarkeit) von Bauteilen und Baustoffen durchgeführt.

Wichtige Informationen über den Bestand wurden im Rahmen einer Ortsbegehung gesammelt. Unterschiedliche Fensterkonstruktionen, Dämmstoffe aus den fünfziger Jahren und vor allem die materialsparenden Rippendecken konnten detailliert aufgenommen werden. Historische Detailzeichnungen lieferten wichtige Erkenntnisse über Bauteilschichten und Verbindungselemente. Die so im Building Circularity Passport erfassten Bauteile des Bestands werden ergänzt durch die Materialien der derzeitigen Teilsanierung, um das Huthmacher-Haus als Gesamtgebäude abzubilden.

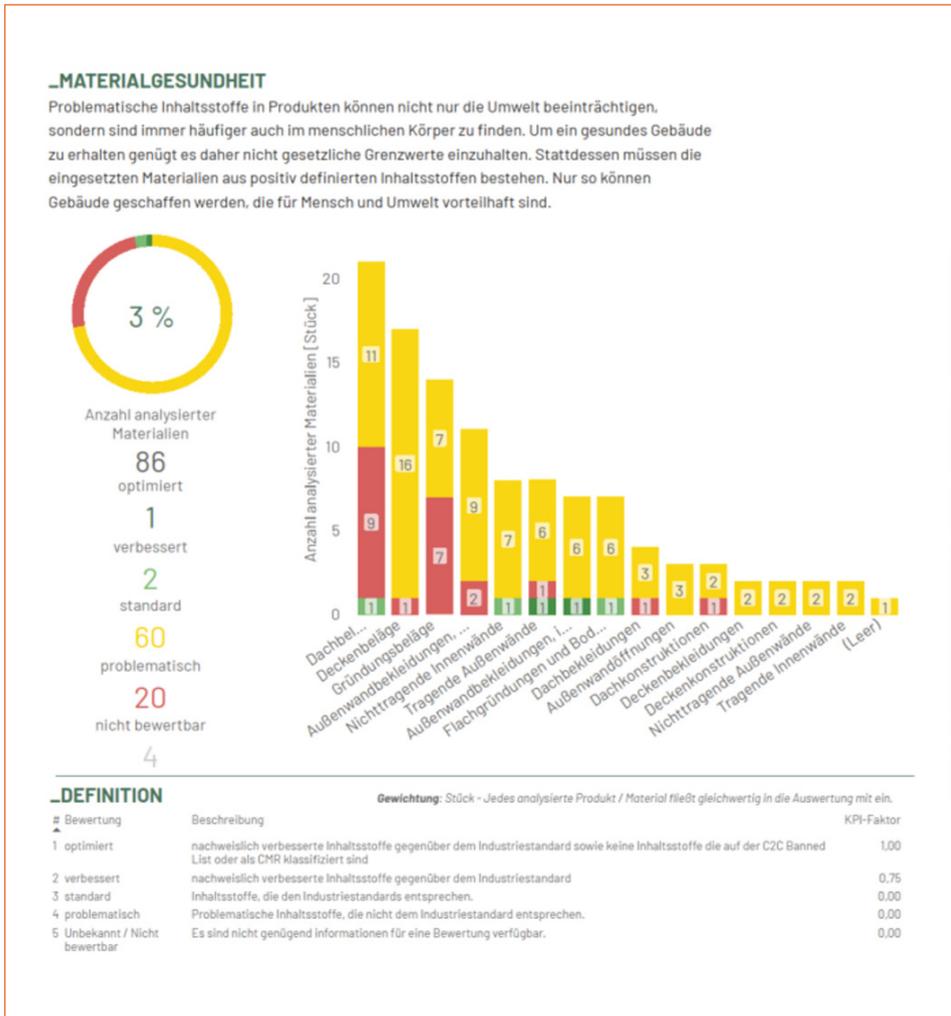


Bild 4: Circularity Passport – beispielhafter Auszug

Sind alle Materialien im Gebäuderessourcenpass abgebildet und gemäß ihrer potenziellen Kreislauffähigkeit bewertet, können die Daten in der Gebäudedatenbank für den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes erfasst werden. Madaster ist eine Online Plattform, die den zirkulären Einsatz von Produkten und Materialien in der Bauwirtschaft ermöglicht und Immobilieneigentümern und anderen Stakeholdern die Möglichkeit bietet, Daten ihrer Immobilien zu speichern, zu verwalten, anzureichern und auszutauschen. Die Daten aus dem Gebäuderessourcenpass werden über eine Schnittstelle auf die Plattform geladen. So können auf Knopfdruck und ohne aufwendige oder händische Arbeit die Informationen zu den Materialien und Bauteilen im Huthmacher-Haus direkt auf der Plattform gespeichert und ausgewertet sowie intelligent mit internen und externen Akteuren geteilt werden.

Vielerlei Daten zum Gebäude können so abgelesen werden, darunter im konkreten Fall:

**CO<sub>2</sub>-Fußabdruck und Zirkularität:** Die Datenbank erlaubt auf Basis der hochgeladenen Informationen die Berechnung gebäudespezifischer CO<sub>2</sub>-Emissionen, die sich aus der Herstellung, dem Transport und dem Einbau der Materialien ergeben. Zudem kann eine Aussage über die Zirkularität der Baustoffe gemacht werden: Welcher Gebäudeanteil besteht bereits aus Recyclingmaterial, wie viel Prozent des Gebäudes lassen sich später in den Kreislauf führen, wie hoch ist also das Rückbaupotenzial inklusive Demontierbarkeit?

**Finanzieller Wert der Materialien:** Hierfür ist die Gebäudedatenbank automatisch mit Rohstoffbörsen und weiteren Datenquellen verbunden, sodass der Verfügbare-Rohstoff-Restwert (Rohstoffwert abzüglich Rückbau, Transport- und Aufbereitungskosten) tagesaktuell ermittelt werden kann.

Während Wissen über die Materialien und Bauteile von Immobilien häufig während des Baus oder spätestens beim ersten Eigentümerwechsel verloren geht, erlaubt die zentrale und digitale Speicherung der Gebäudedaten auf der Plattform einen Überblick bis zum Ende des Immobilienlebenszyklus, sodass bei einem Rückbau exakte Aussagen über die frei werdenden Rohstoffe getroffen werden können. Zudem können die Informationen in der ESG-Berichterstattung genutzt werden. Bezogen auf die Kreislaufwirtschaft wird deutlich, welche Möglichkeiten sich dank der fortschreitenden Digitalisierung für die Bau- und Immobilienbranche bieten.

Für die Zukunft empfiehlt es sich daher, für alle Akteure der Bau- und Immobilienbranche die Digitalisierung der Bestandsdaten rund um Immobilien und die darin verbauten Materialien nicht auf die lange Bank zu schieben. Sowohl im Neubau als auch gerade im Bestand bietet dafür beispielsweise der Circularity Passport® für Gebäude eine effektive Methode, um alle relevanten Informationen von Anfang an optimal zu erfassen. So kann die Digitalisierung zur erfolgreichen Etablierung einer echten Kreislaufwirtschaft beitragen und zeitgleich eine nachhaltige Lösung für die Ressourcenknappheit sowie die immense Abfallproblematik aufzeigen.

## Ansprechpartner



### Sybille Mai

EPEA GmbH – Part of Drees & Sommer  
Leading Consultant  
Bundesallee 39 – 40a  
10717 Berlin, Deutschland  
+49 30 25439498406  
sybille.mai@epea.com

## Weitere beteiligte Institution

Bayerische Hausbau GmbH & Co. KG, München



Seit 50 Jahren begleiten wir die Kreislaufwirtschaftsbranche und bieten den verschiedenen Akteuren ein Forum des Wissens- und Erfahrungsaustauschs.

Wir bieten aktuell vier Konferenzen im Jahr an, die sich jeweils einem bestimmten Themenbereich der Abfallwirtschaft widmen – Recycling und Sekundärrohstoffe, Mineralische Nebenprodukte und Abfälle (einschl. Deponien), Klärschlamm und Thermische Verfahren. Darüber hinaus haben wir auch einen internationalen Kongress zum Thema Waste-to-Energy im Portfolio. Die Veranstaltungsreihen finden in einem einjährigen Rhythmus statt und stellen die aktuellen politischen, wirtschaftlichen, technischen und rechtlichen Entwicklungen vor.

Wir bieten eine Plattform, auf der sich die verschiedenen Akteure und Sektoren miteinander austauschen und vernetzen können. Unser persönliches Ziel ist, mit unseren Konferenzen zum Nachdenken anzuregen, Projekten Ansbuch zu geben und positive Entwicklungen in der Kreislaufwirtschaft voranzutreiben.

Das umfassende Wissen der Vortragenden wird in Fachbeiträgen ausführlich dokumentiert und im Anschluss an die Konferenzen in qualitativ anspruchsvollen Büchern und E-Books präsentiert.

Unsere aktuellen Konferenzen im Überblick:

- Berliner Konferenz Abfallwirtschaft und Energie**
- Berliner Konferenz - Metallrecycling und -kreisläufe**
- Berliner Konferenz Mineralische Nebenprodukte und Abfälle**
- Berliner Klärschlammkonferenz**
- IRRC – Waste-to-Energy**

Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Dorfstraße 51

16816 Nietwerder-Neuruppin

Tel. +49 3391-45 45-0

E-Mail: [registration@vivis.de](mailto:registration@vivis.de)



Wir widmen uns aktuellen verfahrens- und anlagentechnischen sowie politischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Themen, soweit sie die Abfall- und Kreislaufwirtschaft und die Energie- und Rohstoffwirtschaft betreffen. Unsere Aufgabe sehen wir in der Kommunikation zwischen Politik, Verwaltung, Wirtschaft, Technik und Wissenschaft.

## Wir geben seit fünfzig Jahren Fachbücher zu zahlreichen Themen des technischen Umweltschutzes heraus:

- Thermische Abfallbehandlung & energetische Verwertung
- Dokumentation von Abfallverbrennungsanlagen
- MBA & Ersatzbrennstoffe
- Recycling & Rohstoffe
- Mineralische Nebenprodukte & Abfälle
- Abwasser & Klärschlamm
- Strategie & Umweltrecht
- Immissionsschutz
- Biologische Abfallbehandlung...

Insgesamt sind bislang bei uns etwa zweitausend Fachbeiträge erschienen, die in ihrer Gesamtheit einen guten Überblick über technische, wirtschaftliche, rechtliche und politische Entwicklungen geben. In Kürze stellen wir unsere Wissensplattformen online für die Sie zeitlich befristete Zugriffslizenzen erwerben können.

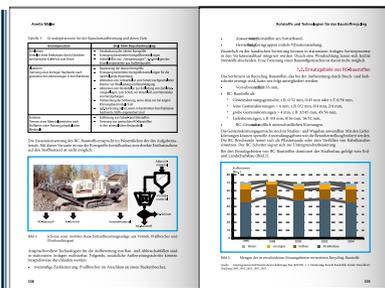


Bestellen Sie direkt beim TK Verlag oder unter [books.vivis.de](http://books.vivis.de)

Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Dorfstraße 51  
16816 Nietwerder-Neuruppin  
Tel. +49 3391-45 45-0  
E-Mail: [order@vivis.de](mailto:order@vivis.de)

**TK** Verlag



# **Abfallende und Recyclingbaustoffe**

## End of Waste for Recycling Materials as a Key Element in a European Circular Economy – a Cross-border Comparison

Thomas Kasper and Dirk Buchsteiner

The EU Green Deal is based on two pillars: The first pillar covers industrial transformation. Achieving the central climate protection goal of *net-zero emissions* requires the most ambitious economic modernisation process since the industrial revolution. The transition to a climate-compatible, forwardlooking lowemission economy can only succeed through significant investments, fundamental innovations, and entrepreneurial-strategic foresight. A critical component of this industrial transformation is the realization of a circular economy – as the second pillar of the Green Deal. As part of the strategy to achieve these goals, the Commission launched the Circular Economy Action Plan in March 2020. The conversion of our economy and our actions as a whole to a circular economy is seen as an essential and central component for the successful achievement of ambitious climate protection goals.

With regard to resource conservation, as well as nature and climate protection, a functioning and manageable system is needed so that mineral waste can be turned into substitute building materials. To close material cycles and allow raw materials to be fed back into the economy as secondary raw materials for another life cycle, it is necessary to abandon the concept of waste and enable free trade. This requires closer examination of the concepts of waste generation, by-product status, and waste end, and the definition of technical and legal frameworks to establish the foundations for transitioning to a sustainable economic system in the form of a circular economy.

## Abfallende für Recyclingbaustoffe als wesentliches Element in einer europäischen Kreislaufwirtschaft – ein grenzüberschreitender Vergleich

Thomas Kasper und Dirk Buchsteiner

1.	Abfallentstehung .....	16
2.	Abfallende auf EU-Ebene .....	18
2.1.	Unionsrechtlicher Hintergrund.....	18
2.2.	Abfallende in der AbfRRL .....	18
2.3.	Der stoffliche Ansatz .....	19
3.	Abfallende von Recyclingbaustoffen in Deutschland .....	20
3.1.	Rechtsrahmen für mineralische Ersatzbaustoffe .....	20
3.2.	Voraussetzungen nach § 5 Abs. 1 KrWG für das Abfallende bei mineralischen Ersatzbaustoffen .....	21
3.2.1.	Durchlaufen eines Verwertungsverfahrens .....	21
3.2.2.	Weitere Voraussetzungen des § 5 Abs. 1 KrWG .....	22
3.3.	Ergebnis .....	23
4.	Quellen.....	23

Seit Dezember 2019 werden in Europa in Anlehnung an den von Franklin D. Roosevelts zur Zeit der Weltwirtschaftskrise geprägten Begriff New Deal nun auch mit dem Green Deal die Karten neu gemischt und verteilt. Der Green Deal fußt dabei auf zwei Säulen: Die eine Säule umfasst die industrielle Transformation. Die Erreichung des zentralen Klimaschutzziels – der *Netto-Null-Emission* – erfordert den wohl ambitioniertesten wirtschaftlichen Modernisierungsprozess seit der industriellen Revolution. Ein wichtiger Baustein dieses industriellen Wandels ist die Verwirklichung eines primär kreislauforientierten Wirtschaftssystems – die Circular Economy als zweite Säule des Green Deal. Als Teil der Strategie zur Erreichung dieser Ziele hat die Kommission im März 2020 im Rahmen der EU-Industriestrategie den neuen Aktionsplan der Kreislaufwirtschaft auf den Weg gebracht. Die Umstellung unserer Wirtschaft und unseres Handelns insgesamt auf ein kreislaufwirtschaftliches System wird als ganz essenzieller und zentraler Baustein für das erfolgreiche Erreichen der ambitionierten Klimaschutzziele gesehen. Zu den im Rahmen des Kreislaufwirtschaftsaktionsplan der EU identifizieren Produktionswertschöpfungsketten mit besonderer Bedeutung für die Kreislaufwirtschaft gehört auch die Bauwirtschaft.

In Österreich und Deutschland umfasst der Bedarf an Baustoffen zusammen etwa 700 Mio. t im Jahr. Zum Vergleich: Der Massestrom der mineralischen Abfälle umfasst in Deutschland mit etwa 240 Mio. t mehr als die Hälfte des gesamten Abfallaufkommens pro Jahr. Den größten Teil dieses Abfallstroms bilden dabei mineralische Bau- und Abbruchabfälle mit 198 Mio. t und darunter wiederum Boden und Steine mit 118 Mio. t. Auch in Österreich umfasst dieser Massestrom mehr als die Hälfte des gesamten Abfallaufkommens. Das Aufkommen der Bau- und Abbruchabfälle betrug 2020 rund 11,43 Mio. t, bei Aushubmaterialien waren es 2020 rund 41 Mio. t. Das österreichweite Aufkommen der Aushubmaterialien hängt besonders von großen Bauvorhaben, wie dem Bau des Semmering- und Brenner-Basistunnels oder der Errichtung der Koralmbahn, ab. Der Massestrom mineralischer Abfälle ist damit insgesamt sehr groß und damit auch das Potential für mineralische Ersatzbaustoffe. Mit Blick auf die Ressourcenschonung, den Natur- aber auch den Klimaschutz bedarf es eines funktionierenden und handhabbaren Systems, damit aus mineralischen Abfällen Ersatzbaustoffe werden können. Um Stoffkreisläufe zu schließen und Rohstoffe als Sekundärrohstoffe einem weiteren Lebenszyklus zuführen zu können, gilt es den Abfallbegriff ablegen zu können, um wieder frei gehandelt werden zu können. Dazu gilt es die Begriffe der Abfallentstehung und des Abfallendes näher zu betrachten.

## 1. Abfallentstehung

Die wichtigste gesetzliche Grundlage für die Abfallwirtschaft in Österreich bildet das Abfallwirtschaftsgesetz (AWG 2002). Der *Abfallbegriff* ist in § 2 Abs. 1 AWG 2002 legal definiert und lautet:

Abfälle im Sinne dieses Bundesgesetzes sind bewegliche Sachen,

- deren sich der Besitzer entledigen will oder entledigt hat oder
- deren Sammlung, Lagerung, Beförderung und Behandlung als Abfall erforderlich ist, um die öffentlichen Interessen (§ 1 Abs. 3) nicht zu beeinträchtigen.

Der Abfallbegriff des AWG 2002 knüpft an zwei Kriterien an. Die Sache muss einerseits eine *bewegliche Sache* sein, andererseits muss alternativ eine der beiden Kriterien der *Entledigungsabsicht* (subjektiver Abfallbegriff) *oder* der *Entledigungspflicht* (objektiver Abfallbegriff) zum Schutze öffentlicher Interessen erfüllt sein.

Eine nicht bewegliche Sache z.B. ein zum Abbruch vorgesehenes Haus oder Boden vor dem Aushub, kann somit, mangels Beweglichkeit, kein Abfall sein, selbst wenn die Entledigungsabsicht des Gebäudebesitzers, der den Abbruch beauftragt oder des Bauherrn, der einen Aushub durchführen lässt, gegeben ist. Hat ein Boden bzw. ein Abfall, der mit dem Boden eine untrennbare Verbindung eingegangen ist, jedoch die Eignung die öffentlichen Interessen zu beeinträchtigen, also erfüllt er das objektive Abfallkriterium, dann gilt der Boden bereits vor Aushub, obwohl er (noch) nicht beweglich ist, als Abfall<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Vgl RV 1005 dB XXIV. GP zu Abfall S. 11.

Hat sich der Abfallbesitzer einer beweglichen Sache entledigt oder will er sich dieser entledigen, ist der Tatbestand der *Entledigungsabsicht* gem. §2 Abs 1 AWG 2002 gegeben, der *subjektive Abfallbegriff* ist erfüllt. Keine Entledigungsabsicht besteht allerdings dann, wenn anfallende Materialien, die Produktqualität aufweisen und für die ein Markt existiert, in einem geschlossenen Prozess am Standort des Abfalls zur Herstellung eines Produktes eingesetzt werden. Werden in Anlagen Materialien, die im obigen Sinne keine Abfälle darstellen, eingesetzt, so liegt keine Behandlungsanlage i.S.d § 2 Abs 7 Z 1<sup>2</sup> vor. Nach ständiger hg Rechtsprechung in Österreich kommt es bei der Beurteilung der subjektiven Abfalleigenschaft i.S.d. § 2 Abs 1 Z 1 leg cit weder auf die eigene Entledigungsabsicht noch auf die Absicht in Bezug auf eine in Aussicht genommene Verwendung der Materialien an. *Eine Sache ist nämlich schon dann als Abfall zu qualifizieren, wenn bei irgendeinem Vorbesitzer die Entledigungsabsicht bestanden hat*<sup>3</sup>. In diesem Erkenntnis stellt der VwGH fest, dass im Regelfall bei Bodenaushubmaterialien und Abbruchmaterialien qua Entledigungsabsicht des Bauherrn Abfalleigenschaft vorliegt.

Der objektive Abfallbegriff besagt, dass ein Stoff, dann als Abfall zu betrachten ist, wenn aufgrund seiner stofflichen Zusammensetzung Gefahr für eines der Schutzgüter des AWG ausgehen kann (arg. ... erforderlich ist, um die öffentlichen Interessen (§ 1 Abs. 3) nicht zu beeinträchtigen). Diese sind z.B die Gesundheit der Menschen, Wasser, Luft, Boden, Tiere oder Pflanzen, nachhaltige Nutzung von Wasser oder Boden, das örtliche Landschaftsbild. Die hg Judikatur hat wiederholt Baurestmassendeponiequalität als Grenze für den objektiven Abfallbegriff erkannt.

Die wichtigste gesetzliche Grundlage für die Abfallwirtschaft in Deutschland bildet das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG). Der Abfallbegriff und somit die Abfallentstehung ist in § 3 Abs. 1 KrWG legal definiert und lautet:

*Abfälle im Sinne dieses Gesetzes sind alle Stoffe oder Gegenstände, derer sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss. Abfälle zur Verwertung sind Abfälle, die verwertet werden; Abfälle, die nicht verwertet werden, sind Abfälle zur Beseitigung.*

Der frühere Abfallbegriff des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes (KrW-/AbfG) enthielt – wie auch die österreichische Begriffsdefinition – die Eingrenzung auf bewegliche Sachen. Durch die Bereichsausnahme gem. § 2 Abs. 2 Nr. 10 KrWG für Böden einschließlich nicht ausgehobener kontaminierter Böden sowie Bauwerke, die dauerhaft mit Grund und Boden verbunden sind, lässt sich die Beweglichkeit als Voraussetzung jedoch in den Abfallbegriff hineinlesen, sodass im Ergebnis wie bisher nur bewegliche Stoffe und Gegenstände erfasst werden. Vergleichbar ist auch die Ausgestaltung des subjektiven Abfallbegriffs und des objektiven Abfallbegriffs (Zwangsabfall). Letzterer ist in § 3 Abs. 1 S. 1 Alt. 3 in Verbindung mit der konkretisierenden Regelung in Abs. 4 bestimmt. Entscheidend für den Zwangsabfallbegriff ist zunächst der Wegfall des ursprünglichen Verwendungszwecks. Zudem bedarf es eines spezifischen Gefahrenpotential, dass allein mit den Mitteln des Abfallrechts ausgeschlossen werden.

<sup>2</sup> Vgl AB 1005 dB XXI. GP

<sup>3</sup> VwGH (A), Beschluss vom 24.4.2018, Ra 2018/05/0034.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass nach dem Willen der Gesetzgeber der Abfallbegriff leicht erfüllt ist, sich der Weg aus dem Abfallrecht heraus jedoch schwieriger gestaltet.

## 2. Abfallende auf EU-Ebene

### 2.1. Unionsrechtlicher Hintergrund

Die Abfallrahmenrichtlinie (AbfRRL)<sup>4</sup> wurde mit der Richtlinie (EU) 2018/851<sup>5</sup> angepasst. Die AbfRRL wurde an die Grundsätze der Kreislaufwirtschaft angepasst, um die Europäische Union zu einer nachhaltigen Materialwirtschaft umzugestalten. Dadurch soll die Abhängigkeit der Union von Ressourceneinfuhren und somit die wirtschaftliche Abhängigkeit von Drittstaaten verringert werden. Um eine kreislauforientierte Wirtschaft entstehen zu lassen, muss der gesamte Lebenszyklus von Produkten betrachtet werden, um die Ressourcen durch Schließung des Kreislaufes zu erhalten<sup>7</sup>. Abfälle sollen als Ressourcen geschätzt werden, um einen Übergang zu einer nachhaltigeren Materialwirtschaft und zum Modell einer Kreislaufwirtschaft zu ermöglichen. Hohe Hürden beim Ende der Abfalleigenschaft erschweren die Rückführbarkeit von Materialströmen in die Nutzung. Um mehr Rechtssicherheit im Umgang mit Sekundärrohstoffen in Bezug auf den Abfall-Status von Materialien zu bieten, sollen Stoffe, die ein Verwertungs- bzw. Recyclingverfahren durchlaufen haben, nicht länger als Abfall angesehen werden<sup>8</sup>.

### 2.2. Abfallende in der AbfRRL

Mit der Anpassung der Abfallrahmenrichtlinie mit 30. Mai 2018 lautet Artikel 6 Absatz 1 AbfRRL wie folgt:

- 1) Die *Mitgliedstaaten treffen geeignete Maßnahmen*, um sicherzustellen, dass Abfälle, die ein Recyclingverfahren oder ein anderes Verwertungsverfahren durchlaufen haben, *nicht mehr als Abfälle betrachtet werden*, wenn die folgenden Bedingungen erfüllt sind:
  - a) Der Stoff oder der Gegenstand soll für bestimmte Zwecke verwendet werden;
  - b) es besteht ein Markt für diesen Stoff oder Gegenstand oder eine Nachfrage danach;

<sup>4</sup> Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19.11.2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien, ABl vom 22.11.2008, L 312/3.

<sup>5</sup> Richtlinie (EU) 2018/851 des europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle.

<sup>6</sup> So Erwägungsgrund (1) der Richtlinie (EU) 2018/851.

<sup>7</sup> Vgl Erwägungsgrund (2) der Richtlinie (EU) 2018/851.

<sup>8</sup> Vgl Erwägungsgrund (17) der Richtlinie (EU) 2018/851

- c) der Stoff oder Gegenstand erfüllt die technischen Anforderungen für die bestimmten Zwecke und genügt den bestehenden Rechtsvorschriften und Normen für Erzeugnisse und
- d) die Verwendung des Stoffs oder Gegenstands führt insgesamt nicht zu schädlichen Umwelt- oder Gesundheitsfolgen.

Die Mitgliedstaaten sind aufgefordert, Maßnahmen zu treffen, um Abfallendebestimmungen zu erstellen bzw. das Abfallende zu ermöglichen, nun aber ohne die Einschränkung auf *bestimmte Abfälle*, sondern für Abfälle, die ein Recyclingverfahren oder ein anderes Verwertungsverfahren durchlaufen haben. Dies deshalb, weil den Anwendern dieser Materialien mehr Sicherheit in Bezug auf den Abfall- oder Nichtabfall-Status eingeräumt werden soll, um ihnen gleiche Wettbewerbsbedingungen zu verschaffen und letztlich die Anwendung bzw. Wiederverwendung von Abfällen als Rohstoff im Sinne einer Kreislaufwirtschaft zu fördern<sup>9</sup>.

### 2.3. Der stoffliche Ansatz

Den Kriterien für ein Abfallende liegt ein stofflicher Ansatz zugrunde. Zentral ist die Verwendung des Stoffes für einen bestimmten Zweck. Es sind also die Eigenschaften des Stoffes oder des Gegenstandes den (technischen) Anforderungen des Zwecks, der Verwendung bzw. der Anwendung gegenüberzustellen. Es geht sohin um eine Kombination von stofflicher Zusammensetzung des Stoffes einerseits und stofflicher Anforderung der Verwendung bzw. der Nutzung andererseits. Erfüllt der Gegenstand die stofflichen Eigenschaften für die Nutzung kann im Sinne des Abfallendes von der Behandlung des Stoffes als Abfall abgesehen werden. Dieser Ansatz stellt europarechtlich den zentralen Zugang zu Beurteilung der Abfalleigenschaft dar und ist Schlüssel für eine nationale Umsetzung im Abfallrecht der Mitgliedstaaten, um der Umstellung unseres Wirtschaftssystem in eine zirkuläre Wirtschaft den Weg zu ebnen.

Eindrücklich wird dies in der Entscheidung des EuGH vom 17.11.2022 – C-238/21 – (*Porr*) deutlich: Es geht in dieser Causa um die Beurteilung von qualitätsgesicherten Bodenaushub (der höchsten Qualitätsklasse) für eine landwirtschaftliche Verwertung gemäß österreichischem Bundesabfallwirtschaftsplan. Der EuGH zeigte hierbei auf, dass nicht kontaminiertes Bodenaushubmaterial aus Bauvorhaben, wenn nach entsprechender Qualitätsprüfung feststeht, dass es sich um ökologisch unbedenkliches Aushubmaterial handelt, nicht als Abfall sondern durchaus als Nebenprodukt anzusehen ist. Dies deshalb, weil die Nebenprodukteigenschaft weit zu verstehen ist, wobei das erforderliche Herstellungsverfahren kein industrielles Verfahren darstellen muss, sondern jeder Vorgang, bei dem mittels Input ein Output entsteht.

Selbst wenn Bodenaushub – aufgrund eines Entledigungswillens – als Abfall anzusehen wäre, würde bereits vor Verwendung dieses Stoffes für einen geeigneten Zweck, das Abfallende eintreten können.

<sup>9</sup> Vgl. Erwägungsgrund (17) der Richtlinie (EU) 2018/851

Wenn die Wiederverwendung von Bodenaushub keine Vorbehandlung erfordert, kann seine Abfalleigenschaft auch schon durch eine bloße Qualitätsprüfung enden – nicht erst durch die tatsächliche Verwendung. Auch mit Blick auf diesen begrenzten – zunächst rein das österreichische Recht und die dortige Umsetzung der AbfRRL betreffenden – Sachverhalt, lässt sich jedoch auch mit Blick auf Recyclingbaustoffe festhalten: Der EuGH betont ausdrücklich, dass das nationale Recht nicht durch eigene Sonderwege den Zielen der AbfRRL zuwiderlaufen darf. Nationale Rechtsvorschriften dürfen die Verwirklichung der Ziele der Richtlinie nicht behindern, um natürliche Rohstoffquellen zu erhalten und eine Recycling-Wirtschaft zu schaffen. Wesentlicher Aspekt der AbfRRL ist schließlich die Kreislaufwirtschaft.

Im Hinblick auf die geplanten Abfallendebestimmungen für Bodenaushubmaterialien im österreichischen Abfallrecht sollten die Prinzipien des stofflichen Ansatzes vertieft werden und bei nachgewiesener ökologischer Unbedenklichkeit und stofflicher (z.B. bautechnischer) Eignung für die in Aussicht stehenden Sekundärverwendung von der Einstufung als Abfall Abstand genommen werden oder ein frühzeitiges Abfallende ab Nachweis definiert werden.

### 3. Abfallende von Recyclingbaustoffen in Deutschland

Die Vorgaben von Art. 6 der AbfRRL wurden in Deutschland durch § 5 Abs. 1 KrWG umgesetzt. Hierin heißt es:

*Die Abfalleigenschaft eines Stoffes oder Gegenstandes endet, wenn dieser ein Recycling oder ein anderes Verwertungsverfahren durchlaufen hat und so beschaffen ist, dass*

- *er üblicherweise für bestimmte Zwecke verwendet wird,*
- *ein Markt für ihn oder eine Nachfrage nach ihm besteht,*
- *er alle für seine jeweilige Zweckbestimmung geltenden technischen Anforderungen sowie alle Rechtsvorschriften und anwendbaren Normen für Erzeugnisse erfüllt sowie*
- *seine Verwendung insgesamt nicht zu schädlichen Auswirkungen auf Mensch oder Umwelt führt.*

In § 5 Abs. 2 KrWG wird Bundesregierung ermächtigt, durch Rechtsverordnung nach Maßgabe der in Absatz 1 genannten Anforderungen die Bedingungen näher zu bestimmen, unter denen für bestimmte Stoffe und Gegenstände die Abfalleigenschaft endet.

#### 3.1. Rechtsrahmen für mineralische Ersatzbaustoffe

Mit der Mantelverordnung – und der darin enthaltenen Ersatzbaustoffverordnung –, die am 01.08.2023 in Kraft treten, soll in Deutschland ein bundeseinheitliches Rechtsregime für Aufbereitung und Einbau mineralischer Ersatzbaustoffe geschaffen werden. Es bleibt abzuwarten, ob die mit der Mantelverordnung angestrebte Akzeptanzsteigerung für mineralische Ersatzbaustoffe Früchte trägt. Kritische Stimmen sehen im Verhältnis zum

Boden- und Grundwasserschutz einen Kompromiss zu Lasten der Kreislaufwirtschaft und befürchten eine Stoffstromverschiebung von der Verwertung bei Baumaßnahmen hin zu Deponien.

Das System der Regelungen in der EBV umfasst rechtsverbindliche Anforderungen für die Herstellung und den Einbau mineralischer Ersatzbaustoffe. Der Ordnungsgeber hat hierfür umfangreich Grenzwerte für bestimmte Schadstoffe und für die jeweiligen Einbau von Ersatzbaustoffen bzw. deren Materialklassen vorgegeben, deren Einhaltung durch den Hersteller im Rahmen einer Güteüberwachung zu gewährleisten ist. Darüber hinaus sind an die Materialklassen angepasste Einbauweisen vorgegeben, die vom Verwender bei dem Einbringen der Ersatzbaustoffe in das technische Bauwerk zu beachten sind. Die EBV enthält jedoch weder mit Blick auf die Herstellung von Ersatzbaustoffen noch für den Einbau von Ersatzbaustoffen Vorschriften, welche die Anforderungen für das Abfallende konkretisieren. Für die Frage, ob ein mineralischer Ersatzbaustoff das Ende der Abfalleigenschaft erreicht, kommt es allein auf die Regelung des § 5 Abs. 1 KrWG an. Die EBV stellt somit auch keine Rechtsverordnung nach § 5 Abs. 2 KrWG dar. Die Bezugnahme auf das Ende der Abfalleigenschaft im Anwendungsbereich der EBV nach § 1 soll daher auch zur Klarstellung noch vor Inkrafttreten der Verordnung gestrichen werden.

### 3.2. Voraussetzungen nach § 5 Abs. 1 KrWG für das Abfallende bei mineralischen Ersatzbaustoffen

Der Bundesgesetzgeber hat sich in der Umsetzung von Art. 6 Abfallrahmenrichtlinie für ein Umsetzungsmodell entschieden, bei dem die Regelungswirkung *selbstexekutiv* eintritt. Dies bedeutet, dass in jedem Einzelfall, in dem die Voraussetzungen von § 5 Abs. 1 KrWG vorliegen, das Ende der Abfalleigenschaft von Gesetzes wegen eintritt. Einer behördlichen Feststellung oder des Durchlaufens eines bestimmten Verfahrens bedarf es hierzu nicht<sup>10</sup>.

#### 3.2.1. Durchlaufen eines Verwertungsverfahrens

Die Praxis zeigt, dass es regelmäßig zu der Schwierigkeit kommt, wo und zu welchem Zeitpunkt vom Eintritt des Endes der Abfalleigenschaft auszugehen ist, ob also auch das Ende der Abfalleigenschaft damit auf dem Hof des Behandlers eintritt, oder erst mit der konkreten Verwendung. Entscheidend für eine Verwertung ist die Substitutionswirkung. Das Durchlaufen eines Verwertungsverfahrens kann jedoch auch durch vorbereitende, also der eigentlichen Verwendung vorgelagerte Verfahren erfüllt sein, sobald die Abfälle eine Substitutionswirkung erfüllen können. Ist das der Fall, dann ist das fragliche Verwertungsverfahren durchlaufen, auch wenn später noch weitere Schritte der Aufbereitung erfolgen bzw. notwendig sind.

<sup>10</sup> Bayerischer Verwaltungsgerichtshof, Beschluss vom 17. Februar 2020 – 12 CS 19.2505 –, Leitsatz 4 und Rn. 42, zitiert nach juris. Ls. 4 der Entscheidung lautet: *Die Abfalleigenschaft eines Stoffes oder Gegenstandes endet bei Vorliegen der in § 5 Abs. 1 KrWG normierten Bedingungen unmittelbar qua Gesetz ohne konstitutive Feststellung durch Verwaltungsakt. Das Vorliegen dieser Voraussetzungen unterliegt uneingeschränkter verwaltungsgerichtlicher Kontrolle. Ein Prognose- oder Beurteilungsspielraum der Behörden existiert nicht.* Siehe auch VG Potsdam, Beschluss v, 23.6.2022, – 14 L 306/21 –

Daher kann die Herstellung eines Vor- oder Zwischenprodukts genügen<sup>11</sup>. Wann das Ende der Abfalleigenschaft eintritt, ist demnach eine Frage des Einzelfalls und tritt bei verschiedenen Abfällen zu unterschiedlichen Zeitpunkten ein. Entscheidend ist immer der Zeitpunkt, zu dem die beschaffenheitsbezogenen Anforderungen des § 5 Abs. 1 KrWG, erstmalig erfüllt sind<sup>12</sup>. Für mineralische Ersatzbaustoffe nach § 2 Nr. 1 lit. a), aa) EBV oder der RC-Baustoffe nach § 2 Nr. 29 EBV folgt aus der Begriffsbestimmung als mineralische Baustoffe, dass diese durch die Aufbereitung von mineralischen Abfällen hergestellt werden.

Die Aufbereitung der mineralischen Abfälle stellt insoweit ein Verwertungsverfahren im Sinne von § 3 Abs. 23 KrWG dar. Dazu werden die Abfälle innerhalb der Aufbereitungsanlage oder in der weiteren Wirtschaft einem sinnvollen Zweck zugeführt, indem sie entweder andere Materialien ersetzen, die sonst zur Erfüllung einer bestimmten Funktion verwendet worden wären, oder indem die Abfälle so vorbereitet werden, dass sie diese Funktion erfüllen. Entsprechendes gilt für Verwertungsverfahren im Sinne des Recyclings (§ 3 Abs. 25 KrWG). In der Aufbereitungsanlage werden die mineralischen Stoffe behandelt, insbesondere sortiert, getrennt, zerkleinert, gesiebt, gereinigt oder abgekühlt (§ 3 Nr. 5 EBV).

Für das *Durchlaufen* eines solchen Verwertungsverfahrens kommt es also danach darauf an, dass die mineralischen Abfälle durch Aufbereitung einen Zustand erreicht haben, der gestattet, dass sie einen sinnvollen Zweck erfüllen oder für eine bestimmte Funktion verwendet werden können. Mit Erreichen dieser Substitutionsfunktion ist der Herstellungsprozess in der Aufbereitungsanlage beendet. Dieses Ziel ist erreicht, wenn aus den mineralischen Abfällen Ersatzbaustoffe oder RC-Baustoffe hergestellt sind. Damit ist die erste Voraussetzung für das Erreichen des Abfallendes erfüllt. Im Ergebnis kommt es darauf an, dass die in der Aufbereitungsanlage hergestellten mineralischen Ersatzbaustoffe bzw. RC-Baustoffe tatsächlich verwendet werden. Diese Voraussetzung erfüllen die mineralischen Ersatzbaustoffe, indem sie in technischen Bauwerken eingesetzt werden. Dazu sind die mineralischen bereits definitionsgemäß geeignet (§ 2 Nr. 1 lit. b EBV).

### 3.2.2. Weitere Voraussetzungen des § 5 Abs. 1 KrWG

Ein Markt oder eine Nachfrage im Sinne des § 5 Abs. 1 Nr. 2 KrWG setzt voraus, dass der Stoff bzw. Gegenstand einen positiven Marktwert hat. Es kommt zudem darauf an, dass der Markt bereits besteht und nicht erst noch geschaffen werden kann<sup>13</sup>.

<sup>11</sup> Siehe: Jarass, Abfallverwertung und das Ende der Abfalleigenschaft – Insbesondere bei Ersatzbaustoffen, NVwZ 2019, 1545, (beck-online) m.w.N.

<sup>12</sup> So auch: Jarass, Abfallverwertung und das Ende der Abfalleigenschaft – Insbesondere bei Ersatzbaustoffen, NVwZ 2019, 1545.

<sup>13</sup> Diese Voraussetzung erschwert es in der Praxis für neue Produkte bzw. Produktgruppen, die durch neuartige Verwertungsverfahren aus Abfällen gewonnen werden. Aufgrund deren Neuartigkeit muss sich folglich erst ein Markt etablieren, bevor diese das Ende der Abfalleigenschaft erreichen können. Mitunter überspitzen jedoch Behörden diese Anforderung dahingehend, dass selbst nachgewiesene Abnehmer, die einen Preis bezahlen, nicht als Nachfrager angesehen werden, wobei nach dem Wortlaut ein einzelner Nachfrager genügt.

Die Prüfung der Voraussetzungen für das Abfallende umfasst darüber hinaus, dass die mineralischen Ersatzbaustoffe bzw. RC-Baustoffe alle für ihre jeweilige Zweckbestimmung geltenden technischen Anforderungen, Rechtsvorschriften und anwendbaren Normen für Erzeugnisse erfüllen müssen. Für gemäß Ersatzbaustoffverordnung hergestellte mineralische Ersatzbaustoffe, ist davon auszugehen, dass auch diese Voraussetzung für das Abfallende mineralischer Ersatzbaustoffe erfüllt ist.

Bezogen auf die Verwendung mineralischer Ersatzbaustoffe (§ 2 Nr. 1 EBV) bzw. RC-Baustoffe (§ 2 Nr. 29 EBV) in technischen Bauwerken richten sich die Anforderungen dafür nach § 19 Abs. 2 Nr. 1 EBV. Insoweit sind nachteilige Veränderungen der Grundwasserbeschaffenheit und schädliche Bodenveränderungen nicht zu besorgen, wenn die mineralischen Ersatzbaustoffe die Anforderungen nach Abschnitt 3 Unterabschnitt 1 EBV einhalten und der Einbau der mineralischen Ersatzbaustoffe nur in den für sie jeweils zulässigen Einbauweisen nach Anlage 2 zur EBV erfolgt.

Diese Voraussetzungen umfassen im Rahmen der Güteüberwachung nach §§ 4ff. EBV den Eignungsnachweis, die werkseigene Produktionskontrolle und die Fremdüberwachung von einer Überwachungsstelle. Durch diese Maßnahmen der Güteüberwachung wird sichergestellt, dass die mineralischen Ersatzbaustoffe bzw. RC-Baustoffe bestimmter Materialklassen den dazugehörigen Materialwerten entsprechen. Bei Beachtung dieser Voraussetzungen insgesamt ist nach dem Willen des Ordnungsgebers zugleich gewährleistet, dass schädliche Auswirkungen auf Mensch und Umwelt nicht zu besorgen sind.

### 3.3. Ergebnis

Für Deutschland lässt sich somit unter Berücksichtigung von § 5 Abs. 1 KrWG aufzeigen, dass mineralische Ersatzbaustoffe durchaus entsprechend dem Willen des Ordnungsgebers auf dem Hof des Behandlers das Abfallende erreichen können. Dies wird zu berücksichtigen bleiben, wenn man sich vor Augen führt, wie schwer sich auch hierzulande die Behörden tun, um Stoffe und Gegenstände aus dem starken Griff des Abfallrechts – bzw. der behördlichen Kontrolle – zu entlassen. Im Lichte auch der Rechtsprechung des EuGH in der Rechtssache *Porr* ist jedoch auch für das nationale Recht festzuhalten, dass es Zweck der Abfallrahmenrichtlinie ist, dass Abfälle das Ende der Abfalleigenschaft erreichen sollen. Es bleibt abzuwarten, ob dies dann auch gilt, wenn ab dem 01.08.2023 die EBV in Kraft tritt.

## 4. Quellen

- [1] Abfallwirtschaftsgesetz (AWG, 2002) – Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft, StF: BGBl. I Nr. 102/2002; idgF. Sowie RV 1005 dB XXIV. GP zum Abfallwirtschaftsgesetz
- [2] Bayerischer Verwaltungsgerichtshof, Beschluss vom 17. Februar 2020 – 12 CS 19.2505 – (juris)
- [3] Europäischer Gerichtshof, Urteil vom 18.04.2002, C-9/00, (Palin Granit Oy); Urteil vom 11.09.2003, C-114/01, (Avesta Polarit Chrome), Urteil vom 17.11.2022 – C-238/21 – (Porr)
- [4] Jarass, Abfallverwertung und das Ende der Abfalleigenschaft – Insbesondere bei Ersatzbaustoffen, NVwZ 2019, 1545

- [5] Krasznai, Vom Abfall zur Ressource: Rechtspolitische Überlegungen und neue Ansätze für das nationale Abfallende (Jahrbuch Umweltrecht) Wien. Österreich: Hsg. Daniel Ennöckl/Martin Niederhuber; NWV - Neuer Wissenschaftlicher Verlag 2019
- [6] Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 2. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 56) geändert worden ist.
- [7] Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19.11.2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien, ABl vom 22.11.2008, L 312/3
- [8] Richtlinie (EU) 2018/851 des europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle
- [9] Verwaltungsgerichtshof (VwGH) (A), Beschluss vom 24.4.2018, Ra 2018/05/0034

## Ansprechpartner



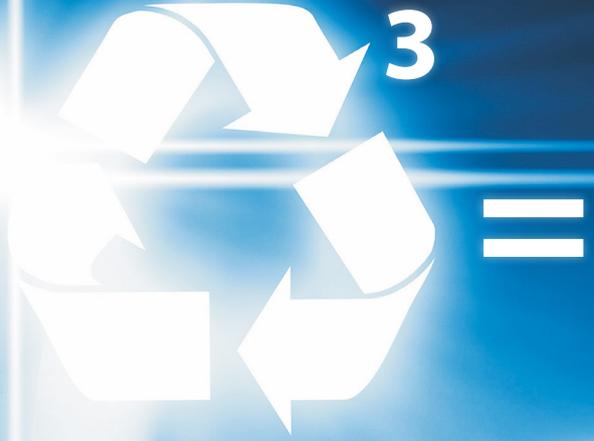
### **Bmstr. Dipl.-Ing. Mag. Thomas M. Kasper**

PORR Bau GmbH  
Abfallrechtlicher Geschäftsführer  
Leitung Abfallmanagement  
Umweltbeauftragter PORR Group  
Prokurist PORR Recycling GmbH  
Absberggasse 47  
1100 Wien, Österreich  
+43 664 626155 6  
thomas.kasper@porr.at



### **Dipl.-Jur. Dirk Buchsteiner**

Oexle Kopp-Assenmacher Lück  
Partnerschaft von Rechtsanwälten mbH  
Rechtsanwalt/Partner  
Lennéstraße 3  
10785 Berlin, Deutschland  
+43 664 626155 6  
dirk.buchsteiner@oklp.de



**EU-Recycling**  
Das Fachmagazin für den europäischen Recyclingmarkt

[www.eu-recycling.com](http://www.eu-recycling.com)

**GLOBAL RECYCLING**  
The Magazine for Business Opportunities & International Markets

[www.global-recycling.info](http://www.global-recycling.info)

**RecyclingPortal**  
Das Fachportal für Abfall, Entsorgung, Recycling, Kreislaufwirtschaft und Märkte

[www.recyclingportal.eu](http://www.recyclingportal.eu)

## From Waste to Construction Product

Marthe-Louise Fehse

In times of tight supply chains and against the backdrop of CO<sub>2</sub> saving potentials in the construction sector, the sustainable use of building materials plays an increasingly important role. Under the pressure of rising prices and environmental product requirements, economic actors are increasingly motivated to reuse and/or recycle already used building products. In order for material to reach the end of waste status, it must, among other things, comply with the technical requirements applicable to its respective intended use as well as all legislation and applicable standards for products. This requires an incidental examination of the product law provisions. However, since building product law and product-related building regulation law are specialised matters, often only a superficial examination of the product law requirements takes place. The article therefore presents the basics of construction product law and product-related building regulation law. In this context, the formal requirements are addressed, which can be based both on European construction product law in the EU Construction Products Regulation (CPR) and on national law in the state building regulations. The differences and similarities between the procedures are also described here, as well as the options available to manufacturers. It also describes how the qualitative requirements are determined depending on the intended use of the construction product. The entire building code of the Länder, including the technical building regulations and special building regulations, is available as a source for this. Finally, any additionally applicable technical requirements from technical standards are taken into account. These can also be of importance because DIN standards in particular are subject to the rebuttable presumption that they are generally recognised rules of technology.

# Vom Abfall zum Bauprodukt

Marthe-Louise Fehse

1.	Anknüpfungspunkt des Produktrechts im Abfallrecht.....	27
2.	Produktrechtliche Voraussetzungen .....	28
2.1.	Materielle Anforderungen an Bauprodukte.....	28
2.2.	Formelle Anforderungen an Bauprodukte .....	29
3.	Sonstige technische Anforderungen.....	31
4.	Ausblick.....	32

In Zeiten knapper Lieferketten und vor dem Hintergrund der CO<sub>2</sub>-Einsparpotenziale im Bausektor, spielt die nachhaltige Nutzung von Baumaterialien eine immer größere Rolle. Unter dem Druck steigender Preise und umweltbezogener Produkthanforderungen sind Wirtschaftsakteure immer häufiger motiviert, bereits gebrauchte Bauprodukte weiter- und/oder wiederzuverwenden oder zu recyceln. Um den Rechtsrahmen hierfür zu klären, müssen das Abfall- und das Produktrecht übereinander geschoben werden. Das Produktrecht, insbesondere das Bauprodukte- und produktbezogene Bauordnungsrecht, stellen jedoch eine Spezialmaterie dar, die bei der Betrachtung des gesamten Materialkreislaufs häufig nur oberflächlich bewertet wird. Der vorliegende Beitrag stellt daher die Grundlagen des Bauprodukterechts und des produktbezogenen Bauordnungsrechts dar und zeigt ihre Zusammenhänge mit dem Abfallrecht auf.

## 1. Anknüpfungspunkt des Produktrechts im Abfallrecht

Das Produktrecht kann bei der Bewertung kreislaufwirtschaftsrechtlicher Fragestellungen nicht ausgeklammert werden. Ist ein gebrauchtes Bauprodukt zu Abfall geworden, kommt das abfallrechtliche Regelungsregime zur Anwendung. Um das Ende der Abfalleigenschaft zu erreichen, ist u.a. erforderlich, dass das Material die für seine jeweilige Zweckbestimmung geltenden technischen Anforderungen sowie alle Rechtsvorschriften und anwendbaren Normen für Erzeugnisse erfüllt (§ 5 Abs. 1 Nr. 3 KrWG). Damit ein Nebenprodukt als solches qualifiziert werden kann, ist erforderlich, dass seine Verwendung rechtmäßig ist. Hierzu zählt u.a., dass die einschlägigen Produkthanforderungen erfüllt werden (§ 4 Abs. 1 Nr. 4 KrWG). Im Rahmen dieser Prüfungen müssen die produktrechtlichen Anforderungen daher inzident geprüft werden.

## 2. Produktrechtliche Voraussetzungen

Damit ein Bauprodukt verwendet werden darf, muss es die im jeweiligen Bundesland einschlägigen rechtlichen Anforderungen der Landesbauordnungen erfüllen. Diese sind in den §§ 16b ff. Musterbauordnung (MBO) geregelt. Um in diesem Beitrag eine einheitliche Darstellung zu ermöglichen, wird nicht auf die einzelnen Landesbauordnungen abgestellt, sondern auf die MBO. Bei der MBO handelt es sich nicht um geltendes Recht, sondern lediglich um eine von der Bauministerkonferenz abgestimmte Vorlage, welche die Länder in Landesrecht umsetzen müssen. Die Landesbauordnungen können sich daher im Detail von der MBO unterscheiden. Der Wortlaut der Landesbauordnungen weicht in den hier relevanten Vorschriften nur geringfügig ab und kann daher als Referenz verwendet werden.

Die produktrechtlichen Anforderungen lassen sich unterteilen in formelle und materielle Anforderungen. Die formellen Anforderungen betreffen die dokumentierten Prüfungen bzw. die Erlaubnis und die Kennzeichnung der Bauprodukte, an deren Vorhandensein die Verwendbarkeit geknüpft wird (dazu sogleich Ziff. 2.2). Die materiellen Anforderungen betreffen die qualitativen Anforderungen an das Bauprodukt, die je nach vorgesehenem Verwendungszweck variieren können (dazu sogleich Ziff. 2.1).

### 2.1. Materielle Anforderungen an Bauprodukte

Die materiellen Anforderungen, die an die Verwendung eines Bauproduktes gestellt werden, ergeben sich aus dem gesamten Bauordnungsrecht. Hierzu zählen in erster Linie die Landesbauordnungen sowie die Sonderbauvorschriften. Von großer Bedeutung sind außerdem die Technischen Baubestimmungen. Bei den Technischen Baubestimmungen handelt es sich um Verwaltungsvorschriften mit Außenwirkung, die von den Ländern zur Konkretisierung der bauordnungsrechtlichen Anforderungen veröffentlicht werden. Sie sind zu beachten (§ 85a Abs. 1 MBO). Die Technischen Baubestimmungen der Länder beruhen ebenfalls auf der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (M-VV TB), welche vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) erarbeitet wird, sodass sich die Technischen Baubestimmungen der Länder sehr ähnlich sind. Die qualitativen Anforderungen, die an ein Bauprodukt gestellt werden, können sich je nach geplantem Verwendungszweck voneinander unterscheiden und müssen deshalb verwendungsspezifisch ermittelt werden. Es können auch Anforderungen relevant sein, die mittelbar an das Bauprodukt gestellt werden, etwa weil es in ein anderes Bauprodukt eingebaut wird und an dieses Bauprodukt Anforderungen gestellt werden.

Die M-VV TB bzw. die Technischen Baubestimmungen der Länder dürfen jedoch nur Anforderungen zur Abwehr abstrakter Gefahren nicht jedoch zur Gefahrenvorsorge treffen (so zu den Technischen Baubestimmungen in Baden-Württemberg und Bayern: VGH Baden-Württemberg, Urt. 7. Oktober 2020 – 8 S 1944/18; Bayerischer VGH, Urt. v. 24. November 2021 – 2 N 21.2173). Eine Gefahr liegt nur vor, wenn eine Sachlage oder ein Verhalten bei ungehindertem Geschehensablauf mit hinreichender

Wahrscheinlichkeit in absehbarer Zeit die öffentliche Sicherheit oder Ordnung schädigen wird. Ein Schutzgut der öffentlichen Sicherheit sind u.a. Rechtsgüter der Bürger, d.h. beispielsweise die Gesundheit. Von der Gefahrenabwehr muss die Gefahrenvorsorge abgegrenzt werden, die viel früher ansetzt und bereits das Entstehen einer Gefahr verhindern soll.

Anforderungen an rezyklierte Gesteinskörnungen für bestimmte Bauteile aus Beton sowie an industriell hergestellte Gesteinskörnungen werden beispielsweise in Anhang 10 der M-VV TB (Anforderungen an bauliche Anlagen bezüglich der Auswirkungen auf Boden und Gewässer, ABuG) konkretisiert. Hier werden u.a. Anforderungen an Eingangsmaterialien sowie Eluat- und Feststoffwerte festgelegt. Vor dem Hintergrund des Maßstabes der Gefahrenabwehr könnte man die Rechtmäßigkeit dieser Regelungen, insbesondere im Hinblick auf die Feststoffwerte, jedoch in Frage stellen. Ferner zu berücksichtigen wären ggf. Anforderungen, die mittelbar an die Gesteinskörnungen gestellt werden, etwa indem Anforderungen an den Mörtel oder den Beton formuliert werden. Anforderungen an bauliche Anlagen im Betonbau enthält die M-VV TB beispielsweise in Abschnitt A 1.2.3, Anforderungen an bauliche Anlagen im Mauerwerksbau beispielsweise in Abschnitt 1.2.6.

## 2.2. Formelle Anforderungen an Bauprodukte

Um bewerten zu können, ob ein Bauprodukt die materiellen Anforderungen erfüllt, muss der Hersteller verlässliche und vergleichbare Produktinformationen zur Verfügung stellen. Um die Verlässlichkeit und Vergleichbarkeit der Produktinformationen sicherzustellen, regeln die formellen Anforderungen insbesondere, welche Informationen der Hersteller auf welcher Grundlage ermitteln muss und in welcher Form er sie bereitstellen muss. Außerdem wird geregelt, inwieweit unabhängige Drittstellen oder Behörden einbezogen werden müssen.

Die formellen Anforderungen an Bauprodukte unterscheiden sich in Abhängigkeit davon, ob es sich bei den Bauprodukten um sogenannte harmonisierte Bauprodukte handelt oder nicht.

Harmonisierte Bauprodukte sind solche Bauprodukte, die in den Anwendungsbereich der Verordnung (EU) 305/2011 (EU-Bauprodukteverordnung, EU-BauPVO) fallen. Für diese Bauprodukte verweist § 16b MBO in formeller Hinsicht auf die Vorschriften der EU-BauPVO. Bauprodukte fallen in den Anwendungsbereich der EU-BauPVO, wenn sie von einer harmonisierten Norm erfasst sind oder sie einer Europäischen Technischen Bewertung (ETA) entsprechen (Art. 4 Abs. 1 EU-BauPVO). Bei Letzterer handelt es sich um ein Instrument, durch welches Hersteller, deren Produkte noch nicht von der harmonisierten Norm erfasst sind, diese selbst in den Anwendungsbereich der EU-BauPVO hineindefinieren können. Hersteller, deren Bauprodukte in den Anwendungsbereich der EU-BauPVO fallen, müssen für diese Bauprodukte u.a. eine Leistungserklärung erstellen und die Produkte mit dem CE-Kennzeichen kennzeichnen. Die harmonisierten Normen enthalten Prüfverfahren in Bezug auf sog. wesentliche Merkmale. Diese Prüfverfahren muss der Hersteller, ggf. unter Hinzuziehung einer notifizierten Stelle, prüfen und die Ergebnisse in der Leistungserklärung ausweisen.

Regelungszweck der EU-BauPVO ist jedoch in erster Linie die anwendbaren Prüfverfahren sowie die auf dieser Grundlage bereitzustellenden Produktinformationen europäisch zu vereinheitlichen. Die EU-BauPVO regelt deshalb in erster Linie das Inverkehrbringen bzw. den Handel mit Bauprodukten, nicht jedoch ihre Verwendung. Aus diesem Grund verweist § 16b MBO hinsichtlich der Verwendung auf die CE-Kennzeichnung. Harmonisierte Normen aufgrund der EU-BauPVO enthalten in den meisten Fällen jedoch keine Anforderungen an bereits gebrauchte Bauprodukte. Für rezyklierte und industriell hergestellte Gesteinskörnungen für Mörtel oder Beton gibt es jedoch Regelungen in harmonisierten Normen, sodass es sich bei Gesteinskörnungen häufig um harmonisierte Bauprodukte handelt. Gibt es keine harmonisierte Norm, hat der Hersteller die Möglichkeit eine ETA zu beantragen und sein Produkt dadurch auf freiwilliger Basis in den Anwendungsbereich der EU-BauPVO einzubeziehen. Dieses Vorgehen kann insbesondere sinnvoll sein, wenn das fragliche Produkt nicht nur in Deutschland, sondern europaweit vermarktet werden soll. Aufgrund der ETA kann der Hersteller des Bauproduktes eine Leistungserklärung ausstellen und das Bauprodukt mit dem CE-Kennzeichen versehen.

Trägt ein Bauprodukt das CE-Kennzeichen, darf der Mitgliedstaat den Handel und die Verwendung des betreffenden Produktes weder verbieten noch behindern (Art. 8 Abs. 4 EU-BauPVO). Dieses sog. Behinderungsverbot bedeutet insbesondere, dass Hersteller harmonisierter Bauprodukte neben den europäisch reglementierten Prüfverfahren aufgrund des nationalen Rechts keine weiteren Prüfungen durchführen müssen. Umstritten ist dabei, ob sich das Behinderungsverbot auf die Regulierung des harmonisierten Bauproduktes insgesamt bezieht oder nur auf solche Merkmale, die von der harmonisierten Norm erfasst sind. Vor dem Hintergrund, dass die europäische Harmonisierung gerade zusätzliche Prüfungen vermeiden möchte, spricht vieles dafür, die harmonisierten Normen insgesamt als abschließend zu betrachten und eine nationale Nachregulierung nicht zuzulassen. In diesem Zusammenhang ebenfalls problematisch sind die sogenannten Öffnungsklauseln in harmonisierten Normen, die in Bezug auf bestimmte wesentliche Merkmale auf die jeweilige nationale Rechtslage verweisen. Von den Öffnungsklauseln wird häufig im Zusammenhang mit gefährlichen Stoffen Gebrauch gemacht.

Gibt es jedoch keine harmonisierte Norm oder ETA, sind subsidiär die nationalen Anforderungen zu beachten. Das Verfahren ist in den §§ 17 ff. MBO beschrieben. Danach ist für ein Bauprodukt grundsätzlich ein Verwendbarkeitsnachweis erforderlich, um es verwenden zu dürfen. Verwendbarkeitsnachweise sind die Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung (abZ), das Allgemeine Bauaufsichtliche Prüfzeugnis (abP) oder die Zustimmung im Einzelfall (ZiE). Die abZ muss beim DIBt beantragt werden, während für die ZiE die Obersten Bauaufsichtsbehörden der Länder zuständig sind. Wenn ein abP statt einer abZ ausreichend ist, ist dies in der M-VV TB bzw. den Technischen Baubestimmungen der Länder geregelt. Ein Verwendbarkeitsnachweis ist u.a. nicht erforderlich, wenn es für das Bauprodukt allgemein anerkannte Regeln der Technik gibt oder die M-VV TB dies bestimmt. Stimmt ein Bauprodukt mit dem Verwendbarkeitsnachweis oder der M-VV TB überein oder weicht nur unwesentlich davon ab, gibt der Hersteller die Bestätigung der Übereinstimmung ab, indem er das Produkt mit dem Ü-Zeichen kennzeichnet.

Die Verwendbarkeitsnachweise gehen inhaltlich über die Leistungserklärung hinaus. Während die Leistungserklärung lediglich die Ergebnisse der durchzuführenden Prüfungen ausweist und keine Aussage darüber enthält, ob das Bauprodukt die materiellen Anforderungen des Bauordnungsrechts erfüllt, treffen die Verwendbarkeitsnachweise diese Aussage durchaus. Im Rahmen des Verwendbarkeitsnachweises werden nicht nur die vom Hersteller durchzuführenden Prüfverfahren definiert, sondern inzident auch die bauordnungsrechtlichen Anforderungen in Bezug auf den geplanten Verwendungszweck geprüft und bescheinigt. Ist ein Bauprodukt daher europäisch harmonisiert, liegt eine größere Verantwortung beim Verwender des Bauproduktes, die Ergebnisse der Leistungserklärung mit den materiellen bauordnungsrechtlichen Anforderungen abzugleichen.

### 3. Sonstige technische Anforderungen

Bei der Bewertung berücksichtigt werden müssen des weiteren Anforderungen, die sich aus technischen Normen ergeben. In Betracht kommen insbesondere Anwendungsnormen, welche Mindestanforderungen an Bauprodukte definieren. Da die M-VV TB nur Anforderungen zur Gefahrenabwehr stellen darf, bildet sie nur den Mindeststandard ab. Es ist jedoch möglich, dass weitergehende technische Anforderungen gestellt werden. Diese können nicht nur bei der Bewertung der Abfalleigenschaft eine Rolle spielen, sondern de facto einen erheblichen Einfluss auf die Nachfrage des Produktes haben. Verwender von Bauprodukten sind häufig vertraglich dazu verpflichtet, die allgemein anerkannten Regeln der Technik einzuhalten. Dies ist beispielsweise bei Bauunternehmern der Fall, die ihrem Auftraggeber aufgrund eines Werkvertrages verpflichtet sind. Bei DIN-Normen wird aufgrund der ständigen Rechtsprechung des BGH widerleglich vermutet, dass es sich bei ihnen um allgemein anerkannte Regeln der Technik handelt. Architekten, Bauunternehmer oder Planer halten sich daher häufig bereits aus Gründen der Haftungsvermeidung an die einschlägigen DIN-Normen. Ähnlich verhält es sich bei technischen Regelwerken, die aufgrund ähnlicher Verfahren zu Stande gekommen sind, wie beispielsweise VDI-Richtlinien. Enthält eine Anwendungsnorm spezielle zusätzliche Anforderungen an ein Bauprodukt, sollte deren Einhaltung daher zusätzlich sichergestellt und nachgewiesen werden.

Sieht eine Anwendungsnorm den Einsatz eines rezyklierten Produktes beispielsweise gar nicht vor, kann dies seinen Einsatz in der Praxis hemmen. In diesem Fall kann in Betracht gezogen werden, die entsprechende Regelungsgrundlage selbst zu schaffen. Ein mögliches Instrument kann eine allgemeine Bauartgenehmigung sein, welche ebenfalls beim DIBt beantragt werden kann.

Anforderungen an Gesteinskörnungen können sich beispielsweise aus Anwendungsnormen ergeben, welche Anforderungen an Beton oder Mörtel oder sonstige Zielprodukte stellen.

## 4. Ausblick

Die Europäische Kommission hat im März 2022 den Entwurf einer novellierten Bauprodukteverordnung vorgelegt, welcher insbesondere dem Green Deal Rechnung tragen soll. Vor diesem Hintergrund werden auch Anforderungen an wiederverwendete und gebrauchte Bauprodukte definiert. Das Trilog-Verfahren soll im Sommer 2023 beginnen.

Wenn die novellierte Bauprodukteverordnung in Kraft getreten ist, muss das nationale Regelungssystem der Landesbauordnungen an die novellierte Bauprodukteverordnung angepasst werden. Es wird daher voraussichtlich zu einer Überarbeitung des Regelungskonzeptes kommen.

### Ansprechpartner

#### Dr. Marthe-Louise Fehse

Franßen & Nusser Rechtsanwälte PartGmbB

Rechtsanwältin und Partnerin

Fasanenstraße 73

10719 Berlin, Deutschland

+49 30 1663812 20

fehse@fn.legal



# AUF DEN RICHTIGEN KREISLAUF KOMMT ES AN!

NUTZEN SIE UNSERE  
CROSSMEDIALEN  
KANÄLE.



Kontakt: Heidrun Dangl  
Tel.: +49 69 7595-2563  
heidrun.dangl@dfv.de

**JETZT E-PAPER LESEN!**





# Test- und Entwicklungszentrum auf dem neusten Stand der Technik: Bewertung und Optimierung Ihres Sortierprozesses.

Stellen Sie sicher, dass Ihre Anlage die gewünschten Ergebnisse liefert: führen Sie selbst Tests an den einzelnen Maschinen durch, oder simulieren Sie Ihren gesamten geplanten Sortierprozess mit Hilfe von Bypass-Konstruktionen im STADLER Testzentrum.

Im Hinblick auf Nachhaltigkeit und die zukunftsorientierte Technik ist das STADLER Test- und Entwicklungszentrum eine perfekte Möglichkeit für Innovationen der Forschungsprojekte, die zu einer sauberen Welt beitragen.

Möchten Sie Ihren Sortierprozess optimieren?  
**Dann kontaktieren sie uns!**

**STADLER Anlagenbau GmbH**

+49 7584 9226-0  
info@w-stadler.de  
www.w-stadler.de

**STADLER®**  
Technik von ihrer besten Seite

**Bauabfälle**

## Use of Recycled Aggregates for the Manufacture of Building Products – Researched, But Hardly Implemented

Frank Hlawatsch

Climate change is progressing, countermeasures to limit it must be taken quickly. In addition to climate protection measures, which directly reduce CO<sub>2</sub> emissions in particular, the protection of natural resources by recycling the existing construction waste flow in the form of a circular economy is becoming a priority.

Up to now, recycled aggregates have mainly been used in underground engineering in Germany. The proportionate use of recycled aggregates as a substitute for natural aggregates in the production of structural concrete is also becoming more widespread. However, this distracts from the fact that there are high-value uses for recycled aggregates in the production of resource-efficient building materials that have not been used before. Researched recycling methods exist for different mineral aggregates, which have even been developed to the point of being ready for the market.

A functioning circular economy with a focus on recycled building materials affects all players in the entire construction chain: demolition contractors, processors, building material manufacturers, planners, construction companies, authorities, builders. Each of them must be actively involved in the expansion of a circular economy. Each of them must actively identify and implement opportunities to integrate recycled minerals or recycled building materials within their field of activity. Exploitation paths that have already been researched are available, or further utilization paths are being developed. In both cases, the initiative should go beyond the current level.

Climate change is a major political issue. It is to be expected that in the future the focus will also be on expanding the circular economy. A significant expansion of existing recycling strategies would be advantageous for the building industry.

## Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen für die Herstellung von Bauprodukten – erforscht, aber kaum umgesetzt

Frank Hlawatsch

1.	Stand des Recyclings.....	38
2.	Erforschte Verwertungswege .....	39
2.1.	Verwertungswege mineralischer Reststoffe von und mit der Forschungsvereinigung RWB .....	39
2.1.1.	Methanox .....	40
2.1.2.	Wandsystem aus Mörtel und Stein aus Porenbetonbrechsanden.....	40
2.1.3.	Recyclbares R-Bauprodukt Schaumstein .....	41
2.1.4.	Gipsgebundene Bauplatten aus feinem Rezyklat-Porenbeton-Brechsand.....	42
2.1.5.	Öko-Mauerstein aus Brechsanden aus der Bauschuttzubereitung.....	42
2.2.	Recycling- und Wiederverwendungs-forcierende Aktionen.....	43
3.	Fazit .....	43
4.	Quellen.....	44

Der immer präsenter werdende Klimawandel rückt durch z.T. extreme Wetterereignisse und durch Aktionen von Klimaschützern zunehmend in den Vordergrund. In der öffentlichen Wahrnehmung wird bislang die Reduzierung des Ausstoßes von Kohlendioxid fast als alleinige wirksame Maßnahme gegen den Klimawandel wahrgenommen. Tatsächlich spielt auch ein verantwortungsvoller Umgang mit natürlichen Ressourcen eine entscheidende Rolle. Die *G7 Berlin Roadmap on Resource Efficiency and Circular Economy* [8] sowie die *RESCU-Studie* [18] belegen den engen Zusammenhang von Klima- und Ressourcenschutz und betonen diesen sogar.

Am *Tag der Lösungen* auf der Weltklimakonferenz (COP27) erklärte Bundesumweltministerin Steffi Lemke im November 2022 *Eine funktionierende Kreislaufwirtschaft ist einer der Schlüssel zur Lösung der drei existentiellen Krisen, die wir Menschen verursacht haben, Klimakrise, Verschmutzungskrise und die Krise des Artensterbens. ... der Blick auf Ressourcen und Kreislaufwirtschaft ist in seiner Bedeutung bisher unterschätzt worden.* [4]. Diese Sichtweise wird von Wissenschaftlern und Politikern zunehmend vertreten.

Mittlerweile finden sich in den öffentlichen Medien zunehmend Forderungen auf Landes- und Bundesebene von Vertretern der Opposition und der Ampel-Koalition nach einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft, um natürliche Ressourcen zu schonen und wo möglich, CO<sub>2</sub>-Emissionen zu vermeiden. Mit Blick auf die in der Bevölkerung

gewachsene Sensibilisierung bezüglich des Klima- und Ressourcenschutzes sowie auf das Streben nach Umsetzen von Maßnahmen durch die Ampelregierung oder folgender Regierungen kann davon ausgegangen werden, dass auch das Thema Kreislaufwirtschaft verstärkt in den Fokus gelangt.

In diesem Zusammenhang wird bereits über die Einführung von Quoten für den Einsatz von Recyclingmaterialien in Bauprodukten diskutiert. Vor dem Hintergrund verschiedener miteinander kooperierender Akteure (im Wesentlichen: Abbruchunternehmen, Aufbereiter, Anbieter natürlicher Gesteinskörnungen, Baustoffhersteller, Planer, Bauunternehmen, Behörden, behördliche und private Auftraggeber) wäre dies jedoch nur schwerlich umsetzbar. Um einer solchen Fremdsteuerung zuvorzukommen, sollte sinnvollerweise das Handeln unmittelbar auf den Ressourcenschutz ausgerichtet werden, z.B. im Rahmen einer Selbstverpflichtung der Branche. Dabei bedarf es nur bedingt neuer Innovationen, denn in vielen Bereichen zeigt die Forschung bereits weit fortentwickelte Wege auf. Diese gilt es engagiert umzusetzen. Die eng miteinander verbundenen Akteurspartner müssen rasch für deren Gewerke den technischen, wirtschaftlichen, rechtlichen, bauaufsichtlichen und versicherungstechnischen Rahmen der Möglichkeiten ausloten oder anpassen.

## 1. Stand des Recyclings

In Deutschland sind bereits beachtliche Erfolge und hohe Recycling-Quoten im Umgang mit mineralischen Bauabfällen zu verzeichnen: Mineralische Bauabfälle werden gemäß Monitoring-Bericht 2020 zu etwa 90 % verwertet. Danach wurden in 2020 von den 76,9 Mio. t Recycling-Baustoffen 50,3 % im Straßenbau, 23,0 % im Erdbau und 7,2 % überwiegend im Deponiebau verwertet, 19,5 % fanden Anwendung in der Asphalt- und Betonherstellung [5].

Diese hohen Verwertungsquoten sind grundsätzlich zu begrüßen. Jedoch werden diese Wertstoffe z.T. auf geringerem Niveau eingesetzt, als es deren Eigenschaftspotenziale erlauben würde. Teile des Bauschuttstroms finden dabei häufig sogar nur auf geringstem Niveau Einsatz, z.B. als ungebundene Schüttung auf Feld- und Waldwegen, oder sie werden deponiert. Dies geschieht sogar vor dem Hintergrund, dass bereits erforschte, z.T. bis zur Marktreife entwickelte Verwertungswege existieren und z.T. deren Verwendung durch bauaufsichtlich Regelungen möglich wären.

Neben dem Einsatz von Recyclingmassen im Tiefbau wird die Verwendung von rezyklierter Körnung für die Herstellung von Beton als *Königsweg* häufig ins Feld geführt. Diese ist seit mehr als zehn Jahren gemäß DAfStB-Richtlinie [6] geregelt. Seine tatsächliche reguläre Verwendung ist jedoch noch immer beschränkt auf einen Teil der Ballungszentren, z. B. Stuttgart, Berlin. Als vordergründiges Argument für eine zögerliche Durchsetzung des *R-Betons* bzw. *RC-Betons* wird i.d.R. angeführt, dass normativ verwendbare, natürliche Gesteinskörnungen noch immer kostengünstiger zu beziehen seien als rezyklierte. Als weiteres Argument wurde angeführt, dass die DAfStB-Rili bislang lediglich die Verwendung von Gesteinskörnungen größer gleich 2 mm erlaube.

Zukünftige normative Anpassungen lassen schon zeitnah erwarten, dass auch der rezyklierte Korngrößenbereich 0 bis 2 mm in adäquater Menge zum verwendeten Splitt-Korngrößenbereich, z.B. der Körnung 2/16 mm, einsetzbar sein wird.

Die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung zur Herstellung von Beton im Hoch- und Tiefbau ist jedoch nicht die einzige Möglichkeit des hochwertigen Einsatzes rezyklierter Wertstoffe. Natürliche Gesteinskörnungen (auch mineralische Mehle) lassen sich potenziell – zumindest anteilig – durch rezyklierte Gesteinskörnung substituieren. Zudem ergeben sich weitere potenzielle Einsatzgebiete, die sich durch individuelle Eigenschaften rezyklierter Gesteinskörnungen anbieten und wirtschaftlichen, ökologischen und auch ökonomischen Nutzen bringen können.

## 2. Erforschte Verwertungswege

An Beispielen abgeschlossener und laufender Forschungs- und Aktionsvorhaben von und mit der Forschungsvereinigung Recycling und Wertstoffverwertung im Bauwesen e.V. (RWB) soll neben dem überstrahlenden Thema *R-Beton* gezeigt werden, welche technischen aber auch organisatorischen Maßnahmen den Aufbau einer echten Kreislaufwirtschaft einen Schritt näher bringen können. Dieser Beitrag soll nicht als Zusammenstellung von entwickelten Verwertungswegen verstanden werden, wenn gleich dies seinem Anliegen dienlich wäre und somit als zukünftige Aufgabe verstanden werden kann.

Bei allen vorgestellten Projekten entstanden und entstehen intensive Kontakte und Kooperationen zwischen aufbereitenden Unternehmen, Baustoffherstellern, Forschungseinrichtungen, Behörden und Bauherren. Diese Kontakte unterschiedlicher Akteure bilden die Basis für den Ausbau einer gelebten aktiven Kreislaufwirtschaft.

Diese Projekte sind – trotz erfolgreich abgeschlossener Entwicklungen z.T. bis hin zur Marktreife und auch öffentlich zu besichtigenden musterhaften Baukonstruktionen – bis heute nicht von den eingebundenen Baustoffherstellern in die Regelproduktion aufgenommen worden. Gründe dafür sind vielfältig, beziehen sich aber nicht auf die Baustoffqualität.

### 2.1. Verwertungswege mineralischer Reststoffe von und mit der Forschungsvereinigung RWB

Die Forschungsvereinigung RWB e.V. befasst sich seit vielen Jahren mit der Entwicklung von Verwertungswegen für mineralische Reststoffe aus der Bauschutttaufbereitung, in dem diese als mineralische Wertstoffe mit besonderen Eigenschaften betrachtet werden. Zudem forciert die Forschungsvereinigung die Wiedernutzung gebrauchter Bauelemente.

Als Schwerpunkt bildete sich in den vergangenen Jahren die Entwicklung von Verwertungswegen für Porenbetonbruch heraus. Für die gesamte bei der Aufbereitung von Porenbetonbruch entstehende Bandbreite an Korngrößenfraktionen wurde

eine Verwertungsstrategie erarbeitet. Diese aber auch andere praxisorientierten FuE-Arbeiten und die intensiven Bemühungen zum Aufbau einer aktiven Kreislaufwirtschaft werden in den nachfolgenden Kapiteln erläutert.

### 2.1.1. Methanox

Bis ins Jahr 2005 wurden organische Abfälle auf Deponien entsorgt. Deren Zersetzung führt über Jahrzehnte zur klimaschädlichen Methanbildung, die abgesaugt und thermisch verwertet wird, solange ein hinreichend starker Volumenstrom zu verzeichnen ist. Bleibt dieser aus, so würde Methan ungehindert in die Atmosphäre entweichen, oder es würden Maßnahmen gemäß [14] getroffen werden. In diesem Sinne würde sich der Einsatz der hochwirksamen Methanox-Funktionsschicht aus Porenbeton- und Kalksandsteingranulaten gemäß [13, 17] besonders anbieten. Die Porenbetongranulate bieten mit ihrer stoffspezifischen Gesamtporosität von bis zu 80 Vol.-% hinreichenden Porenraum als Lebensraum für Methan-reduzierende Mikroorganismen sowie als durchströmbares Gefüge für austretendes Methan. Zusätzliche Mengen-Anteile von Kalksandsteingranulaten stabilisieren die Funktionsschicht mechanisch und bieten ein zusätzliches für Kalksandstein charakteristisches Volumen von mehr als 10 Vol.-%, so dass bezogen auf gesamte Funktionsschicht die erforderliche Luftkapazität der gesamten Methanox-Funktionsschicht stets um ein Vielfaches überschritten ist (Bild 1).



Bild 1: Testreaktor des Ansatzes *Methanox* auf Basis von Porenbeton- und Kalksandsteingranulaten

### 2.1.2. Wandsystem aus Mörtel und Stein aus Porenbetonbrechsanden

Die Entwicklung des R-Wandsystems aus Porenbetonbruch begann mit Versuchen, aus feinen Porenbetonbrechsanden unterschiedliche Mörtel herzustellen. Dabei zeigte sich, dass trotz ungünstiger Kornform der Porenbetongranulate die Herstellung gut verarbeitbarer Mörtel möglich ist und diese auch zu bautechnisch nutzbaren Bauprodukten führen können. Im Zuge der Herstellung erdfeuchter Mörtel fielen die gute Komprimierbarkeit und daraus folgend eine beachtlich hohe Grünstandsfestigkeit auf. Dies ermöglichte die weiterführende Entwicklung von Formsteinen [1]. Für beide R-Produkte ließ sich im Zuge eines Scale-Up-Projektes die Fähigkeit zur industriellen Herstellung nachweisen [3]. Schließlich wurden im Zuge der Neuerrichtung des Gebäudes *Recyclingstation Borgfeld* in Bremen einige Innenwände aus dem

neuen R-Wandsystem aus industriell hergestellten Chargen von einer Baufirma errichtet. Ein anschließendes Monitoring belegte die Gleichwertigkeit des neuen R-Wandsystems zu klassischen mineralischen Wandsystemen (vgl. Bild 2) [2, 9].



Bild 2:

R-Wandsystem: Formsteine und Werk trockenmörtel aus Porenbetonbrechsand

### 2.1.3. Recyclbares R-Bauprodukt Schaumstein

In den bautechnischen Verwertungswegen als Mörtel und Stein finden feine und mittelgroße Porenbetonbrechsande Verwendung. Von besonders großem Interesse waren grobe Porenbetongranulate, da in ihnen ein beachtlich hoher Anteil an



Bild 3: *Schaumstein* aus groben Porenbeton-Granulaten; Recycling-Bauprodukt im ersten Recycling-Zyklus

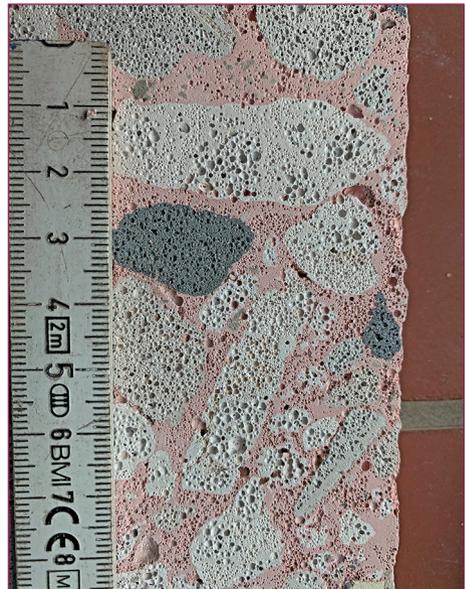


Bild 4: *RC-Schaumstein* aus groben Schaumstein-Granulaten; Recycling-Bauprodukt im zweiten Recycling-Zyklus (Schaummatrix aus zweitem Zyklus ist rot eingefärbt)

ungestörtem Porenbetongefüge enthalten ist. Deren bautechnischer Einsatz gelang, in dem grobe Porenbetongranulate mit einer Korngröße von größer gleich 4 mm in eine Schalung gegeben werden. Der verbleibende Haufwerksraum wird sodann mit einer Porenbeton-ähnlichen mineralischen Matrix verfüllt, die die groben Granulate dauerhaft miteinander verbindet (Bild 3). So entsteht ein innovatives R-Bauprodukt, das zu etwa 50 Vol.-% aus rezykliertem Porenbeton besteht [11] bzw. zu seiner Herstellung nur etwa 50 % natürliche Ressourcen benötigt werden.

Diese Produktionsweise lässt sich in die Produktion von Porenbeton implementieren. Beachtlich dabei ist, dass sich aus groben Granulaten aus diesem R-Bauprodukt abermals R-Bauprodukte in einem weiteren Recycling-Zyklus herstellen lassen (Bild 4) [12].

#### 2.1.4. Gipsgebundene Bauplatten aus feinem Rezyklat-Porenbeton-Brechsand

In diesem laufenden Forschungsvorhaben, gemeinsam durchgeführt von der Hochschule Nordhausen und der MPA Bremen (Geschäftsbereich des Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien – IWT) werden zwei unterschiedlich gelagerte Problemfelder miteinander verknüpft, um für beide eine baupraktisch nutzbare Lösung zu erarbeiten. Zum einen wird für den Rohstoff Gips aus der Rauchgasentschwefelung aufgrund des Ausstieges aus der Kohleverstromung zeitnah eine akute Verknappung erwartet. Zum anderen verlangt der wachsende Bauschuttstrom aus Porenbetonbruch hochwertige Verwertungswege, um Deponiekapazitäten sowie natürliche Ressourcen für die Herstellung neuer Bauprodukte zu schonen. Als kombinierter Lösungsvorschlag ergeben sich gipsgebundene Bauplatten für den Innenausbau (*RC-Poro-Gips-Platte*), die vorzugsweise aus mengenmäßig minimierten recyceltem Gips und feinen Porenbetonbrechsanden gefertigt werden (Bild 5) [16].



Bild 5: Gipsgebundene Bauplatten aus feinem rezyklierten Porenbeton-Brechsand

#### 2.1.5. Öko-Mauerstein aus Brechsanden aus der Bauschutttaufbereitung

Brechsande aus der Bauschutttaufbereitung verfügen i.d.R. über ein hydrothermales Reaktionspotenzial. Im Autoklaven laufen bei Temperaturen von 180 °C bis 200 °C Reaktionsprozesse ab, die die Bestandteile von Mineralstoffgemischen aus der Bauschutttaufbereitung innig und dauerhaft miteinander verwachsen lassen. Dies geschieht z.T. sogar ohne den Einsatz von mit CO<sub>2</sub>-Emissionen behafteten Bindemitteln wie Kalk oder Zement. Mit dieser Arbeitshypothese lassen sich Formsteine nach dem Vorbild von Kalksandsteinen herstellen. Die festigkeitsbildenden Reaktionsprozesse wurden

aufgedeckt [10] und werden in einem laufenden Projekt [15] genutzt, um zukünftig Öko-Mauersteine als reguläres Bauprodukt durch die Kalksandstein-Industrie in den Baustoffmarkt bringen zu können.

### 2.2. Recycling- und Wiederverwendungs-forcierende Aktionen

Das interdisziplinär zusammengesetzte Konsortium aus Bauteilnetz Deutschland e.V., Hochschule Bremen, MPA Bremen (Geschäftsbereich des Leibniz-IWT) und der Forschungsvereinigung Recycling & Wertstoffverwertung im Bauwesen e.V. (RWB) bietet die geförderte Veranstaltungsreihe *Bremer RessourcenEffizienz-Tisch* [7] an. In der Veranstaltungsreihe wird das gemeinsame Ziel verfolgt, die Wiederverwendung von Bauteilen und das Recycling mineralischer Stoffströme in der Region zu forcieren. Dazu wurden mehrere kombinierte Vortrags- und Arbeitsveranstaltungen zu vorab identifizierten Themen durchgeführt, in denen zunächst Impulsvorträge gehalten und diese anschließend in geführten Diskussionen aufgegriffen und von den Gästen weiterbehandelt wurden. Alle *auf den Tisch* gebrachten Wünsche, Forderungen, Probleme, Lösungsvorschläge wurden aufgezeichnet, werden ausgewertet und in einem Schlussbericht mit Handlungsleitfaden zur Wiederverwendung von Bauteilen und Recycling mineralischer Stoffströme zusammengefasst.

Schon während den Veranstaltungen zeigte sich deutlich, dass sich alle Akteure der gesamten Baukette aktiv und unkonventionell einbringen müssen – aber auch wollen, um eine gelebte aktive Kreislaufwirtschaft aufbauen zu können. Der regionale Bezug ist dabei von größerer Bedeutung für eine *Kurze-Wege-Kreislaufwirtschaft* als nur der Blick auf nationale Rahmenbedingungen, wenngleich diese z.T. angepasst werden müssen, um die übergeordnete Zielstellung aller Akteure erreichen zu können: Das Forcieren des Klima- und Ressourcenschutzes durch eine gelebte Kreislaufwirtschaft.

### 3. Fazit

Unser aller übergeordnetes Ziel muss es sein, dass ressourcenschonende Baustoffe/ R-Baustoffe auf Baustellen und in Baustoffmärkten selbstverständlich werden und einen deutlich höheren Stellenwert einnehmen als bisher. Dieser Beitrag soll als Aufruf an alle Akteure des Bauwesens verstanden werden, engagiert in ihrem Umfeld ergebnisoffen Möglichkeiten des Ressourcenschutzes zu identifizieren und diese mit individuellen Möglichkeiten aufzugreifen und umzusetzen, um eine aktive Kreislaufwirtschaft über das bereits bestehende Maß hinaus zu etablieren. Dies betrifft u.a. den R-Beton, der unter den bauaufsichtlich eingeführten Regelungen schon heute in jeder Region Deutschlands zu beziehen sein sollte.

Insbesondere bereits erforschte Verwertungswege für die Herstellung von R-Bauprodukten, wie sie von vielen Instituten und Einrichtungen vorgehalten werden, sollten aufgegriffen und umgesetzt werden. Dies erfordert Anstrengungen und innovatives Arbeiten, birgt jedoch zudem eine potenzielle Steigerung der Wertschöpfung aus den vorhandenen Stoffströmen in sich.

Entwickelte aber bisher nicht umgesetzte Verwertungswege für Restmassen aus der Bauschutttaufbereitung, wie die beispielhaft anhand von Ansätzen der Forschungsvereinigung RWB e.V. dargelegt, belegen, dass in rezyklierten Gesteinskörnungen ein größeres Nutzungspotenzial besteht als lediglich die Forcierung von R-Beton. Alle Akteure sollten sich zeitnah aktiv in der Gestaltung einer aktiven Kreislaufwirtschaft einbringen, insbesondere über die Mitarbeit in den eigenen Fachverbänden hinaus, z.B. durch Mitarbeit in der Forschungsvereinigung RWB e.V. o.ä. Durch die Entwicklung weiterer Verwertungswege für Reststoffe in Form neuer zeitgemäßer, ressourcenschonender und klimaschützender *R-Baustoffe* ergeben sich Kooperationen, die eine Umsetzung erleichtern.

Wichtig für eine zukünftige Stärkung der Kreislaufwirtschaft ist eine Intensivierung von Fördermöglichkeiten mit öffentlichen Mitteln über das bestehende Maß hinaus. Die Einwerbung von Fördermitteln für Grundlagenforschung für einzelne Pfade bleibt wichtig und sollte einfacher möglich sein. Ausgeweitet werden müssen aber insbesondere Unterstützungen zum Transfer erforschter und neu entwickelter Verwertungswege in die Baupraxis durch niederschwellige praxisorientierte Fördermöglichkeiten.

Einer politisch festgelegte Quotenregelung sollten alle Beteiligten zuvor kommen durch den aktiven Ausbau einer breit angelegten Kreislaufwirtschaft, z.B. im Rahmen einer freiwilligen Selbstverpflichtung der Branche. Dies bedarf des engagierten Arbeitens aller Akteure.

## 4. Quellen

- [1] Aycil, H.; Hlawatsch, F.; Kropp, J.: Hochwertige Verwertungsmöglichkeiten für Porenbeton Rezyklate, Tagungsband Recycling R'16, 2016, Weimar
- [2] Aycil, H.; Kropp, J.: Hochwertige Wiederverwendung von mineralischem Abbruchmaterial und erstmaliger Einsatz von Baustoffen aus Porenbetonrezyklaten in einem Bauvorhaben zur Errichtung von nicht tragenden Innenwänden, 2018, DBU-Vorhaben 31711.
- [3] Aycil, H.; Kropp, J.: Scale up des Porenbetonrecyclings, 19. Int. Baustofftagung (Ibausil), Weimar. F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar, 2015, 361-368.
- [4] Bundesumweltministerin Steffi Lemke auf COP27 – 27. Weltklimakonferenz, <https://www.bmu.de/pressemitteilung/cop27-keine-klimarettung-ohne-ressourcenwende>, Zugriff am 24.03.2023
- [5] Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V.: Mineralische Bauabfälle, Monitoring 2020, Berlin, Januar 2023
- [6] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620; 20210-09
- [7] Forschungsvereinigung Recycling und Wertstoffverwertung im Bauwesen e.V. (RWB): Bremer RessourcenEffizienz-Tisch für das Bauwesen – Fachdialog Reuse und Recycling; laufendes Projekt, Aktenzeichen P-2022-12
- [8] G7 Berlin Roadmap on Resource Efficiency and Circular Economy <https://www.g7germany.de/resource/blob/974430/2044354/c43d64ba810dd65984fdcd18fd6323b/2022-05-27-3-g7-berlin-road-map-data.pdf?download=1>, Zugriff am 22.03.2023]
- [9] Hlawatsch, F.; Aycil, H.; Kropp, J.: Hochwertige Verwertungswege für Porenbetonbruch in Mörteln und Leichtsteinen für Mauerwerk. Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 3., Neuruppin. Karl J. Thomé-Kozmiensky, Hrsg. TK Verlag, 2016, S. 433-453.

- [10] Hlawatsch, F.; Berger, M.; Schlütter, F.; Kropp, J.: Autoklaves Härtungspotenzial und hydrothermale Reaktionsprozesse von Betonbrechsand; Internationale Baustofftagung 2006, ISBN 3000182632, 2006, Seiten 2-1325 bis 2-1332
- [11] Hlawatsch, F.; Küstermann, R.; Kropp, J.: Grobe Rezyklat-Körnungen aus Porenbetonbruch in geschäumten Mauerwerkselementen, Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 5., Neuruppin. Karl J. Thomé-Kozmiensky, Hrsg. TK Verlag, 2018, S. 422-442.
- [12] Hlawatsch, F.; Ufermann-Wallmeier, D.: Leichter Schaumstein aus groben Porenbetongranulaten im zweiten Nutzungszyklus – RC-Schaumstein; Schlussbericht, Förderkennzeichen O3THW04L05, 2022
- [13] Küver, J.: Einsatz von Porenbeton- und Kalksandsteinbruch als bioaktivierte Funktionsschicht auf Deponiekörpern zur Oxidation von Methan ausgasungen. In: Mineralische Nebenprodukte und Abfälle, 5, Neuruppin. Karl J. Thomé-Kozmiensky, Hrsg. TK Verlag, 2018, S. 444-453.
- [14] Laga Ad-hoc-AG Deponietechnik: Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard 7-3 *Methanoxidationsschichten in Deponieoberflächenabdichtungssystemen*, 02.12.2020
- [15] MPA Bremen (GB d. Leibniz-IWT), Bimolab gGmbH Soest: laufendes IGF-Vorhaben, Produktion von CO<sub>2</sub>-armen Ökomauersteinen durch bindemittelfreie Autoklavierung von RC-Brechsanden, mit freundlicher Unterstützung der FV Kalksand, Nr. 21.860 N
- [16] MPA Bremen (GB d. Leibniz-IWT), Hochschule Nordhausen: laufendes Forschungsvorhaben *Gipsgebundene Bauplatten aus feinem Rezyklat-Porenbeton-Brechsand*, 2021-2023, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
- [17] Remesch, M.; Küver, J.: Bioaktivierung von Porenbeton- und Kalksandstein-Recyclinggranulaten mit Methan oxidierenden Bakterien zur Reduktion von Methan ausgasungen aus Hausmülldeponien - Ein Beitrag zum Klima- und Ressourchenschutz, 2015, IGF 16634N
- [18] Umweltbundesamt: RESCUE-Studie: Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität, 2. Auflage Juni 2021; ISSN 1862-4359

### Ansprechpartner



#### Dipl.-Ing. Frank Hlawatsch

Forschungsvereinigung Recycling und Wertstoffverwertung  
im Bauwesen e.V. (RWB)

Geschäftsführer

Paul-Feller-Straße 1

28199 Bremen, Deutschland

+49 412 53708 22

hlawatsch@mpa-bremen.de

## Clog-free Long Part Separator for the Processing of Construction Waste and Incineration Bottom Ashes

Rainer Bunge

On screening machines, long parts end up in the same size fraction as short parts, i.e. in the fines. Even after further processing of this fine material, thin bent wires made of stainless steel or copper often end up in the residue, as they are only insufficiently separated by magnetic separators, eddy current separators and sensor sorters. In order to separate such long parts, a new type of long part separator was developed. In contrast to other long part separators, such as *3D screens*, this one operates without clogging, even at high throughput rates. We see a wide range of applications, both in the recovery of recyclable materials electro(nic) scrap processing, the *cutlery fraction* from waste incineration slags and in the removal of extraneous material pieces, e.g. from construction waste. Particularly in mixed demolition waste, there are often considerable proportions of elongated pieces of wood, plastics (for example cable pipes) and metals (wires), which can be separated by means of a long part separator. Moreover, long pieces can clog or damage machines, e.g. the meshes of linear vibrating screen decks. Long non-magnetic metal parts slip through the feed-side magnetic separation and can damage downstream machinery. An example is broken drill rods in quarrying or tunneling operations. These long parts can get stuck, especially at the transfer points of conveyor belts, causing material jams there, and in the worst case even slitting the conveyor belts. The development of our long parts separator has been completed and the commercial launch is imminent. We see two groups of potential customers, namely operators and plant builders. Vibrating feeders are already installed in many processing plants. These can be easily retrofitted by the plant's own personnel. A second group of customers are manufacturers of processing machines. For these companies, it could be interesting not only to retrofit conventional vibrating feeders, but also to advance the technology through their own further developments.

## Verstopfungsfreier Langteilabscheider zur Aufbereitung von Bauschutt und MVA-Rostaschen

Rainer Bunge

1.	Einführung.....	48
1.1.	Problem.....	48
1.2.	Innovative Lösung: Langteilabscheider <i>Querulator</i> .....	49
1.3.	Grundlagen/Theorie.....	50
2.	Ergebnisse.....	51
2.1.	Technikumsversuche.....	51
2.2.	Umsetzung in den industriellen Betrieb.....	52
2.3.	Korrekte Dimensionierung.....	53
3.	Lehren aus der Praxis.....	54
3.1.	Klemmkorn im Rechen.....	54
3.2.	Notwendigkeit einer <i>Prallplatte</i> .....	55
3.3.	Trennscheide zu hoch eingestellt.....	56
3.4.	Integration eines Windsichters.....	56
4.	Einsatzbereiche.....	56
4.1.	Wertstoffgewinnung: Fokus Edelstähle und Kupfer.....	59
4.2.	Störstoffentfernung.....	59
4.2.1.	Schutz von Maschinen.....	60
4.2.2.	Aufbereitung von Bauschutt: Fokus Mischabbruch ( <i>Baumischabfall schwer</i> ).....	60
5.	Ausblick.....	61

Auf Siebmaschinen gelangen Langteile in die gleiche Korngrößenfraktion wie Kurzteile, also ins Feingut. Auch nach der weiteren Aufbereitung dieses Feingutes gelangen häufig dünne verbogene Drähte aus Edelstahl oder Kupfer in den Rückstand, da sie durch Magnetscheider, Wirbelstromscheider und Sensorsortierer nur ungenügend erfasst werden.

Um derartige Langteile abzutrennen, wurde ein neuartiger Langteilabscheider entwickelt. Dieser arbeitet, im Gegensatz zu anderen Langteilabscheidern wie z.B. *3D-Sieben*, auch bei hohem Durchsatz verstopfungsfrei. Wir sehen ein breites Anwendungsspektrum sowohl in der Wertstoffgewinnung (Elektro(nik)aufbereitung, *Besteckfraktion* aus MVA-Schlacken) als auch in der Entfernung von Störstoffen, z.B. aus Bauschutt. Insbesondere im Mischabbruch finden sich häufig erhebliche Anteile an länglichen Teilen aus Holz, Kunststoffen (z.B. Kabelrohre) und Metallen (Drähte), die mittels Langteilabscheider abgetrennt werden können. Überdies können Langteile die Maschen von linearschwingenden Siebdecks verstopfen. Lange unmagnetische Metallteile schlüpfen durch die aufgabeseitige Magnetscheidung hindurch und können downstream Maschinen beschädigen. Ein Beispiel sind abgebrochene Bohrgestänge im Steinbruch oder beim Tunnelvortrieb. Diese Langteile können sich an den Übergabestellen von Förderbändern querstellen, dort zu Materialstaus führen, und im schlimmsten Fall sogar die Fördergurte aufschlitzen. Die Entwicklung unseres Langteilabscheiders ist abgeschlossen und die kommerzielle Einführung steht unmittelbar bevor. Wir sehen zwei Gruppen von möglichen Kunden, nämlich Betreiber und Anlagenbauer. In vielen Aufbereitungsbetrieben sind bereits Förderrinnen installiert. Diese können durch eigenes Personal auf einfache Weise selbst nachgerüstet werden. Eine zweite Kundengruppe sind Hersteller von Aufbereitungsmaschinen. Für diese Unternehmen könnte es interessant sein nicht nur konventionelle Förderrinnen nachzurüsten, sondern die Technologie durch eigene Weiterentwicklungen voranzutreiben.

## 1. Einführung

### 1.1. Problem

Auf Siebmaschinen wird Schüttgut im Wesentlichen nach dem kleinsten geometrischen Querschnitt getrennt. Hierdurch gelangen Langteile in die gleiche Korngrößenfraktion wie Kurzteile (Bild 1 links). Zum Beispiel schlüpfen längliche Holzstücke und Kabelrohre aus Kunststoff durch die Siebmaschen von Bauschuttaufbereitungsanlagen hindurch und gelangen so ins mineralische Recyclingprodukt (z.B. Mischabbruchgranulat). In diesem Fall stellen die überlangen Teile Störstoffe dar. Umgekehrt können Langteile auch Wertstoffe sein. Ein Beispiel hierfür sind längliche Edelstahlteile, z.B. Besteck, die durch eine konventionelle Aufbereitung von Müllverbrennungsgaschen maschinell nicht auf einfache mechanische Weise rückgewinnbar sind, sondern eine manuelle Separation erfordern.

Nach dem Stand der Technik gibt es bereits Langteilabscheider wie z.B. 3D- oder Nasensiebe. Unbefriedigend ist bei diesen konventionellen Langteilabscheidern, dass sich Langteile in deren Siebmaschen oder Schlitzten, verklemmen können (*Klemmkorn*).

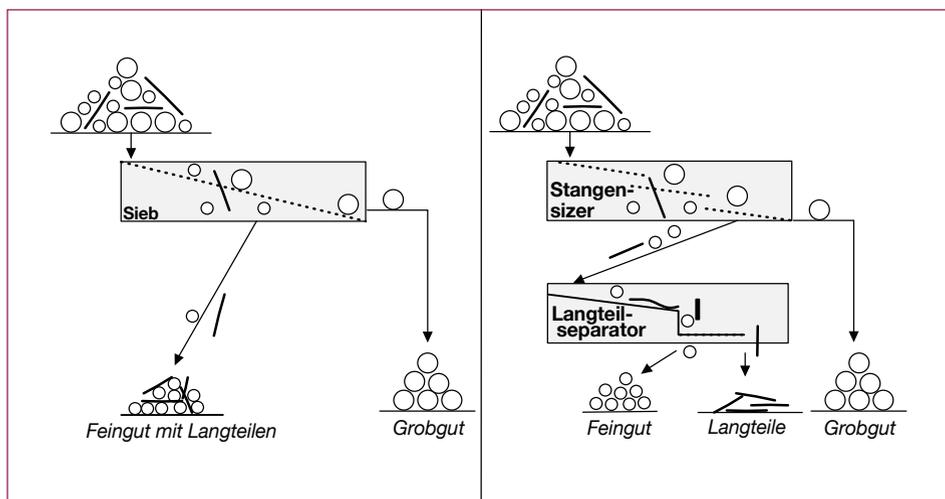


Bild 1: Links: *konventionelle* Absiebung. Die Langteile schlüpfen durch die Maschen und gelangen ins Feingut. Nachteilig ist erstens, dass die Siebmaschen verstopfen können und zweitens, dass die Langteile ins Feingut durchschlagen. Rechts: Verstopfungsfreie Absiebung auf einem Stangensizer und Nachsortierung des Feingutes mittels Langteilabscheider.

## 1.2. Innovative Lösung: Langteilabscheider *Querulator*

Die Kernidee unseres Langteilabscheiders *Querulator* beruht darauf, hinter dem Abwurf einer Fördereinrichtung einen Rechen zu installieren und vor die Abwurfkante eine Ablenkplatte zu hängen. Frontal auf die Ablenkplatte stoßende längliche Partikel werden quer zur Förderrichtung ausgerichtet, fallen dann durch den Schlitz quer auf den Rechen und werden so ins Langteilkonzentrat überführt (Bild 2). Kompakte Partikel fallen hingegen durch den Rechen hindurch. Rechen funktionieren, im Gegensatz zu Langteilabscheidern mit Siebmaschen oder Schlitzten, auch mit siebschwierigem Material praktisch verstopfungsfrei. Die Ablenkplatte ist pendelnd aufgehängt, sodass sie bei einem Materialstau ausweichen kann. Verstopfungen können so ausgeschlossen werden. Die Nummerierungen 1 bis 5 in Bild 2 verdeutlichen den Weg eines Langteils.

Besonders vorteilhaft ist, dass für die Vorabsiebung ein Stangensizer (*Fingersieb*) verwendet werden kann, welcher ebenfalls verstopfungsfrei arbeitet. Zwar schlüpfen lange und flache Teile durch die Stangen hindurch ins Feingut, sie können aber anschließend mittels eines Langteilabscheiders daraus entfernt werden (Bild 1 rechts). Das Projekt wurde von folgenden Partnern durchgeführt:

- UMTEC, Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik der Ostschweizer Fachhochschule,
- UTech: ein Spin-Off der Ostschweizer Fachhochschule,
- Verein für Abfallentsorgung VfA: Betreiberin von Anlagen zur Müllverbrennung und Rostaschenaufbereitung,
- KIBAG RE AG: Tiefbauunternehmung und Betreiberin von Bauschuttanfertigungsanlagen,

- KEZO: Betreiberin einer MVA und einer Rostaschenaufbereitungsanlage,
- INNOSUISSE: Schweizerische Agentur für Innovationsförderung.

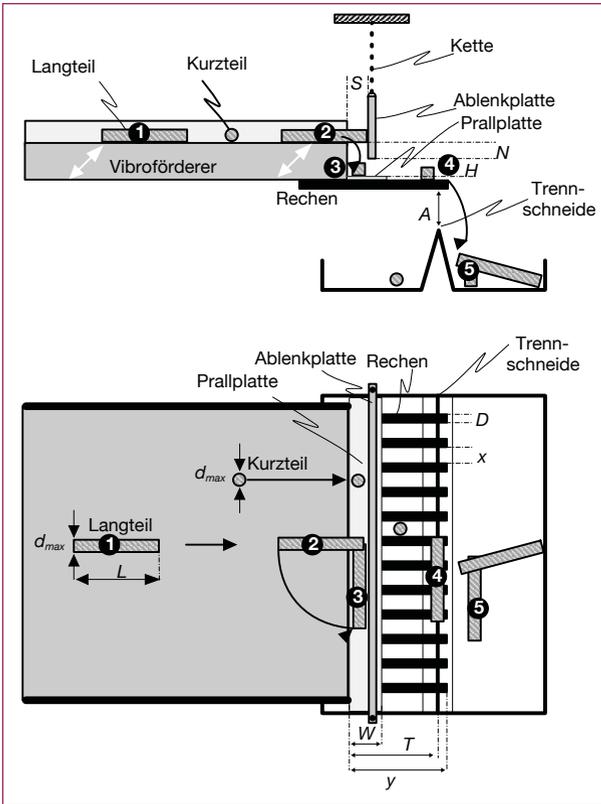


Bild 2:

Funktionsprinzip des Langteilabscheiders *Querulator*

### 1.3. Grundlagen/Theorie

Das Ergebnis der Langteilseparation auf dem Querulator hängt wesentlich vom Längenfaktor  $\lambda$  ab. Dieser ist eine dimensionslose Kenngröße zur Beurteilung der Abscheidbarkeit von Langteilen auf einem Rechen mit vorgegebener Spaltweite  $x$  und Zinkenbreite  $D$ . Er ist das Verhältnis von Langteillänge zur doppelten Spaltweite plus der doppelten Breite der Rechenzinken (Gleichung 1). Oberhalb  $\lambda=0.5$  ist eine Abtrennung von Langteilen grundsätzlich möglich.

Mit zunehmendem  $\lambda$  nimmt auch die Abscheideleistung des Langteilabscheiders zu. Setzt man rechtwinklig zum Rechen ausgerichtete Langteile voraus, sollte jedes Langteil mit  $\lambda \geq 1$  abgeschieden werden. Der Grund hierfür ist, dass das Langteil auch bei einer Verschiebung quer zur Transportrichtung jederzeit durch mindestens zwei Rechenzinken unterstützt wird.

$$\lambda = \frac{L}{2 \cdot (x+D)} \quad (1)$$

Theoretisch zu erwarten wäre eine vollständige Abtrennung aller Teile mit  $\lambda > 1$  und keine Abtrennung von Teilen mit  $\lambda < 0.5$ . Das Bild 3 veranschaulicht den Längenfaktor  $\lambda$  grafisch. Ist die Länge  $L$  eines Langteils gleich der Summe von doppelter Spaltweite  $x$  und doppelter Rechenzinkendicke  $D$ , dann ist  $\lambda = 1$ .

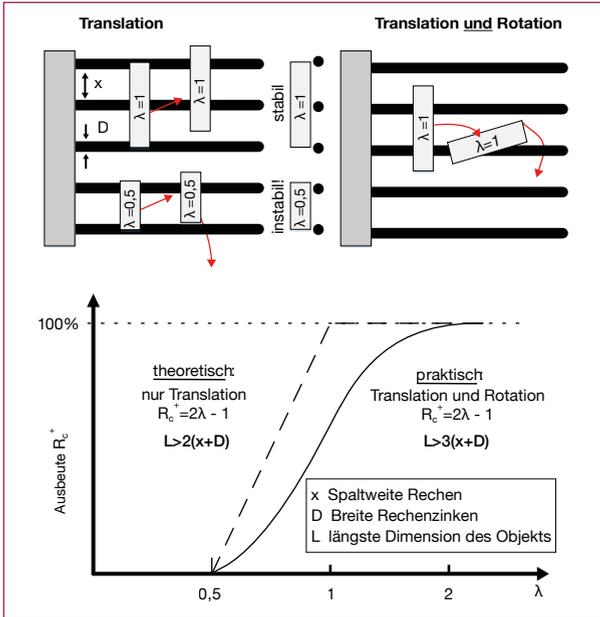


Bild 3:

Zu erwartendes Ausbringen unterschiedlich langer Partikel. Durch Drehung können auch Langteile  $L=2(x+D)$  durch den Rechen schlüpfen.

Als *abscheidbare Langteile* bezeichnen wir solche mit  $\lambda > 1$ , also  $L > 2(x+D)$ . Sofern die Langteile  $90^\circ$  quer zum Rechen ausgerichtet sind, sollte man eine völlige Abscheidung aller abscheidbaren Langteile auf dem Querulator erwarten. In der Praxis kommt es jedoch vor, dass die Langteile erstens nicht vollständig gestreckt (sondern verbogen) sind und, dass sie sich zweitens auf dem Rechen in Förderrichtung drehen können (wenn z.B. ihr Schwerpunkt nicht mittig liegt). Um diese Effekte zu berücksichtigen ist für eine gute Abscheidung in der Praxis der Längenfaktor  $\lambda > 1.5$  erforderlich. Aus Gleichung 1 ergibt sich daher als Bedingung für eine weitestgehende Abscheidung der Langteile:

$$L = 3(x+D) \quad (2)$$

Wichtig ist, dass das auf dem Querulator zu verarbeitende Material eine definierte obere Korngröße  $d_{\max}$  hat, und dass diese kleiner ist als die Spaltweite  $x$  zwischen den Zinken des Rechens, damit die Kurzteile durch den Rechen hindurchfallen können.

## 2. Ergebnisse

### 2.1. Technikumsversuche

Für unsere Versuche im Technikum wurde ein Prototyp auf der Basis einer handelsüblichen linearschwingenden Vibro-Förderrinne konstruiert (Bild 4).

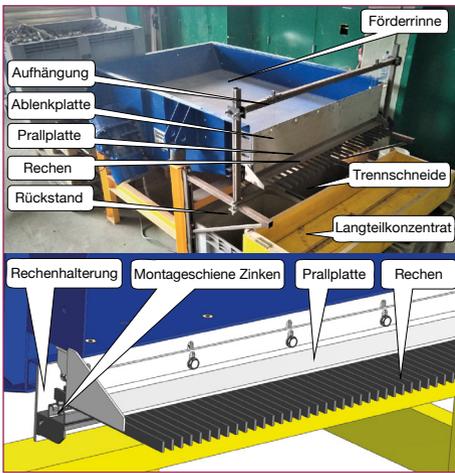


Bild 4: Förderrinne (blau) und Nachrüstsatz (grau).

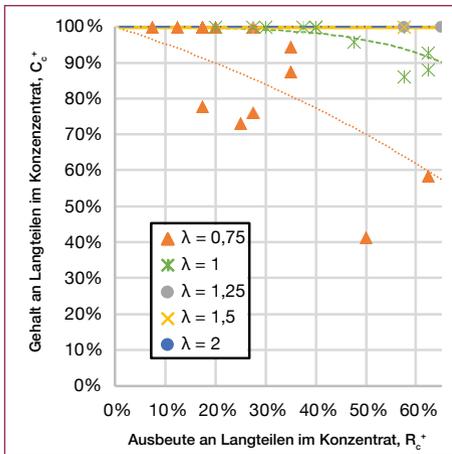


Bild 5: Fünf *künstliche* Mischungen aus 80 % Kies (Kurzteile) und 20 % Stahlbolzen (Langteile) wurden auf dem Querulator verarbeitet. Die Langteile hatten Längenfaktoren  $\lambda=0,75-2$ . Bei  $\lambda=1,5$ , also  $\lambda > 3(x+D)$ , wurde eine nahezu *perfekte* Abscheidung erzielt.

Zur Quantifizierung der Trenneffizienz dient die Trennerfolgskurve. Diese beschreibt wie hoch die Konzentratqualität  $C_c^+$  bei welchem Zielstoffmassenausbringen  $R_c^+$  ist. Die Konzentratqualität  $C_c^+$  ist der Anteil an *abscheidbaren Langteilen* mit  $\lambda > 1$ , also  $\lambda > 2(x+D)$ , im Konzentrat (*Gehalt*). Das Zielstoffmassenausbringen  $R_c^+$  ist der Anteil an Langteilen im Aufgabematerial, der tatsächlich im Konzentrat abgeschieden wurde (*Ausbeute*). Durch Verstellen der Trennschneide (Bild 2) ändern sich sowohl der Gehalt  $C_c^+$  als auch die Ausbeute  $R_c^+$ . Wird beim Langteilabscheider die Trennschneide in Richtung Förderrinne verstellt, werden mehr Langteile aus der Aufgabe in das Konzentrat befördert, also steigt die Ausbeute  $R_c^+$ .

Zugleich werden aber auch mehr kompakte Partikel im Langteilkonzentrat fehlausgetragen, also sinkt der Gehalt  $C_c^+$ . Um eine Trennerfolgskurve zu erstellen, werden Ausbeute  $R_c^+$  und Gehalt  $C_c^+$  nach Verschiebungen der Trennschneidepositionen bestimmt.

## 2.2. Umsetzung in den industriellen Betrieb

Um einen hohen Gehalt an Langteilen im Langteilkonzentrat und gleichzeitig eine hohe Ausbeute zu erzielen, muss mehrstufig vorgegangen werden:

- Eine Möglichkeit besteht darin, dass der Langteilabscheider mit dem Ziel einer möglichst hohen Ausbeute betrieben wird. Typischerweise wird eine Ausbeute von mehr als 85 % angestrebt. Dies hat zur Folge, dass der Gehalt abscheidbarer Langteile im Langteilkonzentrat nur etwa 20 % beträgt (Bild 6 Mitte und Bild 7). Der Gehalt kann dann durch eine manuelle Nachsortierung so verbessert werden, dass ein handelsfähiges Konzentrat daraus gewonnen wird (Bild 6 rechts).
- Eine Alternative besteht darin die Langteilseparation mehrstufig auszuführen, z.B. in einer typischen *Scavenger*-Schaltung. Hierbei wird jede Stufe auf einen möglichst hohen Langteilgehalt im Konzentrat eingestellt und der Rückstand aus dieser Stufe erneut über einen Langteilabscheider verarbeitet. Mit jeder Stufe steigt dann sukzessiv die Ausbeute.



Bild 6: Links: Industrieller Einsatz: MVA-Rostaschenaufbereitung AFATEK Kopenhagen/DK. Mitte: Langteilkonzentrat. Rechts: Das Langteilkonzentrat nach einer manuellen Nachsortierung der Langteilmfraktion besteht weitestgehend aus Edelstahl.

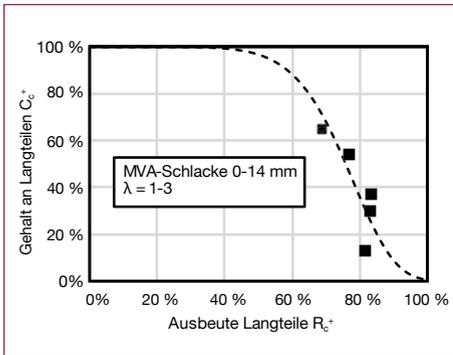


Bild 7: Trennerfolgskurve für *abscheidbare Langteile* ( $\lambda > 1$ ) aus MVA-Rostasche 0-14 mm bei einstufiger Aufbereitung.

### 2.3. Korrekte Dimensionierung

Von großer Bedeutung ist eine korrekte Dimensionierung des Querulators. Ausgangspunkt hierfür ist die maximale Korngröße des vorabgesiebten Materials  $d_{max}$ . Dies ist die Maschenweite des Siebes (respektive die Spaltweite des Stangensizers) auf dem die Vorabsiebung stattgefunden hat. Die Feineinstellung ist abhängig vom Material und von der konkreten Aufgabenstellung.

Die folgenden Angaben dienen als Orientierungshilfe. Sie beziehen sich auf die kursiv dargestellten Buchstaben in Bild 2.

$$x = 1,2 d_{max}$$

$$W = 2,5 d_{max}$$

$$T = 4-6 d_{max}$$

$$D = 0,15 d_{max}$$

$$H = 1,2 d_{max}$$

$$y = 7 d_{max}$$

$$S = 1,2 d_{max}$$

$$N = 1,2-2 d_{max}$$

$$A = 10 d_{max}$$

Beispiel: Die Dimensionierung des Querulators wird an folgendem Rechenbeispiel verdeutlicht. Angenommen, dass die Langteile aus einer vorabgesiebten Korngrößenfraktion 20-40 mm entfernt werden sollen. Damit ergibt sich die Spaltweite des Rechens zu  $x = 1,2 d_{max} = 48$  mm.

$$x = 48 \text{ mm}$$

$$W = 100 \text{ mm}$$

$$T = 160-240 \text{ mm}$$

$$D = 6 \text{ mm}$$

$$H = 48 \text{ mm}$$

$$y = 260 \text{ mm}$$

$$S = 48 \text{ mm}$$

$$N = 48-80 \text{ mm}$$

$$A = 400 \text{ mm}$$

Als *abscheidbar* gelten Langteile mit  $\lambda > 1$ . Bei diesen gilt gemäß Gleichung 1:  $L > 2(48 \text{ mm} + 6 \text{ mm}) = 108 \text{ mm}$ . Eine weitestgehende Abscheidung darf von Langteilen erwartet werden, bei denen  $\lambda > 1,5$ , also  $L > 3(48 \text{ mm} + 6 \text{ mm}) = 162 \text{ mm}$  (Gleichung 2).

*Zwecks grober Orientierung gilt folgende Faustregel für den Querulator: Zur praktisch vollständigen Abtrennung der Langteile aus einem Schüttgut müssen diese viermal länger sein als die maximale Korngröße:  $L > 4 d_{\text{max}}$ .*

### 3. Lehren aus der Praxis

Im industriellen Einsatz hat sich der Querulator grundsätzlich bewährt. Überraschend robust verhält sich das Gerät bei hohem Durchsatz. Idealerweise würde das Gerät mit einer Einzelkornschicht beaufschlagt. Allerdings hat sich gezeigt, dass auch bei einer Belegung der Fördereinrichtung mit einem mehrere Lagen hohen Materialbett keine wesentlichen Probleme bereitet. Wichtig ist in diesem Fall, dass die Ablenkplatte erstens schwer genug ist, um Widerstand gegen den anlaufenden Materialstrom zu bieten. Zweitens muss sie an genügend langen Ketten aufgehängt sein, sodass sie ausweichen kann und damit ein Materialstau im Schlitz S verhindert wird.

Allerdings wurden einige Probleme beobachtet, welche jedoch auf recht einfache Weise gelöst wurden, wie nachfolgend beschrieben.

#### 3.1. Klemmkorn im Rechen

Als problematisch hat sich Klemmkorn im Rechen erwiesen. Da auf dem Querulator nur vorabgesiebt Material verarbeitet werden kann, sollte Klemmkorn eigentlich gar nicht vorkommen. Insbesondere dann, wenn die Spaltweite  $x$  des Rechens etwa 20 % größer ist, als die Maschenweite der Vorabsiebung, sollten auch die größten Partikel (mit  $d_{\text{max}}$ ) problemlos durch die Zinken des Rechens schlüpfen.

In der Praxis hat es sich jedoch gezeigt, dass dies nicht immer der Fall ist, insbesondere bei *exotischen* Kornformen. Klemmkorn im Rechen kann sich sehr negativ auf den Trennerfolg auswirken, da die auf dem Rechen quer zur Förderrichtung ausgerichteten Langteile am Klemmkorn anstoßen, sich dann drehen und somit längs zwischen die Rechenzinken ins Feingut herabfallen können (siehe auch Bild 3 links).

Zur Vermeidung des Problems gibt es mehrere Ansätze.

- Aufhängung der Rechenzinken in Gummihülsen, sodass sie frei schwingen können. Durch diese Maßnahme kann Klemmkorn z.B. auf Stangensizern verhindert werden. Bei unseren bisher eingesetzten Geräten handelt es sich allerdings um provisorische Nachrüstungen von konventionellen Förderrinnen ohne eine schwingungstechnische Auslegung und Optimierung. Die Rechenzinken waren daher bei unseren Versuchen *starr* montiert.

- Verwendung von flexiblen Flacheisenzinken aus Federstahl, die dünn sind, aber hoch (vergleichbar mit Sägeblättern). Diese geben Stabilität in der Vertikalen, können aber in der Horizontalen frei schwingen und dadurch die Bildung von Klemmkorn verhindern. Eine Variante wäre die Verwendung von abwechselnd frei schwingenden Flacheisenzinken und solchen aus starren (oder gummigelagerten) Rundstäben wie in Bild 8 links skizziert.
- Installation eines Rechenräumers wie in Bild 8 dargestellt. Mit diesem Räumern können auch Textilfetzen und Kabel, die über einzelnen Rechenzinken hängen, entfernt werden.

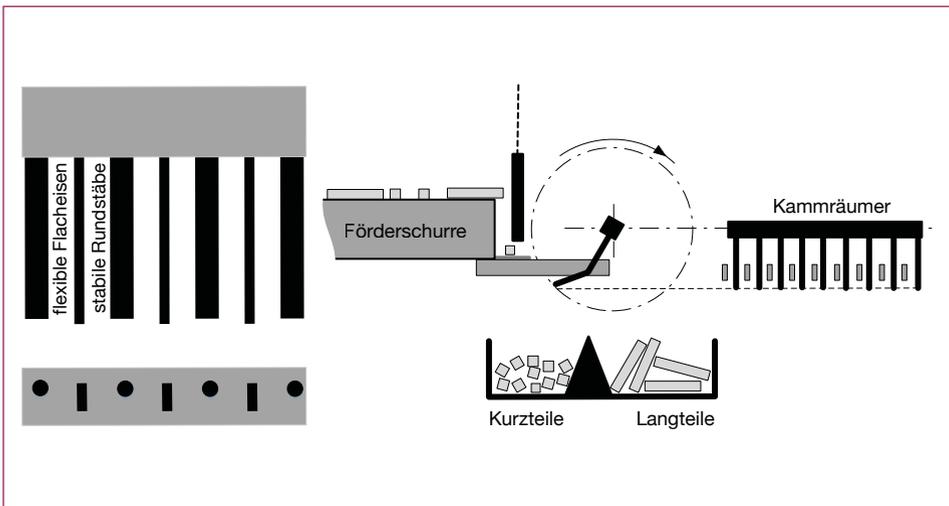


Bild 8: Links: Rechen mit abwechselnd flexiblen, frei schwingenden Flacheisen und starren Rundstäben. Rechts: Querulatur mit Kammrümer zur Entfernung von Klemmkorn. Der Kamm greift zwischen die Rechenzinken und hebt das Klemmkorn aus.

### 3.2. Notwendigkeit einer *Prallplatte*

Bei eher kurzen Langteilen ( $\lambda < 1,5$ ) wurde beobachtet, dass diese insbesondere bei hohem Durchsatz längs in den Schlitz  $S$  kippen können und dann durch die Rechenzinken hindurchfallen. Daher ist die Installation einer *Prallplatte* erforderlich (Bild 1). Auf diese Weise werden auch *kopfüber* in den Schlitz eintauchende Langteile zwangsweise quer zur Förderrichtung ausgerichtet. Die Prallplatte sollte so dimensioniert sein, dass  $W$  einige Zentimeter größer ist als die Schlitzbreite  $S$  plus die Dicke der Ablenkplatte.

Bei der Verarbeitung von feuchtem Material baut sich gelegentlich eine Feinkornschicht auf der Prallplatte auf. Diese muss unbedingt entfernt werden. Als geeignet hierzu hat sich eine Prallplatte aus Polyurethan erwiesen, wie im Verschleißschutz eingesetzt. Dieser Kunststofflappen liegt lose über den Zinken und wird durch die Vibration der Vorrichtung gereinigt (*Fluttergummi*).

### 3.3. Trennscheide zu hoch eingestellt

Gelegentlich wurde beobachtet, dass der vertikale Abstand A zwischen Rechen und Trennscheide so gering war, dass flexible Störstoffe, wie nasse Textillumpen, die über einzelne Zinken hingen, an der Trennscheide anstießen und sich auf dem Rechen aufstauten (Bild 9 links).

Dieser Effekt ist besonders ausgeprägt, wenn die Rechenzinken durch fortgeschrittenen Verschleiß bereits abgenutzt sind und eine raue Oberfläche aufweisen. Abhilfe schafft ein größerer Abstand A, oder, falls dies nicht möglich ist, ein Kammräumer wie in Bild 8 (rechts) dargestellt.

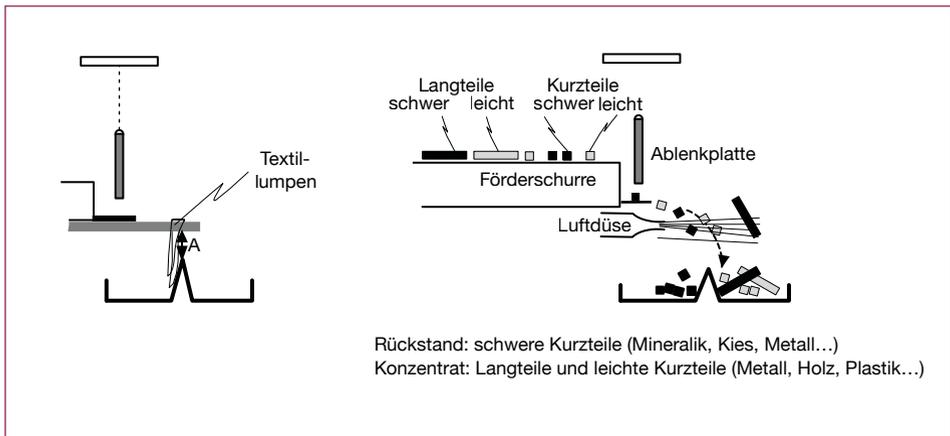


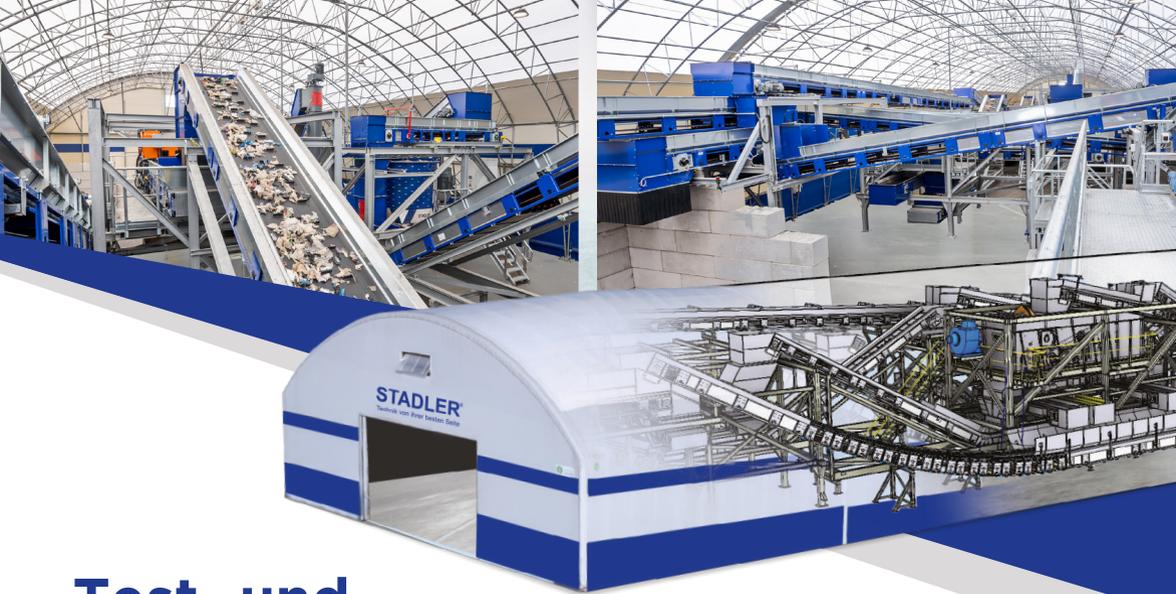
Bild 9: Links: Die Trennscheide ist so hoch eingestellt, dass über die Rechenzinken hängende, flexible Störstoffe daran anstoßen und sich auf dem Rechen aufstauen. Rechts: Mittels integriertem Windsichter können auch spezifisch leichte Kurzteile ins Langteilkonzentrat überführt werden.

### 3.4. Integration eines Windsichters

Insbesondere bei der Aufbereitung von mineralischen Bauabfällen ist es häufig erwünscht, dass nicht nur störende Langteile, sondern auch spezifisch leichte Kurzteile aus der Mineralikfraktion entfernt werden, z.B. kleinere Holzstücke, Plastikketzen und dergleichen. Durch Installation einer Luftdüse unter dem Rechen ist auch dies möglich (Bild 9 rechts). Allerdings sollte, wie bei allen Windsichtern, das Material eng korngroßenklassiert sein (z.B. 4-8 mm; 8-16 mm; 16-32 mm usw.), da ansonsten feinkörnige, spezifisch schwere Kurzteile, ins Störstoffkonzentrat geblasen werden.

## 4. Einsatzbereiche

Der Querulator hat ein breites Anwendungsspektrum sowohl in der Wertstoffgewinnung als auch in der Störstoffentfernung.



# Test- und Entwicklungszentrum auf dem neusten Stand der Technik: Bewertung und Optimierung Ihres Sortierprozesses.

Stellen Sie sicher, dass Ihre Anlage die gewünschten Ergebnisse liefert: führen Sie selbst Tests an den einzelnen Maschinen durch, oder simulieren Sie Ihren gesamten geplanten Sortierprozess mit Hilfe von Bypass-Konstruktionen im STADLER Testzentrum.

Im Hinblick auf Nachhaltigkeit und die zukunftsorientierte Technik ist das STADLER Test- und Entwicklungszentrum eine perfekte Möglichkeit für Innovationen der Forschungsprojekte, die zu einer sauberen Welt beitragen.

Möchten Sie Ihren Sortierprozess optimieren?  
**Dann kontaktieren sie uns!**

**STADLER Anlagenbau GmbH**

+49 7584 9226-0  
info@w-stadler.de  
www.w-stadler.de

**STADLER®**  
Technik von ihrer besten Seite

# SPALECK®

FORWARD THINKING. SINCE 1869.



**100%**  
KONSTANTE  
MATERIALZUFUHR



**NEU**

## ActiveFEED

## AUFGABEBUNKER

**JETZT  
ANSCHAUEN**

FÜR EINE GEWINNBRINGENDE AUSLASTUNG UND  
BESCHICKUNG VON RECYCLINGLINIEN



[www.spaleck.de](http://www.spaleck.de)



## 4.1. Wertstoffgewinnung: Fokus Edelmstähle und Kupfer

Die Wertstoffgewinnung steht dort im Vordergrund, wo längliche Metallstücke in Form eines handelsfähigen Konzentrates gewonnen werden sollen. In der Regel sind dies Edelmstähle, die sich weder durch Magnetscheider noch durch Wirbelstromscheider abtrennen lassen. Im Allgemeinen erfolgt die Edelmstahlabscheidung mittels Sensorsortierern. Allerdings sind diese Geräte sehr teuer, sowohl punkto Investition als auch Betriebskosten. Außerdem ist es auf Sensorsortierern sehr schwierig längliche Teile, insbesondere dünne verbogene Drähte (und auch Stahlfedern), sauber abzutrennen.

Eine ähnliche Problematik betrifft die Abtrennung von Kupferdrähten auf Wirbelstromscheidern. Da Kupfer ein guter elektrischer Leiter ist, wird dieses Metall im Allgemeinen recht gut auf Wirbelstromscheidern ausgeworfen. Allerdings können sich in langen Kupferdrähten kaum Wirbelströme ausbilden, sodass solche Drähte häufig nicht ausgeworfen werden, sondern in den Rückstand der Wirbelstromsortierung geraten.

Da es sowohl mit Sensorsortierern als auch mit Wirbelstromscheidern große Schwierigkeiten bereitet lange verbogene Drähte auszusortieren, sehen wir eine sehr interessante Möglichkeit in der Kombination dieser Geräte mit einem Querulator. Der Langteilabscheider würde in diesem Fall als *Polizeifilter* eingesetzt, also nach dem Sensorsortierer und/oder dem Wirbelstromscheider (Bild 10). Angesichts der im Vergleich zu Wirbelstromscheidern und Sensorsortierern marginalen Kosten für einen Langteilabscheider hat dieses Einsatzgebiet ein erhebliches kommerzielles Potenzial.

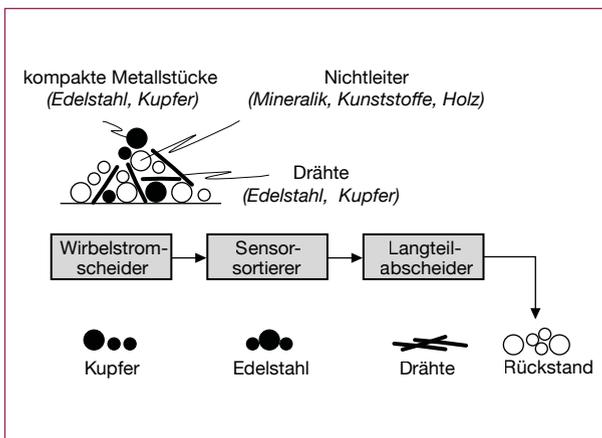


Bild 10:

Einsatz des Querulators als *Polizeifilter* nach einer konventionellen Aufbereitung.

## 4.2. Störstoffentfernung

Besonders viele Anwendungen für unseren Langteilabscheider sehen wir in der Störstoffentfernung. Obwohl auch Anwendungen z.B. in der Lebensmittelaufbereitung in Frage kommen, beschränken wir uns bei den weiteren Ausführungen auf den Einsatz im Recycling.

### 4.2.1. Schutz von Maschinen

Langteile können Maschinen verstopfen oder beschädigen. Dies bezieht sich vor allem auf die Maschen von linearschwingende Siebdecks, welche beispielsweise durch Drähte verstopft werden können. Die Reinigung dieser Decks ist besonders aufwändig, wenn es sich um die unteren Decks von Mehrdecksieben handelt (schwierige Zugänglichkeit).

Ein weiteres Beispiel sind Setzmaschinen, deren Siebböden typischerweise eine Maschenweite von wenigen Millimetern haben. In diesen feinen Maschen können sich Drähte festsetzen und die Maschen verstopfen.

Lange unmagnetische Metallteile schlüpfen durch die Magnetscheidung hindurch und können Maschinen beschädigen. Ein Beispiel sind abgebrochene Bohrgestänge im Steinbruch oder beim Tunnelvortrieb. Diese Langteile können sich z.B. an den Übergabestellen von Förderbändern querstellen, dort zu Materialstaus führen, und im schlimmsten Fall sogar die Fördergurte aufschlitzen.

### 4.2.2. Aufbereitung von Bauschutt: Fokus Mischabbruch (*Baumischabfall schwer*)

Besonders großes Potenzial für den Querulator besteht in der Bauschutttaufbereitung. Vor allem im Mischabbruch finden sich häufig noch erhebliche Anteile an länglichen Stücken aus Holzsplittern, Kunststoffen (z.B. Kabelrohre) und Metallen (Drähte), die in Bezug auf die aus der Aufbereitung resultierenden Recyclingbaustoffe, Störstoffe darstellen. Dies bezieht sich auch auf flache Stücke, wie z.B. Kunststoffteile, die ebenfalls auf dem Langteilabscheider abtrennbar sind.

Problematisch ist in der Bauschutttaufbereitung der konventionelle verfahrenstechnische Ansatz, bei dem versucht wird die Langteile möglichst in die Grobgutfraktion zu überführen, um sie dort anschließend manuell herauszulesen. Diesem Ansatz folgend, kommen in den Bauschutttaufbereitungsanlagen vor allem Siebe zum Einsatz anstatt Stangensizer, obwohl Stangensizer für die Klassierung von sehr heterogenen und teilweise feuchten Materialgemischen wesentlich besser geeignet wären, da sie verstopfungsfrei arbeiten. Dem Einsatz von Stangensizern wird entgegengehalten, dass lange und flache Stücke ins Feingut gelangen und nicht ins Grobgut. Bei Einsatz eines Querulators zur Nachsortierung des Feingutes kehrt sich dieser Nachteil jedoch in einen Vorteil um. Bei gleicher Länge  $L$  der Langteile ist ihr Längenfaktor  $\lambda$  gemäß Gleichung 1 in der Feingutfraktion wesentlich höher als in der Grobgutfraktion, denn  $d_{\max}$  ist kleiner (und damit auch  $x$ ). Daher lassen sich die Langteile wesentlich leichter aus der Feinkornfraktion entfernen als aus der Grobkornfraktion. Folglich ist die Kombination von Stangensizer und einem feinkornseitig nachgeschalteten Langteilabscheider wesentlich robuster und ergiebiger als ein konventionelles Sieb mit anschließender manueller Störstoffentfernung aus der Grobgutfraktion.

## 5. Ausblick

Die Entwicklung des Querulators ist abgeschlossen und die kommerzielle Einführung steht unmittelbar bevor. Wir sehen zwei Gruppen von möglichen Kunden, Betreiber und Anlagenbauer. Praktisch alle Recyclingbetriebe setzen ohnehin Schwingförderinnen ein und können diese durch eigenes Personal auf einfache Weise nachrüsten.

Eine zweite Kundengruppe sind Hersteller von Aufbereitungsmaschinen, insbesondere solche, die in der Schwingfördertechnik tätig sind. Für diese Unternehmen könnte es interessant sein nicht nur konventionelle Förderrinnen nachzurüsten, sondern auch eigene Weiterentwicklungen voranzutreiben. Dies gilt vor allem für eine mehrstufige Trennung, bei der bis zu drei Querulatorstufen auf einem einzigen Schwingrahmen installiert sind. Die Hersteller von Sensorsortierern und Wirbelstromscheidern könnten ihre Maschinen mit einem Querulator als *Polizeifilter* entsprechend Bild 10 ausrüsten.

Das UMTEC hat den Querulator patentiert und die Nutzungsrechte exklusive an den Projektpartner UTech lizenziert. Die UTech wiederum vergibt Sublizenzen an interessierte Betreiber und Anlagenbauer.

### Ansprechpartner



**Professor Dr. Rainer Bunge**  
Ostschweizer Fachhochschule  
Abt.: UMTEC  
Oberseestrasse 10  
8640 Rapperswil, Schweiz  
+41 76 578805 7  
rainer.bunge@ost.ch

## Technical and Logistic Concepts for Recycling of Plasterboard

Jörg-Michael Bunzel and Patrick Farago

As a result of the Act to Reduce and End Coal-fired Power Generation (2020) in Germany, the production and availability of flue-gas desulfurization (FGD) gypsum will decline and be completely eliminated in the next few years. The FGD-gypsum represents 50 % of the total gypsum raw material used for gypsum products in Germany. Since 2014, there has been one plant in Germany that produces recycled (RC) gypsum out of gypsum-contained waste, however its capacity is not fully utilized. The gypsum-contained waste derived from deconstruction and renovation, mainly as plasterboards which are processed by the plant into RC gypsum. Therefore, choosing the right location and technology for processing is inevitable. The parameters are quantities of gypsum-contained waste, their distance to the plant but also the distance for its reuse. The right processing technic for gypsum-contained waste includes a set of separation, classification and crushing technologies in order to meet the technical product requirements.

## Technische und logistische Konzepte zum Recycling von Gipskartonplatten

Jörg-Michael Bunzel und Patrick Farago

1.	Recycling von Gipskartonplattenabfällen in Deutschland .....	63
2.	Wo kommt der Gipskartonplattenabfall her?.....	65
3.	Wo mache ich das? – Standortfrage .....	66
4.	Wie mache ich das? – Technologiefrage.....	67
5.	Wie muss RC-Gips aussehen? .....	70
6.	Quellen.....	72

### 1. Recycling von Gipskartonplattenabfällen in Deutschland

Mit gesetzlicher Festlegung des Ausstieges der Energieerzeugung aus fossilen Brennstoffen, wie Braun- oder Steinkohle, entfällt zukünftig die Nutzung des dabei anfallenden Rauchgasentschwefelungsgipses (REA-Gips) als Rohstoff für die deutsche Gipsindustrie. Darüber hinaus wird die Nutzung einheimischer, natürlicher Gipsvorkommen aus ressourcenschonenden sowie naturschutzrechtlichen Gründen zunehmend schwieriger.

Seit 2014 existiert in Deutschland eine weitere Möglichkeit der alternativen Rohstoffversorgung und zwar mit Recyclinggips (RC-Gips). RC-Gips fällt beim Recycling von gipshaltigen Abfällen, welcher derzeit noch überwiegend aus Gipskartonplattenabfällen besteht, an.

Mit den Aufbereitungsanlagen in Großpösna bei Leipzig (MUEG), in Zweibrücken (REMONDIS), in Pulheim (New West Gypsum Germany GmbH) und in Ennigerloh (Tadick Urban Mining GmbH) existieren mittlerweile vier derartige Recyclinganlagen in Deutschland.

Um den Gips aus den Gipskartonplattenabfällen zurückzugewinnen, stehen den jeweiligen Anwendern eine Reihe von unterschiedlichen Recyclingtechnologien/-techniken sowie Herangehensweisen zur Verfügung. Im Rahmen dieses Fachbeitrages können jedoch nicht alle möglichen Recyclingvarianten dargestellt werden. Diesbezüglich wird eine Auswahl von technischen Herangehensweisen dargestellt, welche den Autoren als geeignet erscheinen.

Ungeachtet dessen, dass es seit 2014 in Deutschland die Möglichkeit gibt, Gipskartonplattenabfälle zu recyceln, steckt dieses Projekt in Deutschland noch in den Kinderschuhen.

## Warum?

Zum größten Teil erfolgt die Entsorgung gipshaltiger Abfälle in Deutschland weiterhin nicht nach den Vorgaben der fünfstufigen Abfallhierarchie des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG). Nach wie vor ist es gängige Praxis recycelfähige, gipshaltige Abfälle auf Deponien und in anderen Verfüllungsprojekten zu verbringen. Als bekanntestes Verfüllungsprojekt ist hier die sogenannte Sanierungsmaßnahme in Mydlovary (CZE) zu nennen. Diese Entsorgungspraktiken haben dafür gesorgt, dass auch fast 9 Jahre nach der Inbetriebnahme der ersten Gipsrecyclinganlage in Deutschland die oben erwähnten Aufbereitungsanlagen immer noch lange nicht ausgelastet sind. Im Gegenteil, die Aufbereitungsanlagen verfügen noch über sehr große Kapazitätsreserven, welche am Beispiel der MUEG Gipsrecyclinganlage Großpösna etwa 50 % der genehmigten Verarbeitungskapazität beträgt.

Darüber hinaus führen diese Entsorgungspraktiken dazu, dass eine Getrennthaltung von recycelfähigen Gipskartonplattenabfällen, wie es in der gültigen Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV) § 8 Getrennte Sammlung, Vorbereitung zur Wiederverwendung und Recycling von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen, Absatz 1, Punkt 7 vorgeschrieben ist, nicht umfassend erfolgt.

Aus diesem Grunde ist es auch sehr schwierig, derzeitige belastbare Zahlen zum tatsächlichen Anfall von recycelfähigen Gipskartonplattenabfällen in Deutschland zu nennen.

Um jedoch ein Bild vom aktuellen Mengenverhältnis zu geben, werden exemplarisch bekannte, diesbezügliche Angaben aus dem Jahr 2020 herangezogen.

Im Jahr 2020 wurden 237 Millionen m<sup>2</sup> Gipskartonplatten in Deutschland produziert [4]. Im Rahmen der Studie des Umweltbundesamtes (UBA) aus dem Jahr 2017 wurde eine Menge von 360 Tt/a recycelbarer Gipskartonplatten (Szenario 3) für das Jahr 2020 prognostiziert [5]. Demgegenüber sind im Jahr 2020 lediglich 63 Tt RC-Gips produziert worden [2]. Angesichts der prognostizierten Anfallmengen ist die Menge an produziertem RC-Gips sehr gering und spiegelt somit auch die Menge an Gipskartonplattenabfällen wider, welche den Weg in den Recyclingprozess gefunden hat.

Generell kann gesagt werden, dass gipshaltige Abfälle, wie Gipskartonplattenabfälle, in der Entsorgungsbranche zum größten Teil noch sehr *stiefmütterlich* behandelt werden.

Aussagen wie:

- *der Mengenstrom ist zu gering,*
- *der Aufwand für die Getrennthaltung ist hoch,*
- *es dürfen ja keine Störstoffe drin sein,*
- *kein Platz mehr für eine getrennte Sammlung oder Lagerung,*
- *die Transport- und Entsorgungskosten sind zu hoch oder*
- *da fahre ich es lieber gleich auf die Deponie*

stehen auf der Tagesordnung.

Um diesbezügliche Kunden zu gewinnen, bedarf es einer intensiven Überzeugungsarbeit, dass sich auch der zusätzliche Aufwand lohnen kann.

## 2. Wo kommt der Gipskartonplattenabfall her?

Generell fallen Gipskartonplatten dort an wo sie nicht mehr gebraucht werden. Das ist in erster Linie aus dem Rückbau und der Sanierung von Gebäudebeständen. Aber auch bei der Herstellung und Verarbeitung neuer Gipskartonplatten, also bei Bau neuer Gebäude, fallen entsprechende recycelfähige Gipsabfälle an.

Natürlich macht der Anteil, welcher aus dem Rückbau und der Sanierung von Gebäudebeständen kommt, den Großteil der angedienten Gipskartonplattenabfälle in Großpönsa aus (etwa 80 % bis 90 %). Jedoch stellen die Mengen mit etwa 10 % bis 15 % aus dem Neubau von Gebäuden einen nicht zu unterschätzenden und meist störstofffreien Anteil dar.

Nachvollziehbar ist es auch, dass ein Großteil der Gipskartonplattenabfälle aus Ballungszentren mit großen Gebäudebeständen stammt. Hierbei ist nicht nur der Gebäudebestand an Wohnraum ausschlaggebend, vielmehr ist ein erhöhtes Aufkommen in großen Gewerbe- oder Industriezentren mit großen Bürokomplexen usw. zu verzeichnen. Hintergrund scheint hierfür eine kürzere Nutzungszeit bei gewerblicher Nutzung zu sein, welche meist die Lebensdauer einer Gipskartonplatte deutlich unterschreitet. In ländlichen Gegenden in das Aufkommen von Gipskartonplattenabfällen eher als gering einzuschätzen.

Darüber hinaus stellt sich die Frage: Von wem bekommt man die Gipskartonplattenabfälle? Das Kundenspektrum umfasst Unternehmen aus verschiedensten Sparten wie:

- Abbruchunternehmen,
- Entsorgungsunternehmen,
- Containerdienste,
- Abfallzweckverbände,
- Recyclingunternehmen,
- Bauwirtschaft,
- Gipsindustrie,
- Wertstoffhöfe,
- Makler.

Hierbei gibt es die unterschiedlichsten Ansätze einer entsprechenden Zusammenarbeit.

Sofern es sich um große Bauvorhaben handelt, ist eine direkte Zusammenarbeit mit einer Abbruch- oder Bauunternehmung von Vorteil und für alle Parteien wirtschaftlich am sinnvollsten. In den meisten Fällen ist jedoch die Einbeziehung eines örtlichen Entsorgungsunternehmens bzw. Containerdienstes erforderlich.

In der Regel erfolgt die Andienung des überwiegenden Anteiles von Gipskartonplattenabfällen jedoch nicht direkt von Baustellen, sondern über Entsorgungsunternehmen, welche entsprechende Getrenntlagermöglichkeiten eingerichtet haben.

Von hier aus erfolgt dann die Andienung oder auch die Abholung, wenn entsprechende Mengen für eine Transporteinheit vorhanden sind.

Des Weiteren werden Gipskartonplattenabfälle auch direkt mittels Containerdiensten angeeignet. Dieses ist jedoch sehr lokal begrenzt, da längere Transportentfernungen in Verbindung mit geringen Transportmengen schnell zu sehr hohen Transportaufwendungen führen.

Eine Anlieferung seitens des Gipskartonplatten verarbeitenden Gewerbes, wie Trockenbauer, ist ebenfalls sehr lokal begrenzt und als vernachlässigbar einzuschätzen. Aus Sicht der Autoren wäre zukünftig hier ein Rücknahmesystem zielführend. Hier könnte man gemeinsam mit den Herstellern von Gipskartonplatten ein Rücknahmesystem bei Großhandelsunternehmen oder Baumärkten einführen. Somit würde bereits beim Kauf von Gipskartonplatten geregelt sein, wo die entsprechenden Verschnittreste zurückgenommen werden, um dann einer Gipsrecyclinganlage zugeführt zu werden. Hierbei ist es jedoch zu klären, wer die entsprechenden Entsorgungskosten übernimmt. Ein Vorschlag wäre, den Entsorgungspreis bereits im Verkaufspreis der Gipskartonplatten zu integrieren.

Das Einrichten sogenannter Sammelstellen für Gipskartonplattenabfälle in Ballungszentren stellt derzeit ein probates Mittel für eine effektive Mengenbündelung dar. Das Prinzip der Einrichtung solcher Sammelstellen wurde durch die Berliner Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz, mit Unterstützung durch die MUEG, erarbeitet und seitdem erfolgreich praktiziert. In unterschiedlichen Berliner Stadtbezirken sind fünf Sammelstellen für Gipskartonplattenabfälle eingerichtet worden. Diese Sammelstellen werden von unterschiedlichen, ortansässigen Entsorgungsunternehmen betrieben. Die Entsorgungsunternehmen dienen in der Regel dem Betreiber der Gipsrecyclinganlage die gesammelten recycelfähigen Gipskartonplattenabfälle an. Es besteht weiterhin auch die Möglichkeit, dass durch den Betreiber der Gipsrecyclinganlage die recycelfähigen Gipskartonplattenabfälle abgeholt werden..

### 3. Wo mache ich das? – Standortfrage

Die Wahl des richtigen Standortes einer Gipsrecyclinganlage hängt von vielen Faktoren ab und kann letztendlich auch nur vom jeweiligen Recyclingunternehmen beantwortet werden.

Grundsätzlich ist bei der Standortfrage zu klären, ob der Standort der Gipsrecyclinganlage in der Nähe des Abfallanfalles oder in der Nähe des RC-Gipsverwerters von Vorteil ist. Darüber hinaus ist die Festlegung des Abfalleinzuggebietes von großer Bedeutung. In den letzten Jahren sind die Transportpreise extrem stark gestiegen und besitzen somit direkten Einfluss auf die Entsorgungskosten. Somit sollten zukünftig auch Überlegungen nach alternativen Transportmöglichkeiten wie Bahn eine immer größere Rolle spielen, da durch das Einrichten des An- und Abtransportes von Gipskartonplattenabfällen oder von RC-Gips mittels Schienenverkehr größere Mengen über größere Distanzen zu günstigeren Konditionen befördert werden können, als auf derzeitigem konventionellem Wege. Voraussetzung hierfür sind aber das Vorhandensein entsprechender Umschlaganlagen von Straßen auf Schiene und eine größere Flexibilität bei der Deutschen Bahn.

Wie in Bild 1 ersichtlich, befinden sich Gipsverarbeitungswerke leider nicht immer in der Nähe von Ballungszentren. Dies bedeutet entsprechende Kompromisse bei der Entscheidung einer geeigneten Betriebsstätte.



Bild 1:

Das für die Gipsrecyclinganlage in Großpösna ermittelte Einzugs-  
umfeld für die Anlieferung von  
Gipskartonplattenabfällen

Im Fall der Gipsaufbereitungsanlage Großpösna fiel die Entscheidung nach Abwägung mehrere Standortvor- bzw. -nachteile. So waren neben der Tatsache, dass dieser Standort eine zentrale Lage im mitteldeutschen Raum einnimmt, auch seine sehr gute Verkehrsanbindung ausschlaggebend. So verfügt dieser Standort neben kurzen Wegen zu den Autobahnen A9, A14, A38 und zukünftig zur A72 mit direktem Autobahnanschluss, auch einen direkten Anschluss an das Gleisnetz der Deutschen Bahn über ein werkseigenes Eisenbahnnetz.

Ein weiteres wichtiges Entscheidungskriterium war die Möglichkeit der Nutzung vorhandener Infrastrukturen einer ehemaligen Abfallbehandlungsanlage, welches auf die erforderlichen Investitionen sehr großen Einfluss hatte. Des Weiteren befinden sich im unmittelbaren sowie im erweiterten Umfeld der Gipsrecyclinganlage entsprechende Gipsverwerter, welche eine gewisse Flexibilität bei der Vermarktung des RC-Gipses ermöglichen.

All diese Faktoren waren ideal zur Festlegung des Abfalleinzugsgebietes mit Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen, Berlin und Brandenburg. Auch Teilbereiche der Bundesländer Bayern, Hessen und Niedersachsen lassen sich noch zu vertretbaren Transportkosten erreichen.

### 4. Wie mache ich das? – Technologiefrage

Das Recycling von Gipskartonplattenabfällen ist keine Erfindung aus Deutschland. Bereits vor 2014 existierten eine Reihe von Gipsrecyclinganlagen in anderen Ländern wie Kanada, Großbritannien, Irland, Frankreich oder Dänemark. Grundsätzlich wurden diese Aufbereitungsanlagen als stationäre Anlagen ausgelegt. Lediglich ein Verfahren aus Dänemark verfolgte das Ziel, mittels mobiler Aufbereitungstechnik die Gipskartonplattenabfälle aufzubereiten. Diese Art der mobilen Aufbereitungstechnik wird nach Kenntnisstand der Autoren jedoch heute nicht mehr praktiziert.

Generelles Ziel des Recyclings von Gipskartonplattenabfällen ist die Trennung des Gipskernes von der umgebenden Kartonage. Natürlich ist auch die Störstoffabtrennung

von großer Bedeutung. Die Abfälle aus dem Rückbau oder der Sanierung von Gebäuden sind in der Regel immer störstoffbelastet, so auch Gipskartonplattenabfälle. Diese Störstoffe sind zum überwiegenden Teil andere Baumaterialien wie Holz, Beton, Porenbeton, Fliesen, Keramik, Folien oder Ständerwände. Darüber hinaus werden aber auch andere *Fehlwürfe* wie Vorschlaghämmer, Metallstangen sowie andere nicht dem direkten Abriss zuzuordnende Stoffe angetroffen. Diese führen in den meisten Fällen zu großen Schäden an der Anlagentechnik.

Grundsätzlich beruhen alle den Autoren bekannten Gipsrecyclingprozesse auf klassischen, mechanischen Aufbereitungsverfahren. Diese Aufbereitungsverfahren sind in der Regel durch drei Hauptverfahrensschritte gekennzeichnet. Das Zerkleinern, das Klassieren und die metallische Abtrennung. Das Kernstück ist hierbei die Zerkleinerung. Diese kann entweder durch schnelllaufende Zerkleinerungsaggregate mit hohem Energieeintrag oder langsam laufende Zerkleinerungsaggregate mit niedrigem Energieeintrag oder eine Kombination aus beiden Technologien bzw. durch eine mehrstufige Zerkleinerung erreicht werden. Die Zerkleinerung von Gips ist aufbereitungstechnisch relativ einfach. Gips besitzt laut der Härteskala nach Mohs eine relative Härte von 2 und ist mit dem Fingernagel ritzbar. In Verbindung mit der Kartonage sowie Störstoffen ist die Zerkleinerung von Gipskartonplattenabfällen wesentlich komplexer. Mit dem Ziel der Gipsrückgewinnung sowie der Abtrennung von der Kartonage und Störstoffen muss die Auswahl des jeweiligen Zerkleinerungsverfahrens eng auf den gesamten Aufbereitungsprozess abgestimmt werden. Die Nutzung von schnelllaufenden Zerkleinerungsaggregaten setzt generell einen sehr sauberen bzw. störstofffreien Gipskartonplattenabfall voraus. Des Weiteren muss die nachfolgende Klassierungstechnik auf sehr feine Materialien abgestimmt werden. Im Gegensatz dazu sind langsam laufende Zerkleinerungsaggregate weniger störstoffanfällig und stellen größere Materialpartikel her, welche sich nach Meinung der Autoren besser in nachgeschalteten Klassierungsaggregaten trennen lassen. Dieses sogenannte schonende Verfahren stellt in mehreren nacheinander geschalteten Zerkleinerungsstufen sowie Klassierungsstufen gut trennbare Partikelgrößen her. Hierfür wird jedoch eine Reihe von Anlagentechnik benötigt, welche sich sowohl auf die Investitions- als auch auf die Betriebskosten negativ auswirken können.

Nachfolgend sind entsprechende mögliche Zerkleinerungsaggregate aufgelistet:

- Prallmühle,
- Hammermühle,
- Backenbrecher,
- Walzenmühle,
- Schraubenmühle.

Neben der Zerkleinerungstechnik ist die Auswahl der geeigneten Klassierungstechnik entscheidend für den Erfolg des Recyclings von Gipskartonplatten. Wie bereits erwähnt, ist die Auswahl der Klassierungstechnik in Abhängigkeit von der gewählten Zerkleinerungstechnik zu sehen.

So kommen grundsätzlich Sieb- und Sichterntechniken beim Recycling von Gipskartonplattenabfällen zum Einsatz. Da ähnlich wie bei der Zerkleinerung auch kein multifunktionelles Klassierungsaggregat existiert, sind hier mehrstufige Klassierungsschritte erforderlich. Jede Sieb- oder Sichterntechnik hat für ihren speziellen Anwendungsfall ihre Rechtfertigung. Es ist somit aus Sicht der Autoren immer nur zielführend, die verschiedenen Klassierungstechniken zu kombinieren.



Bild 2: Aufbereitungsbereich mit Zerkleinerungs- und Klassierungstechnik

Nachfolgend sind entsprechende mögliche Klassierungsaggregate aufgelistet:

Siebung:

- Linear-Schwing-Siebmaschinen,
- Kreis-Schwing-Siebmaschinen,
- Spannwellen-Siebmaschinen,
- Trommelsiebmaschinen,
- Rollenroste,

Sichtung:

- Fliehkraftsichtung,
- Schwerkraftsichtung,
- Plansichtung,
- Windsichtung.

Darüber hinaus kann jedoch generell gesagt werden, dass ausschlaggebend für eine optimale Aufbereitung grundsätzlich entscheidend ist, wie störstofffrei der Gipskartonplattenabfall (Bild 3) der Gipsrecyclinganlage angedient wird. Ungeachtet der gesetzlichen Forderung aus der Getrennthaltung von recycelfähigen Gipskartonplattenabfällen (GewAbfV § 8), zeigen die Erfahrungen aus den letzten Jahren des Anlagenbetriebes, dass man den entsprechenden Kundenkreis für eine Getrennthaltung von Gipskartonplattenabfällen wirtschaftlich motivieren kann.



Bild 3:

Recyclbarer Gipskartonplattenabfall mit geringem Störstoffanteil

## 5. Wie muss RC-Gips aussehen?

RC-Gips sollte nicht nur weiß aussehen, sondern auch die Anforderungen des Bundesverbandes der deutschen Gipsindustrie erfüllen, damit er in Gipswerken wieder zur Produktion neuer Gipsprodukte eingesetzt werden kann. Darüber hinaus gibt es noch weitere Einsatzmöglichkeiten in der Zementindustrie oder bei der Düngemittelherstellung. Hierbei sind dann die Anforderungen des jeweiligen Verwerterers (z.B. Düngemittelverordnung) zu beachten.

Der RC-Gips *casubase* wird jedoch hauptsächlich in der Gipsindustrie eingesetzt. Als Haupteinsatzgebiet ist hier die Gipskartonplatte bzw. Gipsfaserplatte zu nennen. Darüber hinaus wurde der RC-Gips aber auch schon bei der Produktion von Gipsestrichen oder Gipsputzen verwendet. In der Gipsrecyclinganlage Großpösna werden zwei RC-Gipsfraktionen hergestellt, welche sich je nach ihrem Verwendungszweck bzw. nach der jeweiligen Verarbeitungstechnologie in ihrer Korngröße unterscheiden. So wird eine Fraktion 0 bis 2 mm sowie 2 bis maximal 8 mm je nach Kundenwunsch produziert.

Neben der Einhaltung der Anforderungen des Bundesverbandes der deutschen Gipsindustrie im Hinblick auf die technischen und gesundheitlichen Parameter, ist die Gewährleistung der Asbestfreiheit von großer Bedeutung.

Bislang fehlt die Festlegung eines Asbestgrenzwertes in Verbindung mit einem Standardanalyseverfahren und einer gekoppelten Nachweisgrenze sowie der rechtssicheren Festlegung, dass bei Unterschreitung dieser Nachweisgrenze von *Asbestfreiheit* auszugehen ist.

Hintergrund ist, dass Asbest bis Oktober 1993 verwendet werden durfte und daher beim Rückbau von Gebäuden und der Separierung recyclingfähiger Gipsplatten eine Querkontamination selbst geringster Spuren von Asbest aus anderen Baustoffen nicht auszuschließen ist.

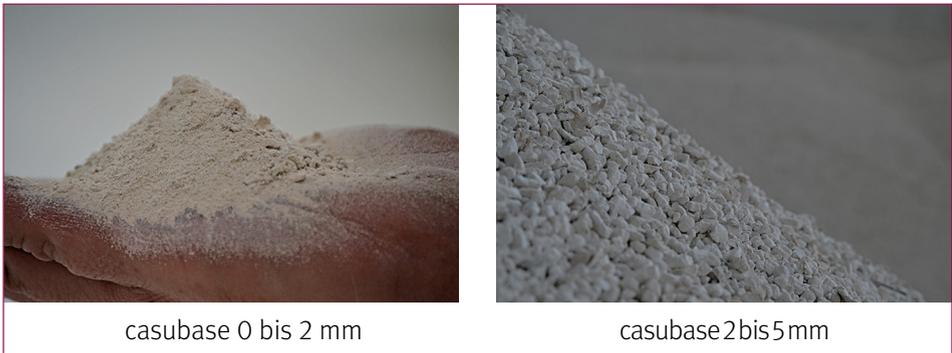


Bild 4: RC-Gips aus Großpönsna

Derzeitig empfiehlt der Bundesverband der Deutschen Gipsindustrie in der Anlage zu den Qualitätsempfehlungen von RC-Gips Stand Juni 2020 folgenden Umgang mit Gipskartonplattenabfällen aus dem Rückbau zum Ausschluss von Querkontaminationen mit Asbestfasern:

1. Gebäudealter > 1995 (Asbestverbot + 2 Jahre) = Anlieferungs-Material gilt grundsätzlich als asbestfrei.
2. Gebäudealter < 1995 (Asbestverbot + 2 Jahre) = Anlieferungs-Material gilt grundsätzlich als asbestfrei, nur sofern ein CE-Zeichen und/oder EN-Aufdruck auf Platte nachweisbar sind
3. Für die Fälle 1. und 2. gilt, dass der Betreiber einer RC-Anlage eine solche Verpflichtung vertraglich gegenüber dem Anlieferer der Gipsabfälle und dem abnehmenden Gipswerk eingeht und nachweist. Dennoch sind regelmäßige Kontrollanalysen des RC-Gipses seitens des RC-Anlagenbetreibers unabdingbar.
4. Eine Erhöhung der Prüffrequenz bei RC-Gips ist so vorzunehmen, dass Asbestfasern chargenweise (z.B. alle 1.000 t) anstelle 4 mal jährlich geprüft werden.
5. Liegen die Fälle 1. oder 2. nicht vor, ist die Asbestfreiheit im Einzelfall nachzuweisen. Weitere Maßnahmen zur Annahmekontrolle können durch Betreiber der RC-Anlagen festgelegt werden [1].

Hier ist eine bundeseinheitliche Regelung zur Nachweisgrenze der Asbestfreiheit wünschenswert. Diesbezüglich wird seitens der Autoren die Bestimmungsmethode nach der TRGS 517 – Anlage 2 Verfahren 1 mit einer Nachweisgrenze von < 0,008 Ma.-% favorisiert.

## 6. Quellen

- [1] Bundesverband der Gipsindustrie: Anlage zu den Qualitätsanforderungen für Recyclinggips. Stand Juni 2020
- [2] Angaben vom Bundesverband der deutschen Gipsindustrie
- [3] Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz: Flyer *Gipsrecycling statt Deponierung*, Berlin
- [4] Statista: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/589581/umfrage/produktion-von-gipsplatten-in-deutschland/>
- [5] Umweltbundesamt (UBA): Studie *Ökobilanzielle Betrachtung des Recyclings von Gipskartonplatten*, 2017

### Ansprechpartner



#### Jörg-Michael Bunzel

MUEG Mitteldeutsche Umwelt- und Entsorgung GmbH  
Prokurist/Geschäftsbereichsleiter TED  
Geiseltalstraße 1  
06242 Braunsbedra, Deutschland  
+49 34633 4111 5  
[joerg-michael.bunzel@mueg.de](mailto:joerg-michael.bunzel@mueg.de)



Deutschlands Online-Magazin  
für die Circular Economy

++ Immer online ++ Immer verfügbar ++ Immer aktuell ++



Jetzt 30 Tage kostenfrei testen!  
[www.320grad.de](http://www.320grad.de)

## The Contribution of Concrete Recycling to Resource Efficiency and Decarbonisation

Christoph Müller

The conservation of natural resources is one of the major ecological challenges of our time. The focus is also on cement and concrete production, which accounts for about a fifth of the primary raw material use in Germany. Appropriate assumptions are used to show which savings in natural resources along the cement and concrete value chain can be achieved by 2050 under certain conditions. According to this, it seems to be possible to use 41% less mineral primary raw materials such as limestone, gravel and natural stone. A key to this is the use of recycling materials that are obtained from the demolition of buildings or the concrete used in them. However, the contribution of concrete recycling to decarbonisation is limited. Whether the use of recycled aggregate leads to a reduction in the environmental impact in the life cycle assessment of concrete production must be considered for each individual case and depends in particular on the respective ratio of the transport distances of natural to recycled aggregate.

## Der Beitrag des Betonrecyclings zu Ressourceneffizienz und Dekarbonisierung

Christoph Müller

1.	Ressourceneinsatz in der Zement- und Betonherstellung heute.....	76
2.	Ressourcenschonung entlang der Wertschöpfungskette im Szenario 2050.....	78
3.	Ökobilanzierung der Verwendung von Recyclingmaterial bei der Herstellung von Zement und Beton .....	81
4.	Zusammenfassung.....	84
5.	Quellen.....	85

Die Schonung natürlicher Ressourcen gehört zu den großen ökologischen Herausforderungen unserer Zeit. Dabei steht auch die Zement- und Betonherstellung im Fokus, auf die ungefähr ein Fünftel des Primärrohstoffeinsatzes in Deutschland entfällt. Anhand entsprechender Annahmen wird aufgezeigt, welche Einsparungen natürlicher Ressourcen entlang der Wertschöpfungskette von Zement und Beton bis zum Jahr 2050 unter bestimmten Voraussetzungen erreicht werden können. Demnach wäre es möglich, mit 41 % weniger mineralischen Primärrohstoffen wie Kalkstein, Kies und Naturstein auszukommen. Ein Schlüssel dazu ist der Einsatz von Recyclingmaterialien, die aus dem Rückbau von Bauwerken bzw. des darin verbauten Betons gewonnen werden. Der Beitrag des Betonrecyclings zur Dekarbonisierung ist dagegen begrenzt. Ob die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung in der Ökobilanz der Betonherstellung zu einer Verminderung der Umweltwirkungen führt, ist für jeden Einzelfall zu betrachten und hängt insbesondere vom jeweiligen Verhältnis der Transportentfernungen von natürlicher zu rezyklierter Gesteinskörnung ab.

## 1. Ressourceneinsatz in der Zement- und Betonherstellung heute

Zur Herstellung von Zement und Beton wurden im Jahr 2020 etwa 236 Mio. t mineralische Primärroh- und fossile Brennstoffe eingesetzt. Dies entspricht etwa 20 % der in Deutschland eingesetzten natürlichen Rohstoffe (Bild 1). Auf die Zementproduktion entfielen dabei rund 44 Mio. t Primärrohstoffe sowie rund 1 Mio. t fossile Brennstoffe. Zusätzlich kamen alternative Roh- bzw. Brennstoffe (rund 7 Mio. t bzw. rund 4 Mio. t) zum Einsatz. Die verwendeten Brennstoffe wurden energetisch sowie stofflich verwertet. So konnten 2,5 Mio. t Kohle bzw. 2,4 Mio. t CO<sub>2</sub> eingespart werden.

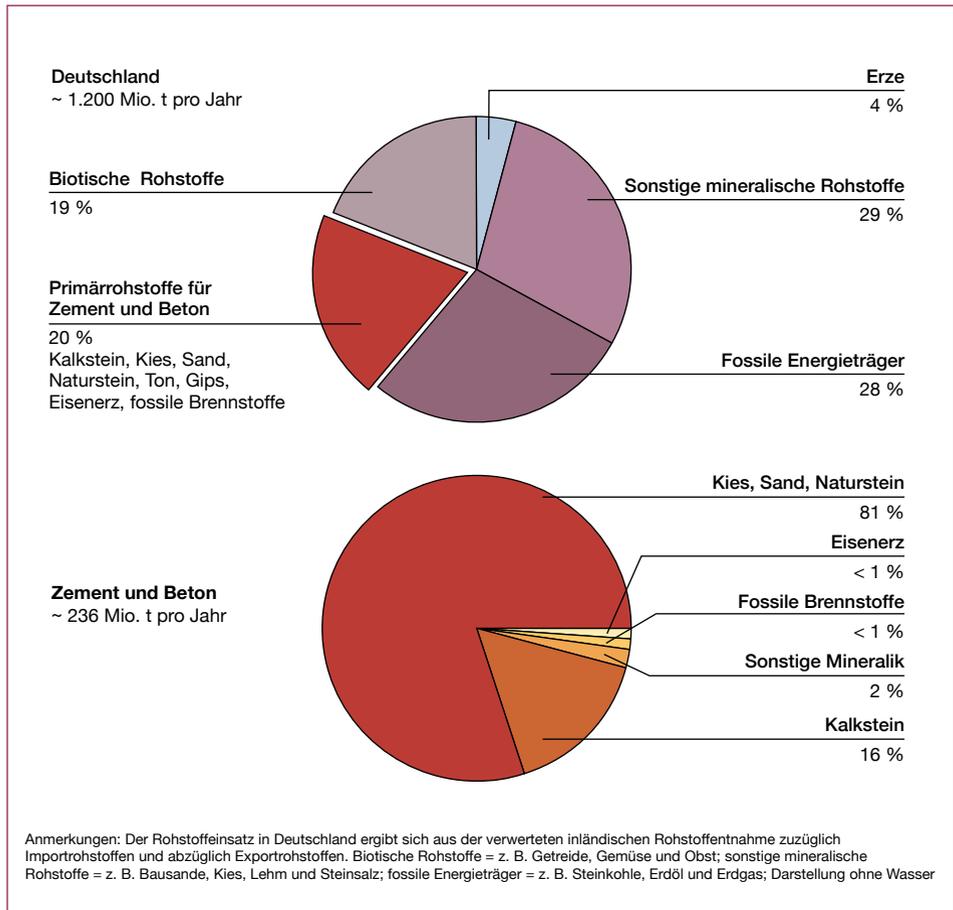


Bild 1: Primärrohstoffeinsatz gesamt sowie für Zement und Beton in Deutschland 2020

Quelle: Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, Hrsg. Ressourcen der Zukunft für Zement und Beton – Potenziale und Handlungsstrategien. Düsseldorf, 2022

Insgesamt wurden 2020 in Deutschland zur Herstellung von Beton und Mörtel etwa 192 Mio. t Kies, Sand und Natursteine eingesetzt. Die Menge recycelter Gesteinskörnungen in der Betonherstellung betrug ungefähr 0,9 Mio. t (Bild 2).

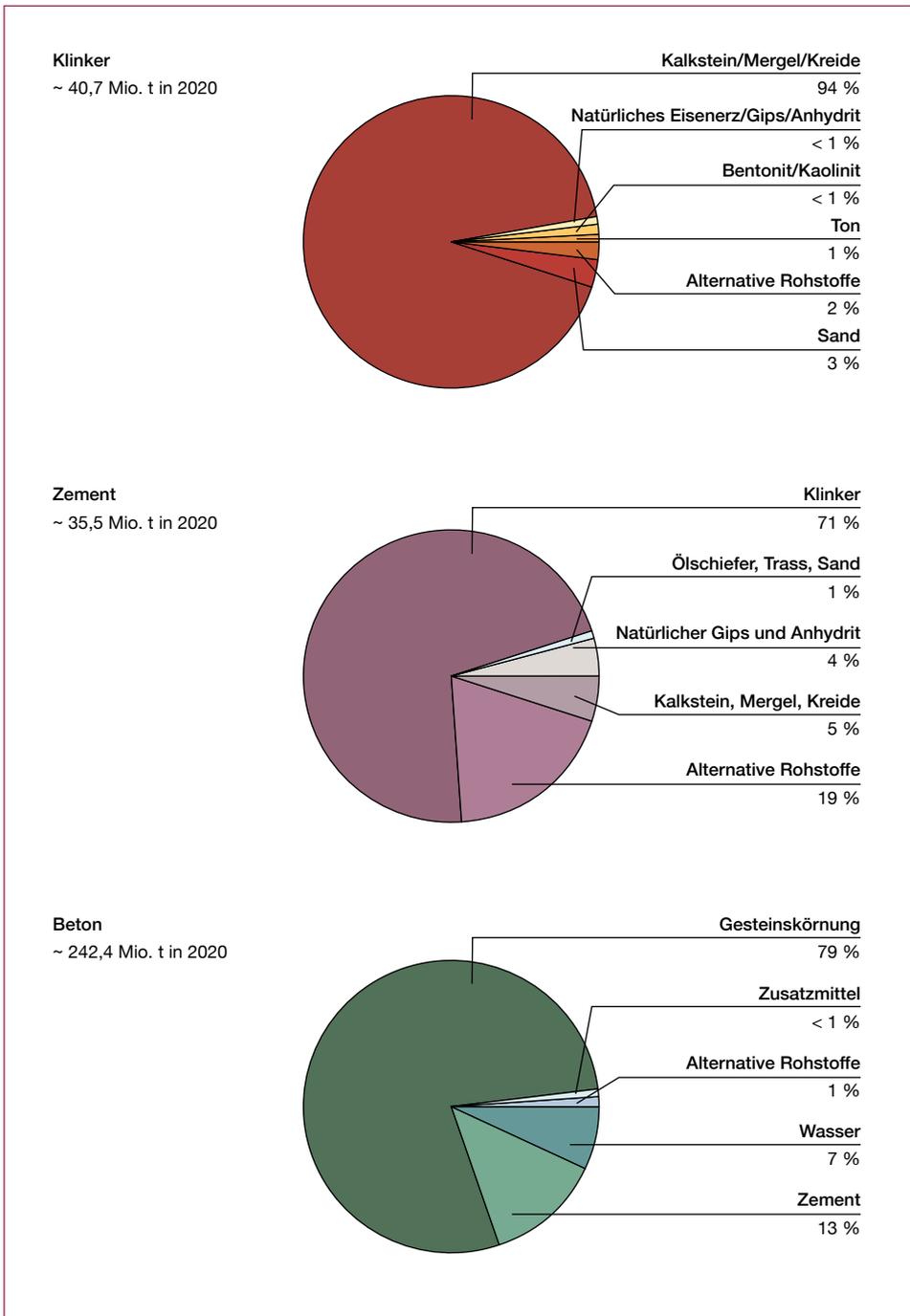


Bild 2: Rohstoffeinsatz in der Klinkerherstellung, für Zement und Beton in Deutschland 2020

Quelle: Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, Hrsg. Ressourcen der Zukunft für Zement und Beton – Potenziale und Handlungsstrategien. Düsseldorf, 2022

## 2. Ressourcenschonung entlang der Wertschöpfungskette im Szenario 2050

Die in [2] betrachteten Maßnahmen führen im Szenario 2050 insgesamt zu einer Minderung des Primärrohstoffeinsatzes in der Herstellung von Zement und Beton um insgesamt 96,8 Mio. t im Jahr 2050, was einer Reduktion um -41 % gegenüber 2020 entspricht (Bild 3). Die größten Potenziale ergeben sich in der Betonherstellung (-52,1 Mio. t), indem ein signifikanter Teil der natürlichen Gesteinskörnung im Beton (Kies, Sand, Naturstein) künftig durch Recycling-Gesteinskörnungen ersetzt wird. Diese sind das Produkt aus der Aufbereitung von Beton- und Mauerwerksbruch, der beim Rückbau und Abriss von Bauwerken entsteht. Bei diesem Prozess fallen auch Feinfraktionen des Altbetons, sogenannte Betonbrechsande (*Recyclingmehle*), an, die einerseits als Bestandteil im Zement, andererseits in gewissem Umfang als Rohmehlsubstitut im Klinkerbrennprozess zum Einsatz kommen können. Im Szenario 2050 können durch die genannten Maßnahmen mehr als 4 Mio. t Kalkstein in der Klinker- und Zementproduktion ersetzt werden. Gleichwohl gibt es insbesondere bei der Zementherstellung auch gegenläufige Effekte, die einen größeren Einsatz bestimmter primärer Rohstoffe erfordern. Dies sind vor allem Kalkstein und calcinierte Tone, um den Klinkergehalt im Zement zu reduzieren. Ein Grund sind die bis 2050 sinkenden Hüttensandmengen infolge der geplanten Umstellung der Roheisenproduktion auf das wasserstoffbasierte Direktreduktionsverfahren. Zudem dürfte im Lichte des Kohleausstiegs auch Flugasche für Zement und Beton nicht mehr zur Verfügung stehen. Die zukünftig entfallenden Mengen an REA-Gips für die Zementherstellung werden durch verstärktes Recycling von Gipsabfällen abgedeckt. Auf Bauwerksebene ermöglichen die Weiterentwicklung der Betonbauweise und die Verlängerung der Bauwerksnutzungsdauer im Szenario 2050 eine Einsparung von 26,1 Mio. t natürlicher Rohstoffe. Hierbei spielt u.a. eine entsprechend materialeffizientere Gebäudeplanung eine wichtige Rolle. Zudem wird angenommen, dass verstärkt Bauweisen zum Einsatz kommen, die mit einem geringeren Betonvolumen eine vergleichbare Leistungsfähigkeit erzielen.

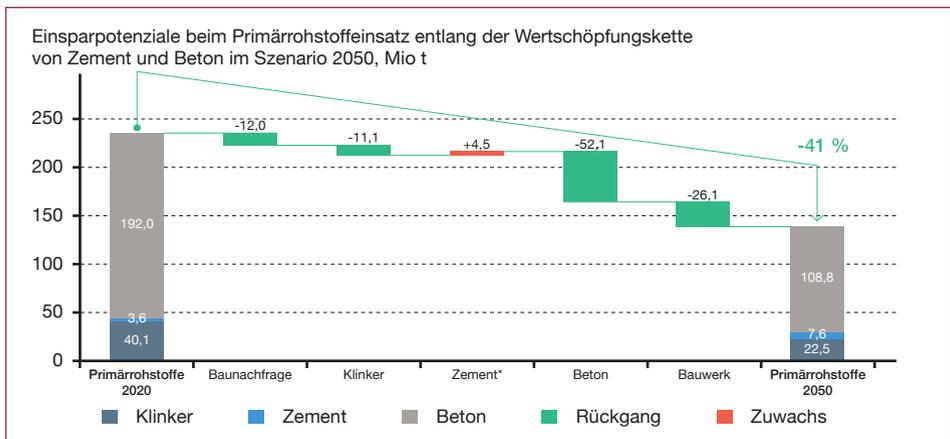


Bild 3: Ressourcenschonung entlang der Wertschöpfungskette im Szenario 2050

Quelle: Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, Hrsg. Ressourcen der Zukunft für Zement und Beton – Potenziale und Handlungsstrategien. Düsseldorf, 2022

# SPALECK®

FORWARD THINKING. SINCE 1869.



**100%**  
KONSTANTE  
MATERIALZUFUHR



**NEU**

## ActiveFEED

## AUFGABEBUNKER

**JETZT  
ANSCHAUEN**

FÜR EINE GEWINNBRINGENDE AUSLASTUNG UND  
BESCHICKUNG VON RECYCLINGLINIEN



[www.spaleck.de](http://www.spaleck.de)



# Aschen • Schlacken • Stäube Mineralische Nebenprodukte und Abfälle



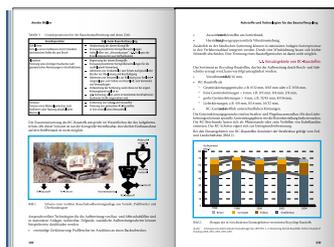
Herausgeber: Thomé-Kozmiensky (et.al.)

2013: <b>Aschen • Schlacken • Stäube</b> – aus Abfallverbrennung und Metallurgie –	ISBN: 978-3-935317-99-3	<b>25,00 EUR</b>
2014: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-11-4	<b>25,00 EUR</b>
2015: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 2</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-21-3	<b>25,00 EUR</b>
2016: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 3</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-28-2	<b>35,00 EUR</b>
2017: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 4</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-35-0	<b>35,00 EUR</b>
2018: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 5</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-41-1	<b>50,00 EUR</b>
2019: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 6</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-47-3	<b>50,00 EUR</b>
2020: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 7</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-53-4	<b>60,00 EUR</b>
2021: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 8</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-54-1	<b>75,00 EUR</b>
2022: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 9</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-58-9	<b>75,00 EUR</b>

Bestellen Sie direkt beim TK Verlag  
oder unter [books.vivis.de](http://books.vivis.de)

## Paketpreis

**225,00 EUR**  
statt 310,00 EUR



Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH  
Dorfstraße 51  
16816 Nietwerder-Neuruppin  
Tel. +49 3391-45 45-0  
E-Mail: [order@vivis.de](mailto:order@vivis.de)



Als externer Effekt wurde infolge von Prognosen im Szenario 2050 ein leichter Rückgang der Baunachfrage als Minderungsbeitrag berücksichtigt (-12,0 Mio. t). Brennstoffe werden in diesem Szenario nicht betrachtet, da sie einen vergleichsweise geringen Anteil an den eingesetzten Materialien ausmachen. Es wird davon ausgegangen, dass die heute in Teilen noch eingesetzten fossilen Brennstoffe bis 2050 durch alternative Brennstoffe und Wasserstoff zu 100 % substituiert werden. In Summe dürfte der hieraus resultierende Materialeinsatz in einer ähnlichen Größenordnung liegen wie zum jetzigen Zeitpunkt (etwa 5 Mio. t, davon etwa 0,2 Mio. t Wasserstoff). Ebenfalls nicht im Szenario betrachtet wurde der Einsatz von Wasser für die Betonherstellung. Hier kann von einem rückläufigen Einsatz ausgegangen werden, der u.a. mit dem zunehmenden Marktanteil von klinkereffizienten Zementen einhergeht. Mit sinkendem Klinkergehalt werden die Fälle zunehmen, in denen der Wasser/Zement-(w/z)-Wert abgesenkt werden muss, um adäquate Betoneigenschaften zu erzielen.

### 3. Ökobilanzierung der Verwendung von Recyclingmaterial bei der Herstellung von Zement und Beton

Die in [1] durchgeführten Ökobilanzen nach EN 15804 basierten auf Daten zur Beton- aufbereitung, die vom ifeu (Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg) in einem Recyclingwerk der Scherer & Kohl GmbH & Co KG ermittelt wurden. Hiernach ergaben sich folgende Ergebnisse:

- Die Umweltwirkungen der Aufbereitung von Betonabbruchmaterial sind geringer als typische Umweltwirkungen der Deponierung von Bauschutt. Aus ökologischer Sicht ist eine Aufbereitung und Wiederverwertung von Betonabbruchmaterial gegenüber der Deponierung zu bevorzugen.
- Über die Verwendung von gemahlenem Beton- oder Mauerwerksbrechsand bei der Zementherstellung lassen sich bei den meisten Ökobilanzindikatoren Verbesserungen erzielen. Der *R-Zement* war im Vergleich zum Referenzzement feiner zu mahlen, um eine vergleichbare technische Leistungsfähigkeit zu erreichen. Aufgrund der zusätzlich erforderlichen Mahlenergie kann der Primärenergiebedarf der Herstellung von *R-Zement* gegebenenfalls höher liegen als der Primärenergiebedarf der Herstellung von Portlandzement ohne Brechsandanteil.
- Ob die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung in der Ökobilanz der Betonherstellung zu einer Verminderung der Umweltwirkungen führt, ist für jeden Einzelfall zu betrachten und hängt insbesondere vom jeweiligen Verhältnis der Transportentfernungen von natürlicher zu rezyklierter Gesteinskörnung ab.

Die Zusammensetzung der an der TU Kaiserslautern untersuchten und durch den VDZ bilanzierten Betone ist in Tabelle 1 angegeben.

Die Ökobilanzen für

- einen Zement mit einer durchschnittlichen Zusammensetzung der deutschen Zementproduktion
- einen durchschnittlichen deutschen Portlandzement (CEM I)
- einen durchschnittlichen deutschen Hochofenzement (CEM III/A)

waren seinerzeit durch den VDZ erstellt und erstmals beim IBU – Institut Bauen und Umwelt e.V. geprüft und freigegeben worden. Es konnte somit auf die o.g. Ökobilanzen für CEM I und CEM III/A zurückgegriffen werden. Da für CEM II/B-S keine Ökobilanz vorlag, wurde diese für das Projekt R-Beton entsprechend der vorliegenden Ökobilanzen ergänzt.

Tabelle 2 gibt die Werte der Indikatoren an, die gemäß EN 15804 zur Beschreibung der Umweltwirkungen ausgewiesen wurden. Alle Annahmen und Berechnungen können im Detail [1] entnommen werden.

Tabelle 1: Referenzbetonzusammensetzungen mit natürlicher Gesteinskörnung (*Ref*) und entsprechende Betonzusammensetzungen mit rezyklierter Gesteinskörnung (*Typ I*)

Bezeichnung	R1 Ref	R1 Typ 1	R3 Ref	R3 Typ 1	R4 Ref	R4 Typ 1
Festigkeitsklasse	C35/45		C30/37		C25/30	
Zementart	Portlandzement CEM I		Portlandhüttenzement CEM II/B S		Hochofenzement CEM III/A	
Einheit	kg/m <sup>3</sup>					
Zementgehalt	360		330		280	
Flugasche	30		40		60	
Gesteinskörnung	1.760	1.635	1.767	1.638	1.794	1.658
davon	667		670		680	
Sand 0/2	667		670		680	
Kies 2/16	1.093	0	1.097	0	1.114	0
rez. GK	0	968	0	968	0	978
Wasser	179	209	180	210	176	206
Fließmittel	0,85	0,6	0,72	0,7		0,63
<b>Summe</b>	<b>2.329,9</b>	<b>2.234,6</b>	<b>2.317,7</b>	<b>2.218,7</b>	<b>2.310,7</b>	<b>2.204,6</b>

Tabelle 2: Mit der Herstellung von Beton verbundene Umweltwirkungen (Module A1–A3)

Parameter	Einheit	R1 Ref	R3 Ref	R4 Ref
	pro m <sup>3</sup> Beton			
Treibhauspotenzial, GWP	kg CO <sub>2</sub> -Äq. <sup>1</sup>	285	216	157
Ozonabbaupotenzial, ODP	kg CFC 11-Äq.	8,66E-08	5,85E-08	3,49E-08
Versauerungspotenzial von Wasser und Boden, AP	kg SO <sub>2</sub> -Äq.	3,93E-01	3,11E-01	2,42E-01
Eutrophierungspotenzial, EP	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> -Äq.	6,90E-02	5,57E-02	4,47E-02
Troposphärisches Ozonbildungspotenzial, POCP	kg Ethen-Äq.	2,71E-02	1,77E-02	8,80E-03
Potenzial für die Verknappung von abiotischen Ressourcen – Erze und Mineralien (ADP-elements)	kg Sb-Äq.	6,86E-04	6,55E-04	5,85E-04
Potenzial für die Verknappung von abiotischen Ressourcen – fossile Energieträger (ADP-fossil fuels)	MJ, unterer Heizwert	1.150	1.010	1.010

<sup>1</sup> Hierin nicht enthalten sind 47/32/19 kg CO<sub>2</sub>-Äq. aus der Verbrennung von Abfällen bei der Klinkerherstellung. Nach dem Verursacherprinzip (EN 15804) sind diese dem Produktsystem zuzuordnen, das den Abfall verursacht hat. Aus Transparenzgründen wird der Wert hier jedoch zusätzlich angegeben: GWP inkl. Verbrennung von Abfällen bei der Klinkerherstellung: 332/248/176 kg CO<sub>2</sub>-Äq. So soll über Ländergrenzen hinweg die Vergleichbarkeit von berechneten Treibhauspotenzialen für Zemente auch dann sichergestellt werden, falls die bei der Klinkerherstellung eingesetzten Sekundärbrennstoffe in anderen Ländern keinen Abfallstatus haben sollten.

Die Werte der Wirkungsbilanz der Betonherstellung der R-Betone ergaben sich aus den Werten der entsprechenden Referenzbetone über die folgenden Änderungen:

- Entfall der Gewinnung von Kies
- zusätzliche Prozesse aus der Aufbereitung RC-Gesteinskörnung.

Die hiermit verbundenen Umweltwirkungen wurden für zwei Aufbereitungsszenarien ermittelt und sind in Tabelle 3 für einen Kubikmeter Beton der Zusammensetzungen R1 ref bzw. R1 Typ 1 dargestellt. Für die anderen betrachteten Betone R3 Typ 1/R3 ref und R4 Typ 1/R4 ref waren die Werte sehr ähnlich.

Tabelle 3: Auswirkungen des Ersatzes von Kies durch RC-Gesteinskörnung auf die Umweltwirkungen der Betonherstellung (Modul A1)

Parameter	Einheit	Entfall Gewinnung Kies 1.093 kg	Aufwand RC. Gesteinskörnung 968 kg Szenario 2, 100 % Allok GK	Summe
Treibhauspotenzial, GWP	kg CO <sub>2</sub> -Äq. <sup>1</sup>	-3,0	0,25	-2,75
Ozonabbaupotenzial, ODP	kg CFC 11-Äq.	-7,08E-12	9,56E-13	6,12E-12
Versauerungspotenzial von Wasser und Boden, AP	kg SO <sub>2</sub> -Äq.	-8,35E-03	3,77E-04	-7,97E-03
Eutrophierungspotenzial, EP	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> -Äq.	-1,57E-03	6,04E-05	-1,51E-03
Troposphärisches Ozonbildungspotenzial, POCP	kg Ethen-Äq.	2,59E-04	2,61E-05	2,85E-04
Potenzial für die Verknappung von abiotischen Ressourcen – Erze und Mineralien (ADP-elements)	kg Sb-Äq.	-9,22E-07	1,27E-07	-7,95E-07
Potenzial für die Verknappung von abiotischen Ressourcen – fossile Energieträger (ADP-fossil fuels)	MJ, unterer Heizwert	-34,6	2,5	-32,1
Gesamteinsatz erneuerbarer Primärenergie (Primärenergie und die als Rohstoff verwendeten erneuerbaren Primärenergieträger) (energetische + stoffliche Nutzung)		-9,4	1,4	-8
Gesamteinsatz nicht erneuerbarer Primärenergie (Primärenergie und die als Rohstoff verwendeten nicht erneuerbaren Primärenergieträger) (energetische + stoffliche Nutzung) PE <sub>nem</sub>		-39,0	3,2	35,8
deponierter gefährlicher Abfall	kg	-1,09E-06	2,11E-09	-1,09E-06
deponierter nicht gefährlicher Abfall (Siedlungsabfall)		-2,28E+01	3,03E-03	-2,28E+01
Radioaktiver Abfall		-1,74E-03	2,95E-04	-1,44E-03

Weiterhin zu betrachten sind Unterschiede in Transporten der Gesteinskörnung zwischen Referenzbeton und R-Beton. Während beim Referenzbeton die Transporte von der Abbaustätte der Gesteinskörnung zum Betonwerk zu den Umweltwirkungen der Betonherstellung beitragen, sind es beim R-Beton die Transporte vom Ort des Recyclings bis zum Betonwerk. Das Verhältnis dieser beiden Transportdistanzen ist letztlich entscheidend für die Frage, ob die Ökobilanz eines R-Betons positiver

ausfällt als die des Referenzbetons mit natürlicher Gesteinskörnung. Dies kann z.B. für das Treibhauspotenzial mit den Werten aus Tabelle 18 in [1] und Tabelle 3 wie folgt ermittelt werden:

- Verringerung GWP aus Entfall Transport Kies  $[\text{kg CO}_2\text{-}\ddot{\text{a}}\text{q}/\text{m}^3 \text{ Beton}]$ :  $-1,093 \times 9,75/100 \times d_{\text{Kies}}$
- Erhöhung GWP aus zusätzlichem Transport rezyklierter GK  $[\text{kg CO}_2\text{-}\ddot{\text{a}}\text{q}/\text{m}^3 \text{ Beton}]$ :  $0,968 \times 9,75/100 \times d_{\text{RC}}$
- wobei  $d_{\text{Kies}}$  und  $d_{\text{RC}}$  für die jeweiligen Transportentfernungen in km stehen,
- Verringerung GWP (Tabelle 3)  $[\text{kg CO}_2\text{-}\ddot{\text{a}}\text{q}/\text{m}^3 \text{ Beton}]$ :  $-2,75$ .

Bild 4 zeigt für dieses Beispiel, bei welchen Transportentfernungen der Ersatz der natürlichen Gesteinskörnung durch rezyklierte Gesteinskörnung zu einer Verbesserung der Ökobilanz der Betonherstellung führt.

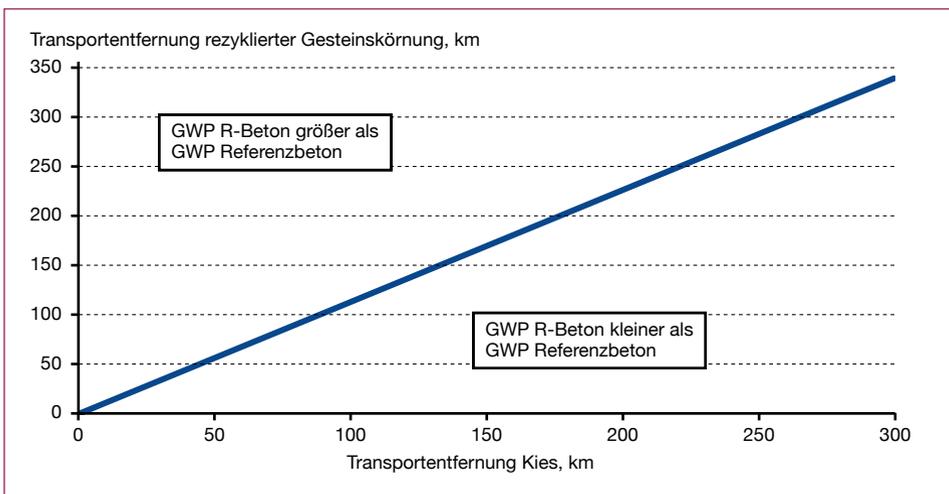


Bild 4: Überprüfung, ob Ökobilanzwerte der Betonherstellung durch den Ersatz von Kies durch rezyklierte Gesteinskörnung verbessert wird (Beispiel Treibhauspotenzial)

## 4. Zusammenfassung

Neben dem Klima- und dem Artenschutz gehört die Schonung natürlicher Ressourcen zu den großen ökologischen Herausforderungen unserer Zeit. Dabei steht auch die Zement- und Betonherstellung im Fokus, auf die ungefähr ein Fünftel des Primärrohstoffeinsatzes in Deutschland entfällt. Wie ein Szenario zur weiteren Reduzierung des Primärrohstoffeinsatzes aussehen kann, zeigt die Studie *Ressourcen der Zukunft für Zement und Beton – Potenziale und Handlungsstrategien* des VDZ [2]. Anhand entsprechender Annahmen wird aufgezeigt, welche Einsparungen natürlicher Ressourcen entlang der Wertschöpfungskette von Zement und Beton bis zum Jahr 2050 unter

bestimmten Voraussetzungen erreicht werden können. Demnach wäre es möglich, mit 41 % weniger mineralischen Primärrohstoffen wie Kalkstein, Kies und Naturstein auszukommen. Ein Schlüssel dazu ist der Einsatz von Recyclingmaterialien, die aus dem Rückbau von Bauwerken bzw. des darin verbauten Betons gewonnen werden. Bei der Aufbereitung des Materials entstehende feine Brechsande können in der Klinker- und Zementherstellung eingesetzt werden. Die größeren Bestandteile finden als Recycling-Gesteinskörnung in der Betonherstellung eine neue Verwendung. Hierin liegt gemäß [2] das größte Potenzial zur Schonung natürlicher Ressourcen in der Herstellung von Zement und Beton. Als Voraussetzungen für eine ressourcenschonende Betonbauweise benennt die Studie eine Reihe zentraler Handlungsfelder. So bedarf es eines nachhaltigen Stoffstrommanagements, um verbaute Materialien systematisch zu erfassen und wieder in den Kreislauf zu bringen. Zudem ist ein wirksamer politischer Instrumentenmix notwendig, der einerseits ein kontinuierliches Angebot an Recycling-Baustoffen und andererseits eine Nachfrage nach ressourcenschonendem Bauen fördert. Die gesamte Studie *Ressourcen der Zukunft für Zement und Beton – Potenziale und Handlungsstrategien* steht unter <https://www.vdz-online.de/ressourcenschonung> zum Download zur Verfügung. Der Beitrag des Betonrecyclings zur Dekarbonisierung ist dagegen begrenzt, wie zum Beispiel eine Ausarbeitung in [1] zeigt. Ob die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung in der Ökobilanz der Betonherstellung zu einer Verminderung der Umweltwirkungen führt, ist für jeden Einzelfall zu betrachten und hängt insbesondere vom jeweiligen Verhältnis der Transportentfernungen von natürlicher zu rezyklierter Gesteinskörnung ab.

## 5. Quellen

Dieser Beitrag besteht unmittelbar aus Inhalten, die den folgenden Quellen entnommen wurden:

- [1] Müller, C.; Reiners, J.: Ökobilanzierung aus Sicht des Zement- und des Betonherstellers (Teilvorhaben 5) - VDZ Technology gGmbH. In: Heft 641 der Schriftenreihe des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton DAFStb
- [2] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, Hrsg. Ressourcen der Zukunft für Zement und Beton – Potenziale und Handlungsstrategien. Düsseldorf, 2022

Der Autor war an der Erstellung von [1] und [2] beteiligt.

### Ansprechpartner



**Professor Dr.-Ing. Christoph Müller**  
VDZ Technology gGmbH  
Geschäftsführer/Leiter Betontechnik  
Toulouser Allee 71  
40476 Düsseldorf, Deutschland  
+49 211 4578372  
[christoph.mueller@vdz-online.de](mailto:christoph.mueller@vdz-online.de)

## Intelligent Robotics for Handling Mineral Waste in Remediation Operations

Philipp Woock

In view of the ever-increasing need for skilled workers and the ever-increasing demands for health and safety, many tasks could be carried out in an autonomous manner. Autonomous operations remove the human operator from the hazardous area. We will show how heavy construction machines can be used as robots to carry out autonomous tasks in a construction site environment. There are many pitfalls on the road to autonomy. Many of the skills of a human driver need to be replaced by sensors and intelligent behavior in a fully autonomous environment. The demonstrator vehicles from the ROBDEKON competence center are used as examples.

We describe how a robot sees the world and how a robot has only a limited view of the task at hand. We explain what steps need to be taken to equip the robot with abilities that humans naturally possess. We discuss how the raw information that sensors provide about the surroundings has to be enhanced by several processing steps. These include calibration, mapping, semantic interpretation, planning and control. Related topics such as remote monitoring and multi-robot interaction will also be addressed, as there will be intermediate states on the road to full autonomy where a human supervisor will need to interact with the roboticized heavy machinery.

They guide the reader through the process of robot interaction on a construction site. This will enable you to make decisions on a sound basis, with a better understanding of the shortcomings and potential of current technology.

# Intelligente Robotik im Umgang mit mineralischen Abfällen bei Sanierungsvorhaben

Philipp Woock

1.	Motivation .....	88
2.	Aufgaben aus robotischer Sicht .....	88
2.1.	Autonomie und Assistenzsysteme in der Praxis .....	88
2.2.	Telepräsenz/-operation .....	88
2.3.	Fähigkeiten des Menschen, Verstehen der Aufgabenstellung .....	89
3.	Autonome Baumaschinen.....	90
3.1.	Stand der Technik .....	90
3.2.	Aktorik/Ansteuerbarkeit .....	91
3.3.	Umgebungserfassung, Sensorik.....	91
3.4.	Kalibrierung.....	91
3.5.	Kartierung und Lokalisierung.....	92
3.6.	Semantische Umgebungserfassung .....	92
3.7.	Ablaufplanung im Gesamtgebiet, Aushubstrategie .....	93
3.8.	Kollisionsvermeidung und Sicherheit .....	93
3.9.	Trajektorien-/Wegplanung .....	94
3.10.	Pfadregelung .....	94
3.11.	Manipulatorplanung .....	94
3.12.	Aushubvorgang.....	95
3.13.	Kommunikation mit anderen Systemen, Roboter-Teams .....	96
4.	Fazit .....	97
5.	Quellen.....	97

## 1. Motivation

Der Einsatz von Menschen in kontaminierten Umgebungen ist regelmäßig mit umfangreicher Schutzausrüstung und Begrenzung von Einsatzzeiten verbunden, um den Menschen vor den schädlichen Einflüssen der Kontamination zu schützen. Diese Maßnahmen sind zwar wirksam, aber mit einem sehr hohen Aufwand verbunden.

Das vom BMBF geförderte Kompetenzzentrum ROBDEKON (Robotersysteme für die Dekontamination in menschenfeindlichen Umgebungen) [5] konzentriert sich zunächst auf drei Domänen: die Sanierung von Deponien und Altlasten, den Rückbau kerntechnischer Anlagen sowie die Dekontamination von Anlagenteilen. Dieser Beitrag beschreibt exemplarisch die Domäne der Sanierung, in der mit autonomen schweren Baumaschinen große Materialmengen bewegt werden.

## 2. Aufgaben aus robotischer Sicht

### 2.1. Autonomie und Assistenzsysteme in der Praxis

Es ist nicht erforderlich, dass Robotersysteme sofort alle möglichen Arbeiten auf Baustellen autonom erledigen, sondern sie sollen zunächst für strapaziöse Routineaufgaben in gefährlichen Umgebungen eingesetzt werden. Aktuell verfügen schwere Baumaschinen nicht oder nur sehr rudimentär über Assistenzfunktionen. Während beim Pkw mit der Einführung des Antiblockiersystems (ABS) oder spätestens mit dem elektronischen Stabilitätsprogramm (ESP) Assistenzsysteme ihren Durchbruch hatten, gibt es bisher nur wenige Systeme, die den Bediener von Baumaschinen unterstützen. Am häufigsten sind Assistenten zur semiautomatischen Profilierung von Böschungen anzutreffen.

Das Fernziel zur Erfüllung gefährlicher Aufgaben ist Vollautonomie: Man gibt die Beschreibung der Aufgabe und legt ggf. Planzeichnungen vor, woraufhin mehrere Baumaschinen gemeinsam einen optimalen Plan zur Erledigung der Aufgabe ausarbeiten und selbstständig durchführen.

### 2.2. Telepräsenz/-operation

Die komplette Entfernung des Menschen aus der Gefahrenzone bedeutet entweder Fernüberwachung/-steuerung der Systeme über einen Leitstand oder autonomes Arbeiten der Systeme. Es ist auch eine Mischung mit teilweiser Fernsteuerung bei ansonsten autonomem Betrieb denkbar, bei der der Mensch nur eingreift, wenn das System aktiv um Hilfe bittet. Für beide Einsatzmöglichkeiten werden in ROBDEKON Lösungen entwickelt: Einerseits neue Leitstandskonzepte für Bediener, die über die klassische Fernsteuerung weit hinaus gehen, andererseits vollständig autonomes Ausführen von Teilaufgaben [5, 2, 1].

### 2.3. Fähigkeiten des Menschen, Verstehen der Aufgabenstellung

Im Folgenden soll beleuchtet werden, was eine typische Aufgabenstellung für einen Menschen auf einer Baustelle für ein robotisches System bedeutet. Indem wir die Aufgabe analysieren, stellen wir fest, was alles nicht explizit in der Aufgabe benannt wurde.

Die Aufgabenstellung könnte vom Vorarbeiter zum Baggerfahrer lauten: *Fahr mal da rüber zum Ausheben*.

Diese Anweisung, scheint zunächst sehr simpel, jedoch steckt implizit das (Domänen-)wissen des Aufgabenstellers und des Bedieners darin, sowie die Voraussetzung allgemeiner Fähigkeiten eines Menschen. Ein Robotersystem muss auch für diese scheinbar leichte Aufgabe bereits eine große Menge an robotischen Fähigkeiten abdecken.

Im Detail: Es wird verlangt, dass das Robotersystem an einen Zielort fährt, um dort eine Aufgabe zu erfüllen, doch dieser wurde dabei gar nicht genau vorgegeben. Eventuell wurde mit einer Armbewegung in eine Richtung gezeigt. Implizit wird aber von einem Menschen hierbei erwartet, was für eine Maschine aus dieser Anweisung zunächst nicht direkt hervorgeht: *Suche zunächst einen sinnvollen Zielort*. Der Zielort und der Weg dorthin muss gefunden werden, indem das System *sich umschaut* und versteht, wie die Umgebung aussieht. Es gibt Bereiche in der Umgebung, die unterschiedlich gut geeignet sind, um dort zu fahren. Auf dem Weg zum Zielort soll das System selbstverständlich nicht mit Objekten oder Personen kollidieren. Der zu findende Weg zum Zielort soll nicht beliebig sein, sondern er muss vom System unter Berücksichtigung von Größe und Manövrierfähigkeit auch befahren werden können. Außerdem soll der Weg kein Umweg sein, sondern auf irgendeine Art und Weise optimal sein: etwa besonders kurz/schnell/spritsparend/bodenschonend oder besonders wenig störend für andere Teilnehmer.

Ebenso muss man der Maschine als Bewegungsabfolge vorgeben, was z.B. mit *Erdaushub* überhaupt gemeint ist (Bild 1). Das System erhält in der Aufgabe keinen Hinweis, wieviel Material ausgehoben werden soll. Dem menschlichen Operator ist dies vermutlich implizit klar, weil er weiß, dass er belastetes Material umlagern soll und dass das belastete Material möglicherweise anders aussieht als das unbelastete Material. Diese Informationen benötigt ein Robotersystem als explizite Beschreibungen von Aushubbereich und -tiefe oder als konkrete Farbcharakterisierung. Im Falle eines Abtransports durch ein autonomes Transportsystem, ist eine Zusammenarbeit mit anderen Systemen erforderlich. Insbesondere was das Ende des Beladevorgangs anbetrifft, müssen sich die Systeme verständigen.

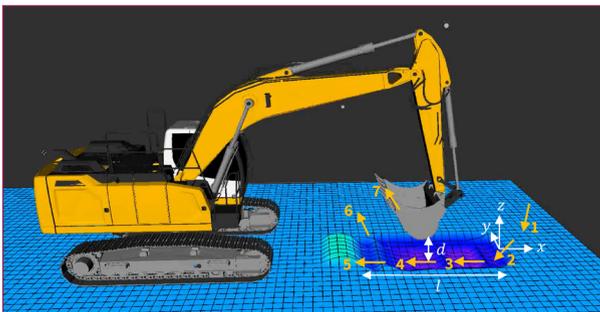


Bild 1:

Posensequenz für das Abtragen von Bodenschichten. Der Grabevorgang wird in Teilbewegungen des Manipulators unterteilt, die je nach Aufgabenstellung unterschiedlich parametrisiert sind.

Wir sehen uns also mit folgenden robotischen Aufgabenstellungen konfrontiert:

- Umfelderkennung,
  - Kartierung, Lokalisierung,
  - Semantische Umweltinterpretation,
- Ablaufplanung der Gesamtaufgabe,
- Navigation zu einem Zielort,
  - Pfadplanung, -regelung,
  - Kollisionsvermeidung mit statischen und dynamischen Hindernissen,
- Aushubvorgang,
  - Aushubareal und Aushubtiefe,
  - Planung einzelner Aushubschritte, bis Zielgeometrie erreicht ist,
  - Planung und Regelung der Manipulatorbewegung,
  - Anpassung der Aushubschritte an die aktuellen Gegebenheiten (Nachrutschung, Böschung),
  - Reaktion auf unvorhergesehene Ereignisse (z.B. Findling), Werkzeugwechsel,
- Kommunikation mit anderen Systemen,
  - Position für das Transportfahrzeug bestimmen,
  - Erkennung der Beladung des Transportfahrzeugs,
- Benutzereingriff im Falle einer Hilfsanforderung des Systems.

Im Folgenden werden diese robotischen Aufgaben näher beleuchtet und erklärt, welche Herausforderungen dabei zu meistern sind.

## 3. Autonome Baumaschinen

### 3.1. Stand der Technik

Kommerziell erhältlich sind Assistenzsysteme vor allem zur Unterstützung von Profilierungsarbeiten, bei denen ein ansonsten weitgehend unveränderter Bagger für einen menschlichen Bediener mit Sensoren, einer Benutzeroberfläche und zusätzlichen Bedienelementen ausgestattet wurde. Echt autonome Bewältigung von vollständigen Aufgaben ist am Markt bisher praktisch nicht verfügbar. Im Mining-Kontext gibt es hin und wieder Automatisierung beim Materialtransport, allerdings üblicherweise nur in statischen Umgebungen. Wir können hier aus Platzgründen leider keine detaillierte Übersicht über die Arbeiten geben und verweisen daher auf unsere Veröffentlichung [2].

## 3.2. Aktorik/Ansteuerbarkeit

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die Hersteller von Baumaschinen ihre Systeme nur ganz allmählich derart umstellen, dass sie nicht nur von Menschen durch Joysticks und Pedale steuerbar sind, sondern Befehle auch von Algorithmen entgegennehmen können. Dies ist Voraussetzung, damit eine Baumaschine als autonomer Roboter agieren kann.

## 3.3. Umgebungserfassung, Sensorik

Zur Realisierung der gewünschten Assistenzfunktionen und weitergehend auch der Autonomiefähigkeiten ist es notwendig, die Hardware der schweren Baumaschinen anzupassen und um zusätzliche Sensoren zu erweitern. Für jede Art von Regelung wird ein Rückkanal benötigt, um den aktuellen Zustand der Baumaschine zu erfassen. Der Mensch bringt die Sensorik bereits mit (Auge, Innenohr), weshalb Baumaschinen bisher lediglich Steuerungselemente für den Bediener bereithalten und keine Sensorik, (etwa zur Erfassung der Bewegung des Systems) ab Werk mitbringen. Durch die Digitalisierung der Ansteuerung der Baumaschinen wird der Grundstein gelegt, zukünftig leichter weitere Sensorik integrieren zu können.

In ROBDEKON kommen zahlreiche Sensoren zum Einsatz, die dem Bediener vor Ort oder im Leitstand ein Bild von der Umgebung ermöglichen. Neben den Punktwolken, die aus von LiDARen aufgezeichneten Daten erstellt werden, sind verschiedene Kameras im Einsatz, die in Echtzeit eine Rundumerfassung des Bereichs um den Bagger ermöglichen.

Zusätzlich wurden beim Raupenbagger Umrüstungen vorgenommen, wie eine Gelenkwinkelerfassung an den Baggerarmgelenken und eine funkbasierte Sensordaten-Durchführung zwischen Oberwagen und Chassis zur Erfassung der Kettenbewegung.

## 3.4. Kalibrierung

Sind mehrere geometrische Sensoren (LiDARe, Kameras) verbaut, liefern diese zunächst Einzelinformationen relativ zu ihrer eigenen Position. Für eine Rundum-Abdeckung des Arbeitsbereichs ohne Abschattungen müssen typischerweise mehrere Sensoren an unterschiedlichen Positionen verbaut werden. Damit die Sensorinformationen der Einzelsensoren jedoch in einem Gesamtbild zusammenpassen und Objekte in der Umgebung konsistent in allen Sensordaten erscheinen, müssen die Positionen und insbesondere die Ausrichtungen der Einzelsensoren sehr genau bekannt sein. Schon Abweichungen von nur 1° bei der Montage bringen bei 10 Metern Abstand über 17 Zentimeter Fehler in die Daten. Mit algorithmischen Kalibrierverfahren können die relativen Posen (also Position und Ausrichtung) der Sensoren zueinander genau bestimmt werden.

### 3.5. Kartierung und Lokalisierung

Die Sensordaten aus LiDARen (wie auch bei Daten aus akustischen oder Radar-Sensoren) geben lediglich geometrische Informationen (wie z. B. Abstände) über die Umgebung in Form von Punktwolken wieder. Eine Kamera liefert Farb- und Helligkeitsinformation. Mit zwei zu einem Stereo-Setup kalibrierten Kameras bekommt man sowohl geometrische als auch Farb-/Helligkeitsinformation. Eine Inertialmesseinheit (IMU) mit Satellitennavigationssystem (GNSS) liefert Daten über die Eigenbewegung. Diese Informationen tragen zunächst nichts zum inhaltlichen Verständnis des Systems über seine Umgebung bei. Geometrische Abstandsinformationen können vom robotischen System jedoch direkt eingesetzt werden, um etwa Kollisionsvermeidung zu betreiben.

LiDAR und Kamera liefern typischerweise mehrfach pro Sekunde neue Informationen, abhängig vom gewählten Sensorfabrikat. Diese Informationen sind jedoch zunächst zeitlich nicht miteinander verknüpft. Während der Mensch das Gesehene ständig in sein Gesamtverständnis integriert, muss dies der robotischen Baumaschine erst beigebracht werden. Hierfür kommen sog. SLAM-Verfahren zum Einsatz. SLAM bedeutet simultaneous localization and mapping, also gleichzeitige Kartenerstellung und Lokalisierung (in dieser Karte). Das bedeutet, dass die Sensordaten aus früheren Zeitschritten verwendet werden, um eine global konsistente Karte aufzubauen und man dabei feststellen kann, wie man sich innerhalb dieser Karte bewegt hat. Das Grundprinzip dahinter beruht darauf, Orte in Sensordaten unterschiedlicher Zeitpunkte anhand von eindeutigen Merkmalen wiederzuerkennen und die Sensordaten so zu verknüpfen.

### 3.6. Semantische Umgebungserfassung

Für einige robotische Aufgaben wird ein tieferes Verständnis über die Umgebung benötigt. Eine Punktwolkenkarte der Umgebung kann je nach Feinheit etwa verwendet werden, um auf Basis der Rauheit und vorhandener Hindernisse eine Befahrbarkeit des Untergrundes abzuleiten. Dennoch enthält eine Punktwolkenkarte noch keinerlei Konzept von Objekten. In der Praxis ist es sogar so, dass das Robotersystem selbst in den eigenen Sensordaten sichtbar sein kann, beispielsweise der Baggerarm, der zwingend in den Sensordaten auftaucht, wenn der Arbeitsbereich von den Sensoren erfasst werden soll. Diese Messpunkte gehören nicht zur Umgebung und müssen daher vor der Erstellung einer globalen Umgebungskarte entfernt werden.

Dies ist auch gleichzeitig der erste Schritt hin zu einem Objektverständnis. Die Einteilung der Umgebungs-Punktwolkenkarte in bedeutungstragende Einheiten (Gebäude, Fahrzeug, Person, Baum, etc.) ist ein wichtiger Schritt für komplexere Anweisungen. KI-Verfahren, die auf tiefen neuronalen Netzen basieren, zeigen hierbei gute Ergebnisse [3], stellen aber weiterhin ein aktuelles Forschungsthema dar.

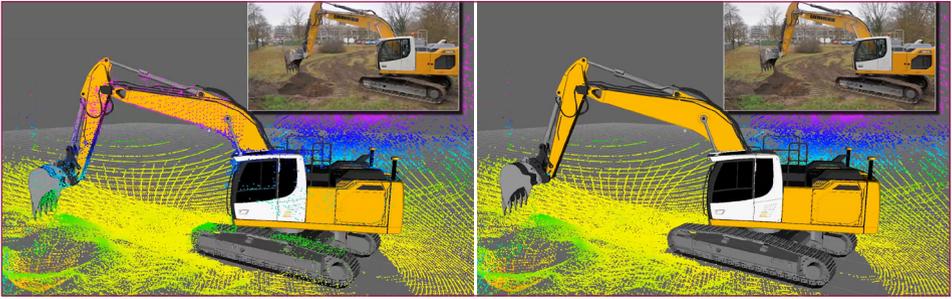


Bild 2: 3D-Punktfilterung basierend auf Baggermodell. Punkte auf dem Bagger gehören nicht zur Umgebung.

### 3.7. Ablaufplanung im Gesamtgebiet, Aushubstrategie

Sich im Gesamtablauf auf der Baustelle *klug* zu verhalten, bedeutet, dass Arbeitsschritte sinnvoll geplant sein müssen: Die Aushubstrategie darf etwa nicht dergestalt sein, dass der Bagger Zufahrtswege für das Transportsystem oder für sich selbst zerstört und dann nicht mehr manövrierfähig ist. Zudem sollen die Systeme anderen Systemen nicht den Weg versperren. Diese Überlegungen erfordern ein tiefes Verständnis für die Baustelle und werden auch von menschlichen Operatoren nicht immer perfekt gelöst. Wo sich jedoch ein menschlicher Bediener ohne konkrete Anweisung aufgrund seines *Bauchgefühls* und seiner Erfahrung für eine Lösung entscheiden kann, muss der Baumaschine überhaupt erst eine Methode zur Bewertung einer Situation an die Hand gegeben werden. Diese Aufgabe wird gerade mit vielen autonomen Systemen, die gleichzeitig arbeiten sollen beliebig komplex und kann noch nicht als gelöst gelten. Mittelfristig werden Menschen hier weiterhin die Orchestrierung der Systeme im Gesamtablauf vorgeben.

### 3.8. Kollisionsvermeidung und Sicherheit

Sicherheit und Zuverlässigkeit sind entscheidend für robotische Systeme, ganz unabhängig von ihrem Einsatzgebiet. Je größer, schwerer und kräftiger die Systeme jedoch sind, desto mehr müssen Sicherheitsfragestellungen in den Fokus rücken. Kollisionen, sei es zwischen dem Roboter und seiner Umgebung oder auch prinzipiell mögliche Selbstkollisionen müssen effizient erkannt und vermieden werden. Wir sehen dies als eine zentrale Aufgabe bei der Automatisierung von schweren Baumaschinen an. Um dies jederzeit gewährleisten zu können, wird der Bagger durch ein vereinfachtes Modell angenähert (Bild 3) und zu jeder Zeit das Kollisionsrisiko bestimmt und eingegriffen, falls eine Kollision vorhergesagt wird.

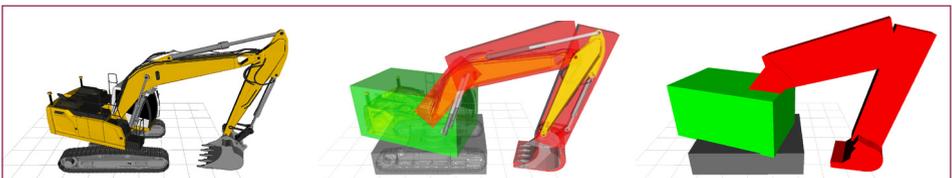


Bild 3: Baggermodell für die Eigenkollisionsvermeidung: CAD-Modell und vereinfachtes Modell des Baggers für Kollisionsprüfung und Abstandsberechnung.

Viele Fragestellungen u.a. zur Sicherheit bei der Autonomisierung einer Baumaschine können effizient durch Simulation beantwortet werden. Wichtige Voraussetzung dafür ist ein digitales Modell der Baumaschine. Durch entsprechende Konzeptionierung werden in der Simulation und in der Realität genau dieselben Algorithmen verwendet, so dass das Simulationsmodell der Baumaschine zusammen mit archivierten realen Messdaten der Maschine nutzbar ist. Dies geschieht in ROBDEKON auf Basis von ROS [4].

### 3.9. Trajektorien-/Wegplanung

Die reine Wegplanung erfordert kein vollständiges Objektverständnis der Umgebung, sondern es reicht aus, Informationen über die Befahrbarkeit des Untergrundes und mögliche Kollisionen mit der Umgebung zu besitzen.

Das Anfahren eines Aushubbereichs an sich ist bereits eine Aufgabe, bei der viele Teilaspekte beachtet werden müssen. Welcher Weg für das Fahrzeug am besten geeignet ist, hängt vom verfügbaren Platz ab, von der Größe und Manövrierfähigkeit des Fahrzeugs, von der Beschaffenheit des Untergrundes, vom Abstand zu Böschungen und von dynamischen Hindernissen, die im Arbeitsbereich auftauchen können. Hier muss das Robotersystem eine Lösung finden, die all diese Aspekte berücksichtigt, und zwar mehrmals pro Sekunde, um auf eine geänderte Umwelt schnell und zuverlässig zu reagieren. Wenn die Berechnung zu lange dauert und/oder das Ergebnis ungenau ist, kann dies schwere Schäden zur Folge haben.

### 3.10. Pfadregelung

Wurde ein sinnvoller Pfad (bzw. eine Trajektorie, die auch die Zeitkomponente mit einschließt) durch die Algorithmen bestimmt, nimmt das System das Abfahren dieses Pfades vor. Da in der Realität immer leichte Änderungen im Vergleich zum Abbild im Algorithmus auftreten (und sei es nur durch das Sensorrauschen), muss ständig überwacht werden, ob der Plan eingehalten werden kann, oder ob Korrekturkommandos erforderlich sind. Hierfür sind ausgefeilte Reglerkonzepte notwendig, die u.a. auch mit den Totzeiten bei hydraulischen Systemen umgehen können.

### 3.11. Manipulatorplanung

Ähnliche Aufgaben wie bei der Pfadplanung zur Wegsuche gibt es bei Manipulatorsystemen bei der Manipulatorbahnplanung. Am Beispiel des Baggers müssen bei einem Aushubvorgang mehrere Bedingungen erfüllt sein:

- Das auszuhebende Volumen und der Abladeort müssen für den Baggerarm erreichbar sein.
- Der Baggerarm darf umgebende Objekte nicht berühren (auch nicht den Bagger selbst, das *Bodenobjekt* aber schon).
- Der Baggerlöffel darf befüllt nicht mehr jede Position annehmen, sondern muss so gehalten werden, dass das ausgehobene Material nicht sofort wieder herausfällt.

Im Falle eines Baggers kann bei Aufgaben die Verwendung mehrerer Anbaugeräte am Arm erforderlich sein. Daher muss das Robotersystem im autonomen Betrieb in der Lage sein, selbstständig das Werkzeug zu wechseln, was ein hohes Maß an Präzision und eine hochaufgelöste Repräsentation des Arbeitsbereichs erfordert.

Die Planung fällt z.B. für einen Greifer anders aus als für einen Tieflöffel. Ist der Tieflöffel zudem an einem Tiltrotator montiert, bietet die dann mögliche Verkippung und Drehung mehr Freiheitsgrade in der Bewegung.

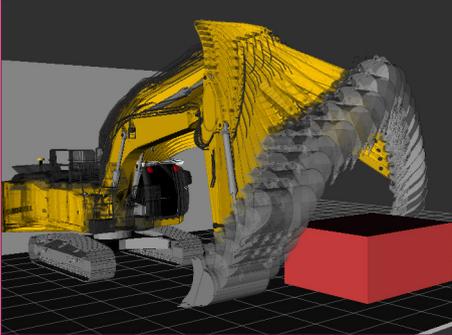


Bild 4: Überlagerung der Einzelschritte der Bahnplanung um ein Hindernis (roter Quader) herum.

Wodurch das Vorhandensein eines Tiltrotators nicht nur die Planung einzelner Teilaufgaben ändert, sondern ggf. sogar die darüberliegende Aufgabenplanung, falls mit dem Tiltrotator Arbeiten erheblich effizienter, etwa durch Schrägstellung des Löffels, durchgeführt werden können.

Der Ausweichvorgang des Baggerarms für ein Hindernis ist in Bild 4 dargestellt. Dies erfordert auf technischer Seite umfangreiche Berechnungen, die der Mensch scheinbar spielend beherrscht.

### 3.12. Aushubvorgang

Für den Erdaushub eines Belastungskörpers nach vorgegebenem Muster wurde in ROBDEKON ein Raupenbagger befähigt, einen vom Nutzer vorgegebenen Bereich bis in eine vorgegebene Tiefe autonom auszuheben und auf eine Transportplattform zu verbringen. Hier wird die Umgebung durch die Sensorik ständig erfasst und die gewünschte Sollgeometrie mit dem Istzustand verglichen. Der Bagger baggert so lange aus, bis der gewünschte Zustand erreicht ist, bzw. das Transportfahrzeug voll ist (Bild 5).

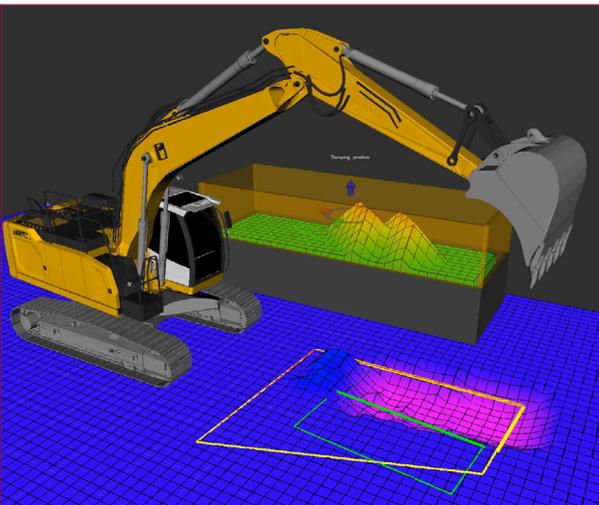


Bild 5:

Aushubvorgang in der Simulation. Das gelbe Polygon markiert den gesamten Abtragbereich, grün ist der Plan für den aktuellen Löffelaushub, der Ring mit den Pfeilen zeigt den Abladeort auf dem Anhänger. In Magenta ist die Bodenvertiefung zu sehen, die die bisherigen Grabevorgänge erbracht haben.



Bild 6: Beladevorgang des autonomen Transportfahrzeugs durch den autonomen Raupenbagger (oben). Interne Sicht der Systeme auf das Szenario (unten).

### 3.13. Kommunikation mit anderen Systemen, Roboter-Teams

Damit Robotersysteme sinnvoll zusammenarbeiten können, brauchen sie ein gemeinsames Verständnis der Welt. D.h., dass die Umgebungskarten, die die Roboter einzeln für sich erstellen, miteinander geteilt und in eine Gesamtkarte fusioniert werden müssen. Die unverarbeiteten Sensordaten stellen sehr große Datenmengen dar, die drahtlos übertragen werden müssten. Intelligente Methoden arbeiten datensparsam nur auf den aktuell relevanten Teilen der Karte und übertragen nur relevante Änderungen zur bereits bestehenden Karte. Aktuell rückt hier die Interoperabilität von autonomen Systemen mit BIM/GIS-Systemen in den Vordergrund.

### 4. Fazit

Autonome Arbeitsmaschinen werden zukünftig nicht mehr wegzudenken sein. Fachkräftemangel einerseits und Arbeitsschutz andererseits werden dazu führen, dass Aufgaben zumindest teilweise autonom bearbeitet werden und werden müssen. Genauso, wie es heute kaum mehr einen Pkw ohne ABS zu kaufen gibt, werden die aktuell noch als Zusatzausstattung erhältlichen Hilfsmittel irgendwann von den Herstellern serienmäßig angeboten werden.

Der meiste Forschungsbedarf wird in der intelligenten Abarbeitung von Aufgaben liegen. Es wird von einem autonomen System erwartet, dass es *mitdenkt*, und zwar auf eine Art wie es ein menschlicher Bediener täte. Dieses Verhalten einer Maschine beizubringen, wird eine Kernaufgabe der Zukunft sein.

### 5. Quellen

- [1] Fennel, M.; Zea, A. & Hanebeck, U. D.: Intuitive and immersive teleoperation of robot manipulators for remote decontamination. In: at - Automatisierungstechnik, 2022, 70, 888 – 899, doi:10.1515/auto-2022-0057
- [2] Frese, C.; Zube, A.; Woock, P.; Emter, T.; Heide, N. F.; Albrecht, A.; Petereit, J.: 2022. An autonomous crawler excavator for hazardous environments. In at - Automatisierungstechnik. 2022. vol. 70, no. 10, p. 859 – 876. DOI doi:10.1515/auto-2022-0068
- [3] Heide, N. F.: Perception of Unstructured Environments for Autonomous Off-Road Vehicles, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2022, doi: 10.5445/IR/1000150079
- [4] Quigley, M.; Gerkey, B.; Conley, K.; Faust, J.; Foote, T.; Leibs, J.; Berger, E.; Wheeler, R; Ng, A. 2009. ROS: an open-source Robot Operating System. In: ICRA Workshop on Open Source Software. Kobe, Japan. 2009
- [5] Woock, P.; Petereit, J.; Frey, C.; Beyerer, J.: 2022. ROBDEKON – competence center for decontamination robotics. In at - Automatisierungstechnik [online]. 2022. vol. 70, no. 10, p. 827 – 837. DOI doi:10.1515/auto-2022-0072.

### Ansprechpartner

**Dr.-Ing. Philipp Woock**

Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik

und Bildauswertung IOSB

Autonome Robotersysteme

Fraunhoferstraße 1

76131 Karlsruhe, Deutschland

+49 721 6091 256

philipp.woock@iosb.fraunhofer.de

# Vivis-Events



Seit 50 Jahren begleiten wir die Kreislaufwirtschaftsbranche und bieten den verschiedenen Akteuren ein Forum des Wissens- und Erfahrungsaustauschs.

Wir bieten aktuell vier Konferenzen im Jahr an, die sich jeweils einem bestimmten Themenbereich der Abfallwirtschaft widmen – Recycling und Sekundärrohstoffe, Mineralische Nebenprodukte und Abfälle (einschl. Deponien), Klärschlamm und Thermische Verfahren. Darüber hinaus haben wir auch einen internationalen Kongress zum Thema Waste-to-Energy im Portfolio. Die Veranstaltungsreihen finden in einem einjährigen Rhythmus statt und stellen die aktuellen politischen, wirtschaftlichen, technischen und rechtlichen Entwicklungen vor.

Wir bieten eine Plattform, auf der sich die verschiedenen Akteure und Sektoren miteinander austauschen und vernetzen können. Unser persönliches Ziel ist, mit unseren Konferenzen zum Nachdenken anzuregen, Projekten Ansbuch zu geben und positive Entwicklungen in der Kreislaufwirtschaft voranzutreiben.

Das umfassende Wissen der Vortragenden wird in Fachbeiträgen ausführlich dokumentiert und im Anschluss an die Konferenzen in qualitativ anspruchsvollen Büchern und E-Books präsentiert.

Unsere aktuellen Konferenzen im Überblick:

- Berliner Konferenz Abfallwirtschaft und Energie**
- Berliner Konferenz - Metallrecycling und -kreisläufe**
- Berliner Konferenz Mineralische Nebenprodukte und Abfälle**
- Berliner Klärschlammkonferenz**
- IRRC – Waste-to-Energy**

Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Dorfstraße 51  
16816 Nietwerder-Neuruppin  
Tel. +49 3391-45 45-0  
E-Mail: [registration@vivis.de](mailto:registration@vivis.de)

**VIVIS**.de

## **Schadstoffe – Grenzen der Kreislaufwirtschaft**

## Waste Mineralogy – Applications of Mineralogical Methods and Concepts for the Assessment of Mineral Secondary Raw Materials

Daniel Vollprecht and Roland Pomberger

Mineralogy has been defined as the science *dealing with naturally occurring elementary building blocks of the Earth that are chemically and structurally homogeneous*, but has recently broadened its scope to synthetic inorganic phases [51] whereas *waste means any substance or object which the holder discards or intends or is required to discard* [16]. Consequently, some connections between *waste* and *mineralogy* are obvious [43], especially with respect to mineral wastes. However, mineral phases do not only occur in mineral wastes, but also in landfills, contaminated sites and waste waters. About 60 to 70 % of the total mass of a landfill body constitute of fine materials [49], which are rich in mineral phases from wastes and landfill liners [18]. Mineral phases can also form within a landfill by precipitation from the leachate [3]. Contaminated soil becomes a waste by excavation, and remediation is often connected to waste management. Waste waters may contain mineral phases in their suspended matter, but mineral phases may especially form during waste water treatment by precipitation.

A scientific discipline is defined not only by its subject, but also by *a set of concepts and analytical expressions* [53]. The main concept of mineralogy is that solids are composed of mineral phases, and that these phases and their characteristic properties influence the behaviour of the solid as a whole. Despite the fact that mineral phases are ubiquitous in wastes, the concept of mineralogy is barely considered in waste management, e.g. to determine the bonding of Hg as sulphide [10]. The analytical methods used in mineralogy deliver information about the phase composition of a material as well as of the grain size and shape, the chemical composition and crystal structure and the resulting properties of the individual mineral phases. Mineralogical methods are applied to a wide range of materials like ceramics, cement and concrete [7]. Often, the products are discarded without further investigation. Although failure analyses [4] are sometimes conducted using mineralogical methods, they are barely used for other wastes. The application of concepts and methods from one discipline to a second one does not lead to the creation of a new discipline. Therefore, waste mineralogy is not a scientific discipline, but an emerging research field.

# Abfallmineralogie – Anwendung mineralogischer Methoden und Konzepte zur Bewertung mineralischer Sekundärrohstoffe

Daniel Vollprecht und Roland Pomberger

1.	Der Zielkonflikt: Schadstoffausschleusung versus Ressourceneffizienz .....	101
2.	Größenskalen von Schadstoffen: Partikel, Phase, Element .....	102
3.	Was ist Abfallmineralogie?.....	104
4.	Vom Vorsorgeprinzip zur mineralogischen Bewertung von Sekundärrohstoffen ....	107
5.	Ausblick.....	109
6.	Quellen.....	109

## 1. Der Zielkonflikt: Schadstoffausschleusung versus Ressourceneffizienz

In den vergangenen Jahren haben die Begriffe *Kreislaufwirtschaft* und *Ressourcenwirtschaft* teilweise den Begriff *Abfallwirtschaft* abgelöst [26, 12]. Die Umbenennung verdeutlicht einen Paradigmenwechsel von einer schadstoff- zu einer rohstofforientierten Sichtweise. Diese beiden Sichtweisen sind eng mit einem Zielkonflikt verbunden, einerseits *die Schonung der natürlichen Ressourcen zu fördern* und andererseits *den Schutz von Mensch und Umwelt [...] sicherzustellen*.

Glas und Metall wurden bereits von den Römern recycelt [15]. Die Umweltauswirkungen des Recyclings dieser Materialien sind im Vergleich zur Gewinnung aus Primärrohstoffen geringer, da die negativen Auswirkungen des Bergbaus entfallen, die Herstellung analog verläuft und die umweltrelevanten Produkteigenschaften praktisch konstant sind. Gesundheits- und umweltschädliche Bestandteile von Produkten, wie z.B. Blei, traten bereits im Römischen Reich verbreitet auf [33], allerdings gibt es keine Hinweise darauf, dass Recyclingprozesse hier im Unterschied zur Primärroute negativere Auswirkungen auf die Gesundheit gehabt hätten.

Der Konflikt zwischen beiden Zielen der Kreislaufwirtschaft (Bild 1) entstand erst in dem Moment, indem schadstoffhaltige Abfälle in einer Art recycelt wurden, bei der sie in einer anderen Form mit der Umwelt interagieren, als dies bei einer etwaigen vorigen Nutzung der Fall war – sofern es überhaupt eine vorige Nutzung ab, meistens handelt es sich um Reststoffe. So gipfelte der Einsatz schwermetallbelasteter Klärschlämme in der Landwirtschaft in der Aussage *Kreislaufwirtschaft contra Bodenschutz* [25].

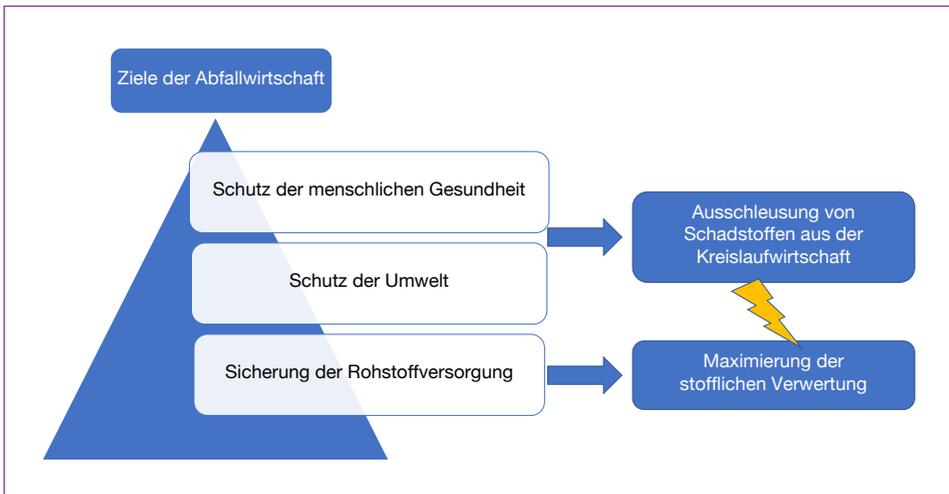


Bild 1: Zielkonflikt zwischen Schadstoffausschleusung und Ressourceneffizienz

Daher müssen Deponien als *letzte Senke* weiterhin eine zentrale Rolle in der Abfallwirtschaft haben [29]. Aus geochemischer Sicht erscheint es wahrscheinlich, dass jedes Material jedes chemische Element enthält, nur in unterschiedlicher Konzentration. Für eine vollständige Vermeidung der Schadstofffreisetzung müssten nicht nur sämtliche Abfälle deponiert werden, was den bereits problematisch hohen Rohstoffverbrauch weiter beschleunigen würde [32], sondern auch die Verwendung von Primärrohstoffen müsste kritisch reflektiert werden, da diese ebenfalls Schadstoffe enthalten [42].

Auf dieser Grundlage sind entsprechende Grenzwerte für das Recycling [9] verankert worden, um einen Kompromiss zwischen Kreislaufwirtschaft und Umweltschutz zu finden. Auch aufgrund dieser Grenzwerte werden in Österreich jährlich 1,2 Mio. Tonnen Baurestmassen, 25 Mio. Tonnen Bodenaushub, 800.000 Tonnen Aschen aus der Abfall- und Biomasseverbrennung und 90.000 Tonnen metallurgische Schlacken deponiert [11]. Dieser Ressourcenverschwendung stehen die negativen Auswirkungen gegenüber, die ein Recycling, aber auch eine nicht sachgerechte Deponierung mineralischer Abfälle haben kann [36]. Die Art der Grenzwerte (Feststoff versus Eluat) und ihre jeweilige Höhe sind Gegenstand öffentlicher Debatten insb. zwischen den Erzeugern von Primär- und Sekundärrohstoffen [24].

## 2. Größenskalen von Schadstoffen: Partikel, Phase, Element

Bestandteile von Abfällen, Altlasten und Abwässern, die als Umweltschadstoffe wirken können, können entweder einzelne chemische Elemente und ihre gelösten oder gasförmigen Spezies sein (z.B. Cr(VI) im Grundwasser [39]), Mineralphasen (z.B. Krokoid,  $\text{CaCrO}_4$ , in Rostaschen aus der Abfallverbrennung [35]) oder ganze Partikel, z.B. Kunststoffpartikel in Kultursubstraten [50], sein, d.h. der Schadstoffbegriff in der Abfallwirtschaft bezieht sich auf verschiedene Größenskalen (Bild 2).

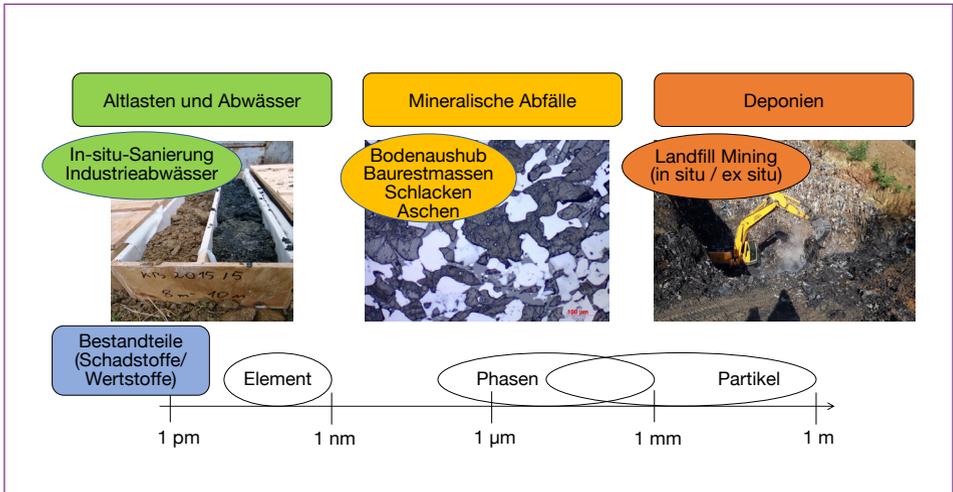


Bild 2: Größenskalen von Schadstoffen bei der Sanierung von Altlasten, der Behandlung von Abwässern und mineralischen Abfällen sowie der Rückgewinnung von Rohstoffen aus Deponien

Die mechanische Abfallbehandlung (=Abfallaufbereitung) [26] ermöglicht die Entfernung von Schadstoffen, die als ganze Partikel vorhanden sind. Wenn jedoch der Schadstoff ein chemisches Element ist, dann kann sie nur Partikel abtrennen, die einen erhöhten Gehalt an diesem Element enthalten, z.B. Glas aus gemischten Abfällen, da dieses höhere Arsen-Konzentrationen enthält [46]. Dies bedeutet, dass die gesamte Fraktion eines recyclingfähigen Materials deponiert werden müsste, wenn sich auch nur geringe Schadstoffgehalte in ihr befinden. Für eine ausschließliche Entfernung der Schadstoffe, d.h. auf der Elementebene, können Waschprozesse eingesetzt werden, sofern diese nur an die Oberflächen der Partikel adsorbiert sind, z.B. für die Entfernung von Chlorid aus Müllverbrennungsrostaaschen [52]. Für Schadstoffe, die als Mineralphasen auftreten, können nach vorigem Aufschluss [44] Verfahren angewandt werden, die aus der Mineralaufbereitung bekannt sind (z.B. die Abtrennung von Kupfer aus Schlacken [8] und Aschen [6] mittels Flotation). Obwohl nassmechanische Prozesse in der Abfallwirtschaft bereits angewandt werden, wird eine Trennung auf der Phasenebene kaum eingesetzt. Die Gründe dafür sind zum einen, dass die für den mechanischen Aufschluss erforderliche Energie mit abnehmender Partikelgröße zunimmt [37, 23, 5], während der Wert mineralischer Abfälle sinkt, und zum anderen, dass der Wert mineralischer Nichterze-Rohstoffe meist geringer ist als der von Erzen, so dass die hohen Kosten nicht gerechtfertigt sind.

Chemische Verfahren wie die (selektive) Lösung und Fällung [20] oder thermochemische Behandlung [47] werden in der Abfallwirtschaft außerhalb der Abwasserbehandlung [28] selten genutzt, da sie teurer sind. Sie erlauben aber dafür die Mobilisierung und Fixierung von Schadstoffen auf der Ebene einzelner chemischer Elemente sowie in spezifischen Mineralphasen. So kann z.B. die Laugung von Flugaschen aus der Abfallverbrennung mittels Salzsäure Metalle gezielt mobilisieren, so dass sie später wieder mittels Adsorption abgetrennt werden können [41].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Phasenebene bei der Schadstoffbetrachtung sowohl für die mechanische Abfallbehandlung von Bedeutung ist, da die zugrundeliegenden Trennmerkmale teilweise charakteristische Eigenschaften der Mineralphase sind, als auch für die chemische Abfallbehandlung eine Rolle spielen, da die Löslichkeit von Mineralphasen hier eine wesentliche Rolle spielt.

### 3. Was ist Abfallmineralogie?

Mineralogie ist die Wissenschaft, die sich mit den natürlich vorkommenden Bausteinen der Erde, die chemisch und strukturell homogen sind, beschäftigt, ihren Forschungsgegenstand aber auf synthetische anorganische Phasen ausgeweitet hat [51], wohingegen Abfall *jeden Stoff oder Gegenstand, dessen sich sein Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss*, bezeichnet [16].

Einige Verbindungen zwischen *Abfall* und *Mineralogie* sind offensichtlich [43]. Dabei treten Mineralphasen nicht nur in mineralischen Abfällen, sondern auch in Deponien, Altlasten und Abwässern auf. Ungefähr 60 bis 70 % der Gesamtmasse einer Deponie bestehen aus Feinfraktionen [49], die reich an Mineralphasen unterschiedlicher Herkunft sind [18]. Mineralphasen können sich auch innerhalb eines Deponiekörpers durch Fällungsreaktionen bilden [3]. Altlasten und Abwässer sind keine Abfälle. Allerdings wird kontaminierter Boden durch den Aushub zu Abfall und die Sanierung von Altlasten ist oft mit abfallwirtschaftlichen Fragestellungen verbunden. Mineralphasen können bereits in der Suspensionsfracht von Abwässern enthalten sein, bilden sich aber auch bei der Behandlung durch Fällungsreaktionen.

Daraus ergibt sich die Frage, ob die *Abfallmineralogie* eine eigenständige wissenschaftliche Disziplin ist, die nicht nur durch ihren spezifischen Forschungsgegenstand, sondern auch durch ein spezifisches Set an Konzepten und Methoden definiert wird [53]. Das wissenschaftliche Konzept der Mineralogie besagt, dass Festkörper aus Mineralphasen zusammengesetzt sind, und dass diese Phasen und ihre charakteristischen Eigenschaften das Verhalten des Festkörpers als Ganzem beeinflussen.

Trotz des Fakts, dass Mineralphasen in Abfällen allgegenwärtig sind, wird das Konzept der Mineralogie in der Abfallwirtschaft kaum beachtet. Es gibt nur sehr wenige Fälle, in denen mineralogische Daten in der Abfallwirtschaft benötigt werden, z.B. für den Nachweis der sulfidischen Bindungsform von Quecksilber [10]. Die analytischen Methoden, die in der Mineralogie verwendet werden, liefern Informationen über den Phasenbestand des Materials [2] sowie über die Korngröße und -form, die chemische Zusammensetzung und Kristallstruktur sowie die daraus resultierenden Eigenschaften individueller Mineralphasen. Mineralogische Methoden werden für eine große Bandbreite an Materialien wie Keramiken, Zement und Beton [7] eingesetzt. Am Ende ihres Lebenszyklus werden solche Produkte oft ohne weitere Untersuchung entsorgt. Obwohl im Rahmen von Schadensanalysen mineralogische Methoden eingesetzt werden [4], ist deren Anwendung in der Abfallwirtschaft noch die Ausnahme.



# Test- und Entwicklungszentrum auf dem neusten Stand der Technik: Bewertung und Optimierung Ihres Sortierprozesses.

Stellen Sie sicher, dass Ihre Anlage die gewünschten Ergebnisse liefert: führen Sie selbst Tests an den einzelnen Maschinen durch, oder simulieren Sie Ihren gesamten geplanten Sortierprozess mit Hilfe von Bypass-Konstruktionen im STADLER Testzentrum.

Im Hinblick auf Nachhaltigkeit und die zukunftsorientierte Technik ist das STADLER Test- und Entwicklungszentrum eine perfekte Möglichkeit für Innovationen der Forschungsprojekte, die zu einer sauberen Welt beitragen.

Möchten Sie Ihren Sortierprozess optimieren?  
**Dann kontaktieren sie uns!**

**STADLER Anlagenbau GmbH**

+49 7584 9226-0  
info@w-stadler.de  
www.w-stadler.de

**STADLER**<sup>®</sup>  
Technik von ihrer besten Seite

# Aschen • Schlacken • Stäube Mineralische Nebenprodukte und Abfälle



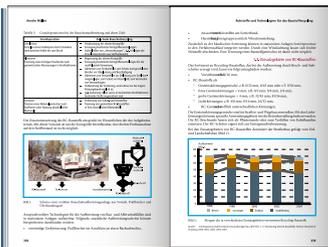
Herausgeber: Thomé-Kozmiensky (et.al.)

2013: <b>Aschen • Schlacken • Stäube</b> – aus Abfallverbrennung und Metallurgie –	ISBN: 978-3-935317-99-3	<b>25,00 EUR</b>
2014: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-11-4	<b>25,00 EUR</b>
2015: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 2</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-21-3	<b>25,00 EUR</b>
2016: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 3</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-28-2	<b>35,00 EUR</b>
2017: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 4</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-35-0	<b>35,00 EUR</b>
2018: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 5</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-41-1	<b>50,00 EUR</b>
2019: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 6</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-47-3	<b>50,00 EUR</b>
2020: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 7</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-53-4	<b>60,00 EUR</b>
2021: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 8</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-54-1	<b>75,00 EUR</b>
2022: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 9</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-58-9	<b>75,00 EUR</b>

Bestellen Sie direkt beim TK Verlag  
oder unter [books.vivis.de](http://books.vivis.de)

## Paketpreis

**225,00 EUR**  
statt 310,00 EUR



Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Dorfstraße 51  
16816 Nietwerder-Neuruppin  
Tel. +49 3391-45 45-0  
E-Mail: [order@vivis.de](mailto:order@vivis.de)

**TK Verlag**

Für die Frage, ob die *Abfallmineralogie* eine wissenschaftliche Disziplin darstellt, ist festzuhalten, dass die Anwendung von Konzepten und Methoden aus einer Disziplin auf eine andere noch nicht zur Entstehung einer neuen Disziplin führt. Daher ist Abfallmineralogie keine wissenschaftliche Disziplin, sondern eher ein *Forschungsfeld*. Im Unterschied zur Abfallmineralogie haben sich in der Abfallwirtschaft in den letzten Jahren eigenständige Methoden wie z.B. die Stoffflussanalyse [1] oder die Lebenszyklusanalyse [13] herausgebildet, die diese Einstufung eher rechtfertigen. Die wissenschaftliche Einordnung der Abfallmineralogie zeigt Bild 3.

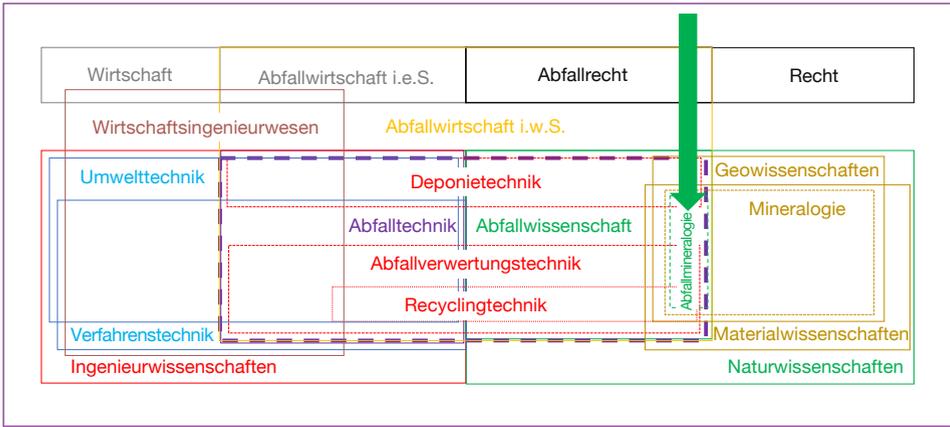


Bild 3: Wissenschaftliche Einordnung der Abfallmineralogie

#### 4. Vom Vorsorgeprinzip zur mineralogischen Bewertung von Sekundärrohstoffen

Die Abfallwirtschaft wird durch den Konflikt zwischen Ressourceneffizienz und Schadstoffausschleusung gekennzeichnet. Das Vorsorgeprinzip besagt nun, dass für komplexe Systeme vorsorgliche Maßnahmen getroffen werden sollen [27, 45]. Dies bedeutet, dass bei Zweifeln, ob das Recycling eines Abfalls schaden könnte, der Deponierung der Vorzug zu geben ist, was einen enormen Ressourcenverlust darstellt. Diese Ressourcen müssen stattdessen im Bergbau gewonnen werden, was mit negativen Auswirkungen auf die Umwelt wie z.B. Staub [38], Grundwasserbelastung [14] und Verlust der Biodiversität [22] verbunden ist.

Das Vorsorgeprinzip ist aber zu überprüfen, wenn neue wissenschaftliche Daten vorliegen [17]. Die Mineralogie liefert diese Daten, die es erlauben, Abfälle zu recyceln, die andernfalls deponiert werden müssten. Aktuell haben mehrere europäische Staaten Grenzwerte für Gesamtgehalte an Schadstoffen festgelegt, um das Recycling von Abfällen zu regulieren [9]. Die Verwendung von Konzepten und Methoden der Mineralogie in der Abfallwirtschaft kann die mineralogische Bindungsform dieser Schadstoffe aufklären und ihre Freisetzung vorhersagen.

Schadstoffe – Asbest und PFAS

Das Konzept, das es erlaubt, dieses Verhalten vorherzusagen, ist das eines lokalen Gleichgewichts, bei dem die Auslaugung von Schadstoffen durch die Löslichkeit und/oder Adsorptionskapazität spezifischer Mineralphasen kontrolliert wird (Bild 4). Dies bedeutet, dass die gelöste Konzentration im Wasser, das mit dem Abfall wechselwirkt, niemals die Gleichgewichtskonzentration mit den koexistierenden Phasen und den adsorbierten Spezies überschreiten kann.

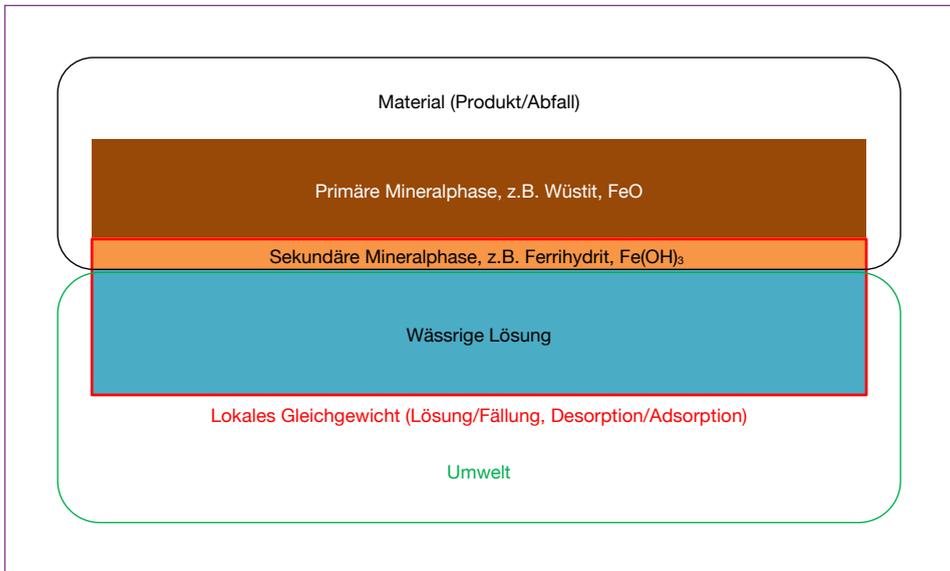


Bild 4: Konzept des lokalen Gleichgewichts zwischen Abfall und wässrigen Lösungen

Modifiziert nach: Höllen, D.; Neuhold, S.; Mudersbach, D.; Schüler, S.; Sommerauer, H.; Griessacher, T.; Dijkstra, J.; van Zomeren, A.; Presoly, P.; Schenk, J.; Pomberger, R.: Möglichkeiten und Grenzen von Modellen zur Vorhersage der Auslaugbarkeit von Stahlschlacken. In: Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 4, S. 205 – 222, 2017.

Erste Arbeiten in diese Richtung [40, 34, 30] zeigen, dass die Auslaugung von Schadstoffen aus rezyklierten mineralischen Abfällen im Straßenbau gering ist, und legen nahe, dass viel mehr mineralische Abfälle recycelt werden könnten als heute, wenn mineralogische Methoden und Konzepte für deren Umweltbewertung angewandt würden. Dies wird durch die Beobachtung unterstützt, dass Umweltverschmutzungen durch das legale Recycling mineralischer Abfälle sehr selten sind, während die Umweltauswirkungen des Bergbaus [19] und der Deponierung [31], die das Alternativszenario darstellen, offensichtlich sind.

Durch die Anwendung mineralogischer Konzepte und Methoden kann die Abfallgesetzgebung auf Grenzwerte für Feststoffgehalte von Schadstoffen verzichten, sich auf die Eluatkonzentrationen und mineralogische Analysen beschränken und damit eine höhere Recyclingquote mineralischer Abfälle ermöglichen.

Eine Zusammenfassung der Anwendung mineralogischer Methoden in der Abfallwirtschaft liefert Tabelle 1:

Tabelle 1: Mineralogische Methoden und ihre Anwendung in der Abfallwirtschaft

Mineralogische Methode	Ergebnis	Abfallwirtschaftliche Anwendung
Röntgendiffraktometrie	Phasenbestand	Entwicklung von Aufbereitungsschemata aufgrund der mineralspezifischen Trennmerkmale
Polarisationsmikroskopie	Gefüge, Phasenbestand	Ableitung des erforderlichen Zerkleinerungsgrades aufgrund der Größe der einzelnen Phasen
Elektronenstrahl-mikrosonde	Chemische Zusammensetzung einzelner Mineralphasen	Mineralogische Bindungsform von Wert- und Schadstoffen
Röntgennahkanten-absorptionsspektroskopie	Wertigkeit von Cr, As und V	Bewertung der Mobilität und Toxizität potentieller Schadstoffe
Sekundärionenmassen-spektroskopie	Elementverteilung von Ultrapurelementen	Mineralogische Bindungsform von Wert- und Schadstoffen

## 5. Ausblick

Die Bedeutung der Abfallmineralogie ist in den letzten Jahren zunehmend erkannt worden [43]. Eine wesentliche Aussage hierbei ist der Zusammenhang zwischen den Hochtemperaturprozessen der Abfallverbrennung und der Metallurgie, in denen der Phasenbestand mineralischer Nebenprodukte und Abfälle entsteht, und den Wechselwirkungen dieser Materialien mit wässrigen Lösungen bei Umgebungstemperatur. Während mineralische Primärrohstoffe über geologische Zeiträume hinweg entstanden sind und ihre Umweltauswirkungen nicht mehr beeinflusst werden können, werden mineralische Sekundärrohstoffe Tag für Tag neu produziert. Dies eröffnet die Chance, diese Materialien im Sinne eines *Ökodesign mineralischer Nebenprodukte und Abfälle* bereits in ihrem Entstehungsprozess gezielt zu konditionieren, Schadstoffe nachhaltig zu immobilisieren und somit den Zielkonflikt zwischen Ressourceneffizienz und Schadstoffausschleusung aufzulösen [48].

## 6. Quellen

- [1] Allesch, A.; Brunner, P.: Material Flow Analysis as a Decision Support Tool for Waste Management: A Literature Review. In: Journal of Industrial Ecology 19 (5), S. 753 – 764, 2015.
- [2] Allmann, R.: Röntgen-Pulverdiffraktometrie. Berlin, Heidelberg, Springer, 2003.
- [3] Baun, D.; Christensen, T.: Speciation of Heavy Metals in Landfill Leachate: A Review. In Waste Management & Research 22 (1), S. 3 – 23, 2004.
- [4] Bennett, J.; Kwong, K.-S.: Failure Mechanisms in High Chrome Oxide Gasifier Refractories. In: Metallurgical and Materials Transactions A 42 (4), S. 888 – 904, 2011.
- [5] Bond, F.: Third Theory of Comminution. In Mining Engineering 4, S. 484. 1952.
- [6] Breitenstein, B.; Elwert, T.; Goldmann, D.; Haas, A.; Schirmer, T.; Vogt, V.: Froth Flotation of Copper and Copper Compounds from Fine Fractions of Waste Incineration Bottom Ashes. In Chemie Ingenieur Technik 89 (1 – 2), S. 97 – 107, 2017.
- [7] Broekmans, M.; Pöllmann, H.: Applied Mineralogy of Cement & Concrete: De Gruyter. 2018.
- [8] Bulut, G.; Perek, K.; Gül, A.; Arslan, F.; Önal, G.: Recovery of Metal Values from Copper Slags by Flotation and Roasting with Pyrite. In Mining, Metallurgy & Exploration 24 (1), S. 13 – 18. 2007.
- [9] BMLFUW (2015): Recycling-Baustoffverordnung.

- [10] BMLFUW: Deponieverordnung 2008.
- [11] BMNT: Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich. Statusbericht 2019.
- [12] Bundesrepublik Deutschland: Kreislaufwirtschaftsgesetz, 2012.
- [13] Cherubini, F.; Bargigli, S.; Ulgiati, S.: Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration. In: *Energy* 34 (12), S. 2116 – 2123, 2009.
- [14] Darwish, T.; Khater, C.; Jomaa, I.; Stehouwer, R.; Shaban, A.; Hamzé, M.: Environmental Impact of Quarries on Natural Resources in Lebanon. In *Land Degradation & Development* 22 (3), S. 345 – 358, 2011.
- [15] Duckworth, C.; Wilson, A.: *Recycling and Reuse in the Roman Economy*. Oxford University Press, 2020. 496
- [16] Europäisches Parlament und Rat: Richtlinie 2008/98/EC.
- [17] Europäische Kommission: Communication on the Precautionary Principle. COM/2000/0001. 2000.
- [18] Fluet Jr, J.; Badu-Tweneboah, K.; Khatamil, A.: A Review of Geosynthetic Liner System Technology. In *Waste Management & Research* 10 (1), S. 47 – 65. 1992.
- [19] Fugiel, A.; Burchart-Korol, D.; Czaplicka-Kolarz, K.; Smoliński, A.: Environmental Impact and Damage Categories Caused by Air Pollution Emissions from Mining and Quarrying Sectors of European Countries. In *Journal of Cleaner Production* 143, S. 159 – 168. 2017.
- [20] Höllen, D.; Berneder, I.; Capo Tous, F.; Stöllner, M.; Sedlazeck, K.P.; Schwarz, T.; Aldrian, A.; Lehner, M.: Stepwise Treatment of Ashes and Slags by Dissolution, Precipitation of Iron Phases and Carbonate Precipitation for Production of Raw Materials for Industrial Applications. In *Waste Management* 78, S. 750 – 762, 2018.
- [21] Höllen, D.; Neuhold, S.; Mudersbach, D.; Schüller, S.; Sommerauer, H.; Griessacher, T.; Dijkstra, J.; van Zomeren, A.; Presoly, P.; Schenk, J.; Pomberger, R.: Möglichkeiten und Grenzen von Modellen zur Vorhersage der Auslaugbarkeit von Stahlwerksschlacken. In *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle* 4, S. 205 – 222, 2017.
- [22] Khater, C.; Martin, A. (2007): Application of Restoration Ecology Principles to the Practice of Limestone Quarry Rehabilitation in Lebanon. In *Lebanese Science Journal* 8 (1), S. 19 – 29. 2007.
- [23] Kick, F.: *Das Gesetz der proportionalen Widerstände und seine Anwendungen*. 1885. Arthur Felix, Leipzig.
- [24] Kleedorfer, R.: Schotter-Lobby macht im Schlacke-Streit gegen voestalpine mobil. In: <https://kurier.at/wirtschaft/schotter-lobby-macht-im-schlacke-streit-gegen-voestalpine-mobil/51.674.526> [Zugriff am 03.09.2020].
- [25] Kloke, A.: Kreislaufwirtschaft contra Bodenschutz. In *Bodenschutz* (2), S. 47 – 52. 1999.
- [26] Kranert, M.: *Einführung in die Kreislaufwirtschaft*. Wiesbaden, Springer Vieweg, 2017.
- [27] Kriebel, D.; Tickner, J.; Epstein, P.; Lemons, J.; Levins, R.; Loechler, E.; Quinn, M.; Rudel, R.; Schettler, T.; Stoto, M.: The Precautionary Principle in Environmental Science. In *Environmental Health Perspectives* 109 (9), S. 871 – 876. 2011.
- [28] Kurniawan, T.; Chan, G.; Lo, W.-H.; Babel, S.: Physico-chemical Treatment Techniques for Wastewater Laden with Heavy Metals. In *Chemical Engineering Journal* 118 (1), S. 83 – 98, 2006.
- [29] Laner, D.: *Understanding and Evaluating Long-term Environmental Risks from Landfills*. Dissertation. TU Wien, 2011, in: <https://www.wien.gv.at/umweltschutz/nachhaltigkeit/pdf/laner.pdf> [Zugriff am 16.04.2023].
- [30] Lidelöw, S.; Mácsik, J.; Carabante, I.; Kumpieni, J.: Leaching Behaviour of Copper slag, Construction and Demolition Waste and Crushed Rock Used in a Full-scale Road Construction. In *Journal of Environmental Management* 204 (1), S. 695 – 703, 2017.
- [31] Marzouk, M.; Azab, S. (2014): Environmental and Economic Impact Assessment of Construction and Demolition Waste Disposal Using System Dynamics. In *Resources, Conservation and Recycling* 82, S. 41 – 49, 2014.
- [32] Meadows, D.H.; Meadows, D. L.; Randers, J.; Behrens, W.: *The Limits to Growth*: Potomac Associates, 1972.
- [33] Moore, J.; Filipek, K.; Kalenderian, V.; Gowland, R.; Hamilton, E.; Evans, J.; Montgomery, J.: Death metal: Evidence for the impact of lead poisoning on childhood health within the Roman Empire. In: *International Journal of Osteoarchaeology*. 31(5), S. 846 – 856. 2021.

- [34] Nicolae, M.; Vîlcu, I.; Zaman, F.: X-ray Diffraction Analysis of Steel Slag and Blast Furnace Slag Viewing their Use for Road Construction. In *Scientific Bulletin - University Politehnica of Bucharest, Series B* 69 (2), S. 99 – 108. 2007.
- [35] Piantone, P.; Bodéan, F.; Chatelet-Snidaro, L.: Mineralogical Study of Secondary Mineral Phases from Weathered MSWI Bottom Ash: Implications for the Modelling and Trapping of Heavy Metals. In *Applied Geochemistry* 19 (12), S. 1891 – 1904, 2004.
- [36] Piatak, N.; Parsons, M.; Seal, R.: Characteristics and Environmental Aspects of Slag: A Review. In *Applied Geochemistry* 57, S. 236 – 266. 2015.
- [37] Rittinger, P. (1867): *Lehrbuch der Aufbereitungskunde in ihrer neuesten Entwicklung und Ausbildung systematisch dargestellt*. Berlin: Ernst & Korn.
- [38] Sairanen, M.; Rinne, M.; Selonen, O.: A Review of Dust Emission Dispersions in Rock Aggregate and Natural Stone Quarries. In *International Journal of Mining, Reclamation and Environment* 32 (3), S. 196 – 220, 2018.
- [39] Sedlazeck, K. P.; Vollprecht, D.; Müller, P.; Mischitz, R.; Gieré, R.: Impact of an In-situ Cr(VI)-contaminated Site Remediation on the Groundwater. In *Environmental Science and Pollution Research* 27, S. 14465 – 14475. 2020.
- [40] Suer, P.; Lindqvist, J. E.; Arm, M.; Frogner-Kockum, P.: Reproducing Ten Years of Road Ageing—Accelerated Carbonation and Leaching of EAF Steel Slag. In *Science of the Total Environment* 407 (18), S. 5110 – 5118. 2009.
- [41] Tang, J.; Su, M.; Wu, Q.; Wei, L.; Wang, N.; Xiao, E.; Zhang, H.; Wie, Y.; Liu, Y.; Ekberg, C.; Steenari, B.-M.; Xiao, T.: Highly Efficient Recovery and Clean-up of Four Heavy Metals from MSWI Fly Ash by Integrating Leaching, Selective Extraction and Adsorption. In *Journal of Cleaner Production* 234, S. 139 – 149, 2019.
- [42] Tossavainen, M.; Forsberg, E.: The Potential Leachability from Natural Road Construction Materials. In *Science of the Total Environment* 239 (1), S. 31 – 47. 1999.
- [43] Tribaudino, M.; Vollprecht, D.; Pavese, A. *Minerals and Waste*. Cham, Springer, 2023, S. 300
- [44] Tschugg, J.; Öfner, W.; Flachberger, H.: Comparative Laboratory Studies of Conventional and Electrodynamic Fragmentation of an Industrial Mineral. In *BHM* 162 (8), S. 319 – 325, 2017.
- [45] United Nations: *Rio Declaration on Environment and Development*.
- [46] Viczek, S.; Aldrian, A.; Pomberger, R.; Sarc, R.: Origins and carriers of Sb, As, Cd, Cl, Cr, Co, Pb, Hg, and Ni in mixed solid waste – A literature-based evaluation. In *Waste Management* 103, S. 87 – 112. 2020.
- [47] Vogel, C.; Exner, R.; Adam, C.: Heavy Metal Removal from Sewage Sludge Ash by Thermochemical Treatment with Polyvinylchloride. In *Environmental Science & Technology* 47 (1), S. 563 – 567, 2013.
- [48] Vollprecht, D.; Pomberger, R.: Ökodesign von Stahlwerksschlacken durch thermochemische Behandlung zur Erhöhung der Recyclingfähigkeit. In: *BHM* 166 (3-3), S. 137 – 143, 2021.
- [49] Wanka, S.; Münnich, K.; Fricke, K.: Landfill Mining - Wet mechanical Treatment of Fine MSW with a Wet Jigger. In *Waste Management* 59, S. 316 – 323, 2017.
- [50] Wellacher, M.; Kunter, A.: Störstoffmanagement in biogenen Abfällen. In *Waste-to-Resources* 7, S. 626 – 640. 2017.
- [51] Wenk, H. R.; Bulach, A. G.: *Minerals*. Cambridge University Press, 2016.
- [52] Yang, R.; Liao, W.; Wu, P. (2012): Basic Characteristics of Leachate Produced by Various Washing Processes for MSWI Ashes in Taiwan. In *Journal of Environmental Management* 104, S. 67 – 76. 2012.
- [53] Yovits, M.: Information Science: Toward the Development of a True Scientific Discipline. In *American Documentation* 20 (4), S. 369 – 376, 1969.

## Ansprechpartner



**Professor Dr. Daniel Vollprecht**

Universität Augsburg

Lehrstuhlleiter Resource and Chemical Engineering

Institut für Materials Resource Management

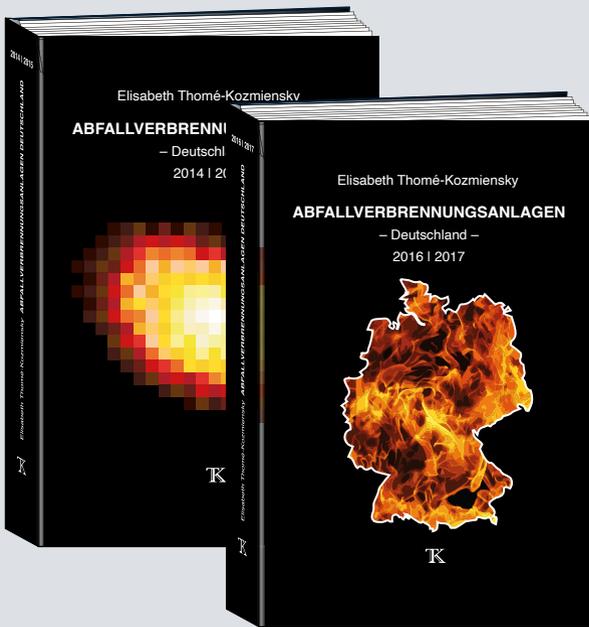
Am Innovationszentrum 8

86159 Augsburg, Deutschland

+49 821 598 69130

[daniel.vollprecht@uni-a.de](mailto:daniel.vollprecht@uni-a.de)

# Abfallverbrennungsanlagen – Deutschland –



**2014 | 2015**

ISBN: 978-3-944310-26-8

Hardcover: 581 Seiten,  
mit farbigen Abbildungen

Preis: **45,00 EUR**

**2016 | 2017**

ISBN: 978-3-944310-38-1

Hardcover: 407 Seiten,  
mit farbigen Abbildungen

Preis: **55,00 EUR**

Herausgeber: Elisabeth Thomé-Kozmiensky

In der aktuellen Ausgabe 2016 | 2017 wird die Dokumentation deutscher Abfallverbrennungsanlagen fortgeschrieben.

Zusammen mit dem ersten Band liegen uns nun zwei Werke vor, die sich gut ergänzen. Für den Leser ergibt sich bei Durchsicht der Bücher ein guter Überblick über den aktuellen deutschen Anlagenpark mit umfassenden Angaben zu Technik und Umweltauswirkungen der thermischen Behandlungsanlagen.

Neue Anlagen sind hinzugekommen – insbesondere sind nun auch Ersatzbrennstoffkraftwerke dokumentiert – die übrigen Anlagendaten sind aktualisiert worden. Alle publizierten Informationen wurden von den Betreibern geprüft und freigegeben.

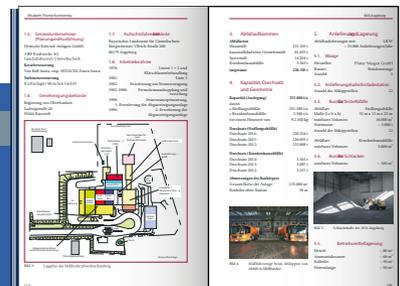
Im aktuellen Buch werden insgesamt 41 Anlagen dargestellt, davon:

- 33 Siedlungsabfallverbrennungsanlagen
- 7 Ersatzbrennstoffkraftwerke
- 1 Sonderabfallverbrennungsanlage.

Die Veröffentlichungen sind als Zwischenbericht zu verstehen, die Arbeiten werden weitergeführt.

**Paketpreis 80,00 EUR**  
statt 100,00 EUR

Bestellen Sie direkt beim TK Verlag oder unter [books.vivis.de](http://books.vivis.de)



Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Dorfstraße 51

16816 Nietwerder-Neuruppin

Tel. +49 3391-45 45-0

E-Mail: [order@vivis.de](mailto:order@vivis.de)

**TK Verlag**

## **LAGA M 23: Implementation Aid for the Disposal of Asbestos-Containing Waste – Guard Rail Hazardous Substances Ordinance and Recycling Concept**

Falk Fabian

The fact that asbestos is still present in the building fabric became quite clear within the national asbestos dialogue in Germany. However, within the circular economy, not least due to the EU Green Deal, it is essential that mineral secondary raw materials can be made usable again through the recycling of construction and demolition waste. Asbestos is a limiting factor in this respect. Construction and demolition waste containing asbestos must not be recycled, but must be disposed of in approved landfills.

The LAGA M 23 has recently been amended as part of the waste legislation. This also includes measures for the effective removal of asbestos while maintaining high-quality recycling of mineral construction and demolition waste. In addition to these waste regulations, there are also specifications from the law on hazardous substances and waste management concepts that promote high-quality recycling. These fit into the LAGA M 23 model and thus form guard rails, also for the consistent implementation of the LAGA M 23.

The contribution is intended to show the crash barriers and their connections to the LAGA M23 and to clarify the need to implement these specifications so that sustainable management of construction and demolition waste can be ensured.

## LAGA Mitteilung 23: Vollzugshilfe zur Entsorgung asbesthaltiger Abfälle – Leitplanke Gefahrstoffverordnung und Verwertungskonzept

Falk Fabian

1.	Hintergrund .....	115
2.	Überarbeitung der LAGA Mitteilung 23 .....	116
3.	Leitplanke <i>Gefahrstoffverordnung</i> .....	118
4.	Leitplanke <i>Abfallverwertungskonzept</i> .....	121
5.	Fazit .....	122
6.	Quellen.....	123

### 1. Hintergrund

Der hochwertigen Bewirtschaftung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen als einem der größten Abfallströme kommt eine tragende Rolle auch im Rahmen der Circular Economy zu. Mit einer jährlichen Menge von etwa 230 Mio. t/a macht dieser Abfallstrom weiterhin über 50 % am gesamten jährlichen Abfallaufkommen auf [14]. Die Beseitigungsquote in Höhe von knapp 12 % sowie die Verwertungsquote von 88 % im Jahr 2020 bieten noch keine Benchmarks dafür, ob qualitativ noch quantitativ alle Potentiale einer hochwertigen Verwertung ausgeschöpft wurden. Auch im Themenfeld des Zirkulären Bauen muss der Einsatz Sekundärer Rohstoffe, insbesondere innerhalb der mineralischen Bereiche, weitere Potentiale erschließen. Neben dem Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen im R-Beton [17, 18] sind auch weitere mineralische Sekundärstoffpotentiale, z. B. wiedergewonnene Gesteinskörnungen aus der Behandlung teerhaltigen Straßenaufbruchs oder der Gewinnung von Kies, Schotter und Sanden aus Bodenwaschanlagen, denkbar.

Hierfür erlangt auch die zum 01.08.2023 nach über 17 Jahren aufreibender Diskussionen und fachlichen Entwicklungen in Kraft tretende Ersatzbaustoffverordnung [6] eine wichtige Schlüsselfunktion, die zentral für eine wirksame und verlässliche Bewirtschaftung von mineralischen Abfällen als Sekundärrohstoffe ist. Das darin integrierte Baustoffrecycling als einem für das Bauwesen dominierenden Stoffstrom soll im besten Fall dazu führen, die wiedergewonnene und aufbereitete Baustoff(grund)substanz direkt wieder in den Wertstoffkreislauf, und dies in mehrfachen Nutzungszyklen, gelangen zu lassen.

Eine systembedingte Grenze besitzt das Baustoffrecycling jedoch. Es muss die Anreicherung von Schadstoffen im Wertstoffkreislauf wirksam verhindern und im idealen Fall bei der Vorbereitung zur Wiederverwendung oder im Recyclingprozess Schadstoffe ausschleusen bzw. aushalten oder unschädlich machen. Bei einem historisch bedingten Schadstoff im Bausektor namens Asbest führt dieses unweigerlich zu erheblichen Herausforderungen. Das Potential der zurückliegenden Anwendungen und Verwendungen von asbesthaltigen Baustoffen wurde auch im Rahmen des seit 2016 geführten Nationalen Asbestdialoges [10] nochmal deutlich.

Erschwerend hinzu kommt, dass Asbest durch seine materialtechnischen Eigenschaften bisher keine in der Praxis am Markt verfügbaren Techniken und Möglichkeiten bietet, es innerhalb eines Recyclingprozesses nachweislich zu zerstören bzw. durch Separation in einem Recyclingprozess auszuhalten. Somit wird deutlich, dass die wirksame Ausschleusung von Asbest aus den zurückliegenden Anwendungen im Bauwerks- und Gebäudebereich eine zentrale Bedeutung für die Nutzbarmachung von mineralischen Sekundärrohstoffen besitzt.

## 2. Überarbeitung der LAGA Mitteilung 23

Die Schlüsselfrage wie es gelingen kann, dass die Asbestthematik nicht zu einem Baustoffrecyclinggrab wird, beschäftigte auch die politischen und technischen Gremien seit geraumer Zeit. In diesem Kontext wurde durch die UmweltministerInnen und UmweltsenatorInnen der Länder im Beschluss zur 92. Sitzung der Umweltministerkonferenz (UMK) im Mai 2019 [19] unter TOP 48 mit Sorge festgestellt, dass bei pauschalierem Herangehen an das Problem das Ziel der Kreislaufwirtschaft beim Bauschuttrecycling in Frage gestellt wird. Hierbei wurden Lösungen gefordert, die eine Kreislaufwirtschaft und den dazu notwendigen Fortbestand des Bauschuttrecyclings ermöglichen, mit denen jedoch gleichzeitig die Ausschleusung von Asbest sichergestellt wird.

Dahingehend wurde die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) in 2019 beauftragt einen länderübergreifenden Erfahrungsaustausch durchzuführen und zum Abschluss der Arbeiten zu berichten. Die LAGA hat hierzu in 2020 einen Bericht zum Erfahrungsaustausch von asbesthaltigen Bau- und Abbruchabfällen [12] veröffentlicht und im Kontext dieser Ergebnisse unter Maßgabe des vorgenannten UMK-Beschlusses einen LAGA Ad-hoc Ausschuss zur Überarbeitung der LAGA Mitteilung 23 *Vollzugshilfe zur Entsorgung asbesthaltiger Abfälle* eingerichtet. Der Ad-hoc Ausschuss hat diesbezüglich im Zeitraum Mai 2020 bis zum November 2022 eine Überarbeitung der LAGA M 23 abschließen können, die eine Verbändeanhörung im April bis Juni 2022 beinhaltete.

Diese Überarbeitung der LAGA M 23 konnte nach den zugehörigen Gremienzustimmungen über den Abfalltechnikausschuss (ATA) und Abfallrechtsausschuss (ARA) sowie der Vollversammlung der LAGA mit UMK-Beschluss Nr. 19/2023 vom 5.5.2023 mit Datum am 08.05.2023 auf der LAGA Seite veröffentlicht werden.

Der Lösungsansatz, der der LAGA M 23 aus dem bestehenden Rechtsrahmen zu Grunde liegt, ist das integrierte Säulenkonzept, das über die Säule *Erkundung vor Abbruch* –

*Selektiver Rückbau*, der Säule *Abfalleinstufung – Asbestfreiheit* bis hin zur Säule *Inputbasierter Ansatz der Recyclinganlage* systematisch, anhand der gesamten Systemkette des Bauschuttrecyclings dazu führt, dass nur asbestfreie Baustoffrecyclingmaterialien in Verkehr gebracht werden [13]. Die abgebildete Systemskizze soll die grundsätzliche Vorgehensweise mit den wichtigsten Rahmenbedingungen anschaulich darstellen.

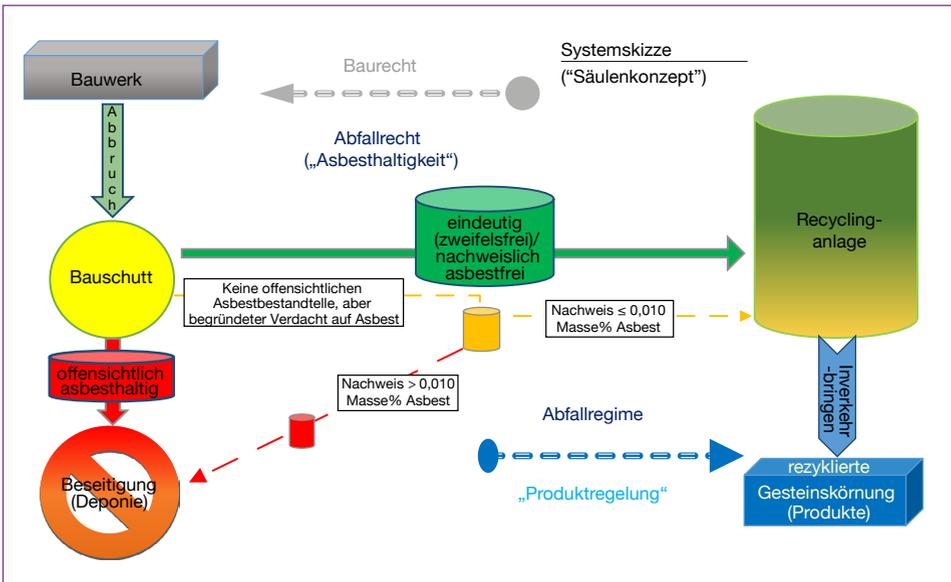


Bild 1: Systemskizze zur Darstellung der Systemschnittstellen als Lösungsansatz für die wirksame Ausschleusung von asbesthaltigen Baustoffen im Bauschuttrecycling

Die LAGA M 23 enthält neben den grundsätzlichen Rahmenbedingungen konkretisierte Fallgestaltungen und Maßgaben, die die vorgenannten Säulen definieren und das Vorgehen im Umgang und der Entsorgung von asbesthaltigen Abfällen ausführlich für die am Entsorgungsvorgang Beteiligten, einschließlich des Abfallanfalls, beschreiben. Der vorliegende Beitrag soll jedoch nicht wiederholend die umfangreichen Inhalte der LAGA M 23 wiedergeben. Vielmehr soll mit diesem Beitrag die Einbettung des in der LAGA M 23 dargelegten Vollzugsrahmens in die Grundsätze der Gefahrstoffverordnung sowie des Abfallverwertungskonzeptes aufgezeigt werden. Diese zwei relevanten Leitplanken ermöglichen eine konsequente und schlüssige Umsetzung der in der LAGA M 23 enthaltenen Vorgaben in der Vollzugspraxis und somit auch gegenüber den in der Abfallbewirtschaftung beteiligten Verantwortlichen. Der Begriff der Leitplanke im Hinblick auf die Asbestthematik wurde bereits im Nationalen Asbestdialog bemüht. Hier allerdings noch in der Form Rahmenbedingungen für Lösungen zur Asbestthematik zu finden. In diesem Beitrag steht die Begrifflichkeit der Leitplanke für einen vorhandenen Ordnungsrahmen, der die Anwendbarkeit der LAGA M 23 nicht nur über die unmittelbar abfallrechtlichen Vorgaben legitimiert.

### 3. Leitplanke *Gefahrstoffverordnung*

Der aktuelle Referentenentwurf der Novelle zur Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) vom 3.3.2023 [11] enthält nach wie vor eine neue Regelung in § 5a, die anlassbedingte Informations- und Mitwirkungspflichten von gewerblichen wie privaten Bauherrn im Hinblick auf Asbestbelastungen vorsieht, insbesondere bei Tätigkeiten an baulichen oder technischen Anlagen, durch die Gefahrstoffe freigesetzt werden können.

Hiermit ist aus Sicht des Autors eine geeignete rechtliche Schnittstelle aufgegriffen worden, die den Grundsatz einer hochwertigen, ressourcenschonenden und vor allem umweltverträglichen Bewirtschaftung von Bau- und Abbruchabfällen im Kontext von Asbestbelastungen sicherstellt und somit eine wesentliche Leitplanke für den abfallrechtlichen Umgang mit entsprechenden Abfällen, so wie es in der LAGA M 23 konkretisiert wurde, bildet.

Die vorgesehene Regelung ist nicht nur konsequent, sondern auch notwendig, da letzten Endes mögliche Gefährdungen nicht nur denjenigen treffen, der die Abfälle faktisch erzeugt, sondern auch alle diejenigen danach, die den Umgang und die Entsorgungskette der Bau- und Abbruchabfälle realisieren. Aus diesseitiger Sicht ist die bereits in der LAGA M 23 verankerte Dokumentationspflicht der Asbesthaltigkeit bzw. der Asbestfreiheit für die Entsorgungswege ein folgerichtiges Instrument zur Sicherstellung, dass keine nachteiligen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt hervorgerufen werden können.

Die Novelle der Gefahrstoffverordnung beinhaltet auch die Verankerung des Risikokonzeptes für Tätigkeiten mit krebserzeugenden Stoffen, u. a. Asbest, das auf risikobasierten Konzentrationswerten aufbaut und deren Definitionen in die GefStoffV mündete. Stoffspezifische Konzentrationswerte sind in der Technischen Regel für Gefahrstoffe (TRGS) 910 *Risikobezogenes Maßnahmenkonzept für Tätigkeiten mit krebserzeugenden Gefahrstoffen* veröffentlicht [4]. Darin werden die Konzentrationswerte durch drei Risikobereiche beschrieben – die Risikobereiche werden dann wiederum mit *Maßnahmenpaketen* verknüpft.

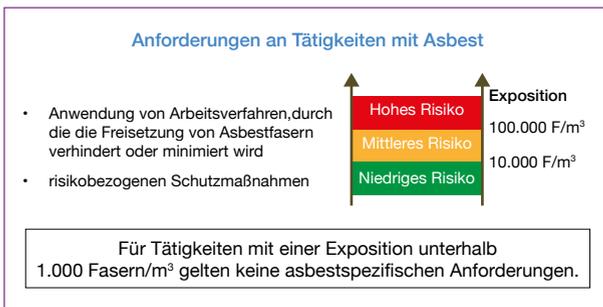


Bild 2:

Darstellung des Risikoansatzes nach TRGS 910 bei Tätigkeiten mit Asbest

Quelle: BG Bau – Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft: „Novellierung der GefStoffV - Regelungen zu Asbest“, Vortrag im Rahmen des 10.DCONex Kongress - Messe Essen, 18./ 19. Januar 2023

Die TRGS 519 [8], die zum Schutz der Beschäftigten und anderer Personen bei Tätigkeiten mit Asbest und asbesthaltigen Materialien bei Abbruch-, Sanierungs- oder Instandhaltungsarbeiten und bei der Abfallbeseitigung dient, konkretisiert diese Maßnahmen im Hinblick Anforderungen nach der Gefahrstoffverordnung und insbesondere deren Anhang I Nr. 2.4 *Ergänzende Vorschriften zum Schutz gegen Gefährdungen durch*

*Asbest* unter Berücksichtigung des Konzeptes der Exposition-Risiko-Beziehung für krebserzeugende Stoffe gemäß TRGS 910 [4]. Beispielhaft ist hier schematisch die Matrix für Tätigkeiten an asbesthaltigen Putzen, Spachtelmassen und Fliesenklebern (PSF) dargestellt. Der Anhang 9 der TRGS 519 [8] enthält konkrete Tätigkeiten und Zuordnungen in diese Exposition-Risiko-Matrix. Eine Aufnahme von spezifischen Tätigkeiten im Rahmen der Bewirtschaftung von Abfällen ist absehbar, sodass auch hier der risikobasierte Ansatz über das Faserfreisetzungspotential konkretisiert werden kann.



Bild 3:

Exposition-Risiko-Matrix nach TRGS 519 – Anlage 9 für Tätigkeiten an asbesthaltigen Putzen, Spachtelmassen und Fliesenklebern (schematisch)

Quelle: BG Bau – Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft: „Novellierung der GefStoffV - Regelungen zu Asbest“, Vortrag im Rahmen des 10.DCONex Kongress - Messe Essen, 18./ 19. Januar 2023

Dieser risikobasierte Ansatz spiegelt sich auch innerhalb der neuen LAGA M 23 wieder, auch wenn hier die Festlegung eines Beurteilungswertes als Konvention auf der Grundlage des UMK-Beschluss 55/2021 [18] erfolgte, bei dem die Umweltministerkonferenz die LAGA im Rahmen der laufenden Arbeiten zur Überarbeitung der LAGA M 23 das Mandat erteilt hat, einen geeigneten Beurteilungswert für den Nachweis der Asbestfreiheit festzulegen. Der Beurteilungswert soll sicherstellen, dass bei Umsetzung einer konsequenten Vorerkundung und gezielter Schadstoffentfrachtung nach dem Stand der Technik bei Abbruch und Sanierung asbestverdächtiger baulicher Anlagen mineralische Bau- und Abbruchabfälle unter Wahrung des Verhältnismäßigkeitsprinzips dem Bauschuttrecycling zugeführt werden können, sodass so hergestellte Recyclingbaustoffe im Hinblick auf die Asbestthematik unbedenklich verwendet werden können.

Dabei wurde analog der Gefahrstoffmerkmale von Asbest ein risikobasierter Bewertungsansatz verfolgt, der in den Vorgaben der Gefahrstoffverordnung und ihrer Novelle sowie der diesbezüglichen Technischen Regelwerke, z. B. TRGS 519 [8] zum Ausdruck kommt. Unter den nachfolgend genannten allgemeinen Rahmenbedingungen:

- der natürlichen Hintergrundbelastung, außerhalb des Einwirkungsbereichs von Emissionen aus Anlagen oder Ablagerungen in Höhe von 100 bis 150 Fasern pro m<sup>3</sup> [2],
- der Reproduzierbarkeit von Untersuchungen im Hinblick auf Unsicherheiten Probenahme (Heterogenität) und den methodenspezifischen Bestimmungs-/Nachweisgrenzen [22] sowie
- der Zulässigkeit des Inverkehrbringens von potenziell asbesthaltigen Gesteinsvorkommen (< 0,1 Masse-% Asbest kein Inverkehrbringungsverbot) gemäß TRGS 517 [9]

erscheint es auch unter Berücksichtigung chemikalienrechtlicher Maßgaben geeignet und verhältnismäßig einen Ansatz zur Beurteilung zur Asbestfreiheit in Form eines *Abschneidekriteriums* zu finden, dass dem gebotenen risikobasierten Ansatz hinreichend Rechnung tragen kann. Hieraus wurde in der LAGA M 23 ein Beurteilungswert von 0,010 Masse-% Asbestgehalt zur *Asbestfreiheit* abgeleitet.

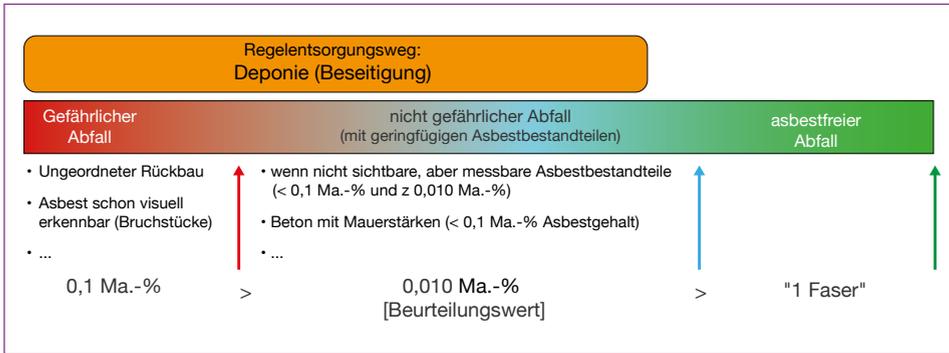


Bild 4: Schematische Darstellung der Einstufungskriterien von Abfällen unter dem Aspekt einer Asbesthaltigkeit sowie des Regelentsorgungsweges von nicht asbestfreien Abfällen

Die Anwendung dieses Beurteilungswertes ist aber nur in spezifischen Fällen erlaubt, sodass insbesondere für Bau- und Abbruchabfälle, die im Rahmen der Säule *Vorerkundung und selektiver Rückbau* sowie den damit im Zusammenhang stehenden Maßnahmen nicht entsprechend Rechnung tragen, nicht in den Anwendungsbereich im Abgleich mit einem Beurteilungswert fallen. Dies beinhaltet unter anderem offensichtlich asbesthaltige Abfälle, bei denen z. B. ein ungeordneter Rückbau bei potenziellem Asbestverdacht erfolgte oder Asbest schon visuell durch Bruchstücke im Abfall erkennbar sind. Für diese grundsätzlich vermeidbar asbesthaltigen (Misch)Abfälle scheidet damit im Regelfall auch eine Einstufung als nicht gefährlicher Abfall nach den Bewertungsgrundsätzen der LAGA M 23, u.a. mangels zuverlässiger Reproduzierbarkeit aus.

Der Beurteilungswert besitzt somit enge Anwendungsgrenzen und kann damit nur für nicht offensichtlich asbesthaltige Bau- und Abbruchabfälle, bei denen gleichwohl eine grundsätzliche Asbestfreiheit, insbesondere durch Vorerkundung, Baujahr und Beschaffenheit nicht zweifelsfrei belegt werden kann, und somit nur im Bedarfsfall Anwendung finden. Nur in diesen Fällen ist eine analytische Bestimmung des Asbestgehaltes zur Beurteilung erforderlich.

Aber auch nicht gefährliche, geringfügig asbesthaltige Abfälle, die durch nicht abtrennbare asbesthaltige Kleinteile, wie z.B. Betonbruch mit Abstandhaltern, so wie auch im Bericht zum Erfahrungsaustausch *Umgang mit Bau- und Abbruchabfällen mit geringen Asbestgehalten* der LAGA [12] identifiziert, gekennzeichnet sind, werden somit bestimmungsgemäß als Abfall zur Beseitigung aus dem Wertstoffkreislauf ausgeschleust und gelangen somit nicht in die Anwendung des Beurteilungswertes zur Asbestfreiheit und somit nicht in den Recyclingprozess von Bau- und Abbruchabfällen.

Diese Bedingung gilt insoweit, dass bisher keine Verfahren verfügbar sind, die eine wirksame und restlose Entfrachtung der asbesthaltigen Bestandteile ermöglichen. Mögliche Perspektiven können aus Sicht des Autors innovative Detektionsverfahren bieten, mit denen es gelingt asbesthaltige Bestandteile aus einem Stoffstrom zuverlässig zu identifizieren und in der Folgestufe aus diesem Stoffstrom auszuwählen.

## 4. Leitplanke *Abfallverwertungskonzept*

Um eine hochwertige Verwertung von Bau – und Abbruchabfällen zu erzielen, muss vor der faktischen Entstehung der Abfälle klar sein, was für Abfälle entstehen können und wie diese in Folge ordnungs- bzw. bestimmungsgemäß zu bewirtschaften sind, im Hinblick auf Abfälle, die potentiell Asbest enthalten können, ohnehin durch die allein beim Abbruch erforderlichen arbeitsschutztechnischen Erfordernisse (siehe Leitplanke *Gefahrstoffverordnung*).

Im Kontext des nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) [5] vorgegebenen Rahmen nach § 1 Abs. 1 i.V.m. § 3 KrWG mit dem Zweck, die Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen zu fördern und den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen sicherzustellen, ist bei allen diesbezüglichen Tätigkeiten, die Vorrangigkeit von Maßnahmen zur Kreislaufwirtschaft bzw. die Hochwertigkeit der jeweiligen Hierarchiestufe von unvermeidbar entstehenden Abfällen nach § 6 Abs. 2 KrWG gesetzlich gefordert.

Dabei ist bei der Auswahl diejenige Maßnahme zu wählen, die den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen unter Berücksichtigung des Vorsorge- und Nachhaltigkeitsprinzips am besten gewährleistet. Somit ergibt sich, dass das Recycling bereits in der Vorbereitung zum Abbruch eines Bauwerkes oder Gebäudes maßgeblich beginnt. Allein die Leitplanke *Gefahrstoffverordnung* verpflichtet zur Erkundung der möglicherweise anfallenden Schadstoffe vor der Abfallentstehung.

Auch wenn die ausdrückliche Pflicht zur Erkundung erst mit der Novelle der Gefahrstoffverordnung justiziabel geschaltet wird, ist die Systematik einer hinreichenden Planung der Entstehung der Abfälle und der sich daraus ergebenden Auswahl der Verwertungsmaßnahme, die eklatant durch den Entstehungsprozess der Abfälle mitbestimmt wird, integrierter Bestandteil des o.g. Kreislaufwirtschaftsgebotes.

Baden-Württemberg hat dieser Maßgabe innerhalb seines Landeskreislaufwirtschaftsgesetzes (LKreiWiG) [1] seit 31.12.2020 durch das darin in § 3 Abs. 4 LKreiWiG geforderte Abfallverwertungskonzept [3] bei baurechtlich verfahrenspflichtigen Bauvorhaben Ausdruck verliehen. Hierbei wurden zur Sicherstellung der Anforderungen des übergeordneten Zieles der Vermeidung und der hochwertigen Verwertung von Bau – und Abbruchabfällen nach §§ 6,7 KrWG, insbesondere zum Themenbereich Asbest die Schadstofferkundung (Rückbaukonzept), die getrennte Erfassung, insbesondere schadstoffhaltiger Bauteile, von Bau- und Abbruchabfällen sowie dem damit gebotenen selektiven/ geordneter Rückbau als nach dem Stand der Technik vorhandene Maßnahmen vorausgesetzt. Diese Maßnahmen sind somit nicht nur als geeignet, sondern als geboten verankert, soweit Bau- und Abbruchabfälle zur Bewirtschaftung anfallen können.

Hierzu wurden Formblätter zur Erfüllung der Anforderungen an das Abfallverwertungskonzept entwickelt und bereitgestellt [16], die insbesondere den Asbestfokus bei der Schadstoffbetrachtung explizit mit aufführen. So ist zum Beispiel beim Abbruch von Gebäuden oder Gebäudeteilen anzugeben, ob mit der Errichtung des Bauwerks bereits vor dem 31.10.1993 begonnen wurde, da somit nicht ausgeschlossen werden kann, dass Asbest zum Einsatz gekommen ist.

Die Umsetzung dieser Maßgaben hat sich trotz anfänglicher Skepsis etabliert. Selbst der Verband der Bauwirtschaft BW hat sich geäußert, dass es Sinn macht, sich frühzeitig mit einem Abfallkonzept zu beschäftigen. *Das kostet Geld, aber rentiert sich in aller Regel.* Man gebe das Geld nur früher aus – und somit besser und kalkulierbarer als bei einer teureren Entsorgung der Abfälle, insbesondere, wenn diese beseitigt werden müssen.

Aus diesen Erwägungen heraus wäre es auch im Hinblick auf die nun ohnehin in der Leitplanke *Gefahrstoffverordnung* notwendige Schadstofferkundung nur folgerichtig, die bisher im Bundesrecht klaffende Lücke im Baurecht zu schließen. Baden-Württemberg hat auf der Grundlage seines Landes-Kreislaufwirtschaftsgesetzes diese Initiative bereits erfolgreich umgesetzt, sodass damit substantielle Verpflichtungen zur Erstellung eines Abfallverwertungskonzeptes und damit inbegriffen auch zur Schadstoff(vor)erkundung an Gebäuden oder Bauwerken abgefordert werden. Offensichtlich ist die Welt in Baden-Württemberg nicht zusammengebrochen. Es bleibt daher spannend wie sich die Verwertungs- und Beseitigungsquoten in diesem Abfallstrom hierdurch im Anfallgebiet Baden-Württemberg entwickeln. Aus Sicht des Autors ist die Prognose selbsterklärend.

## 5. Fazit

Die Umsetzung der in der LAGA M 23 geforderten Vollzugsmaßgaben fügen sich nicht nur im abfallrechtlichen Kontext des Kreislaufwirtschaftsgesetzes, sondern auch in die Rahmenbedingungen der Gefahrstoffverordnung sowie des aus abfallwirtschaftlicher Sicht geforderten Abfallverwertungskonzeptes ein. Beide Leitplanken unterstützen den Lösungsansatz in der LAGA M 23, ein optimiertes Bauschuttrecycling im Hinblick auf eine noch effizientere Ausschleusung asbesthaltiger Baustoffe zu erzielen.

Im Hinblick auf die praxisnahe Umsetzung sowohl für die Schadstofferkundung von asbesthaltigen Materialien und Baustoffen als auch zu entsprechenden Maßnahmen der Getrennthaltung einschließlich des selektiven Rückbaus bieten die bereits in der LAGA M 23 ausgewiesenen einschlägigen Regelwerke, wie z. B. VDI-Richtlinien [21, 22, 23, 24, 25] sowie verschiedene Verfahrensanleitungen und Arbeitshilfen aus technischen Bereichen etablierte Hilfestellungen. In dieser Hinsicht bedarf es somit nur einer konsequenten Umsetzung bei der Abbruchplanung und allen darauf ausgerichteten Maßnahmen sowie auch der Vorbereitung entsprechender Maßnahmen, einschließlich der notwendigen Standardvorgaben bei den zugehörigen Ausschreibungen. Dies umfasst die gefahrstoffrechtlichen Aspekte als auch eine strategische Abfallplanung vor dem unmittelbaren Anfall der Abfälle. Rechtlich verpflichtende Abfallverwertungs- bzw. Entsorgungskonzepte können diese notwendigen Aspekte weiterentwickeln und somit qualifiziert die rechtlichen Vorgaben aus dem Kreislaufwirtschaftsrecht untermauern.

Wenn es der Abbruch- und Recyclingwirtschaft nicht ausreichend gelingt, asbesthaltige Baustoffe durch geeignete strategische Maßnahmen aus dem Massenstrom der Bauschuttabfälle auszuhalten, laufen wir gegebenenfalls nach über 30 Jahren erneut einem möglichen Deponierungsnotstand entgegen.

Die Umsetzung der in diesem Beitrag thematisierten Leitplanken und die strikte Umsetzung der LAGA M 23 können aus Sicht des Autors ein solches Szenario vermeiden. Ein Mehraufwand ist gegenüber dem Status Quo durchaus gegeben. Demgegenüber steht aber eine wirksamere und gezielte Ausschleusung von asbesthaltigen Baustoffen innerhalb der Bewirtschaftung von Bau- und Abbruchabfällen, ohne dabei wertvolle Ressourcen im Baustoffrecycling auf Deponien [7] zu verlieren. Dadurch wird auch der Anreiz zur frühzeitigen Ausschleusung schadstoffhaltiger Bauteile und somit zur Steigerung der Nutzbarmachung von Sekundärrohstoffressourcen gefördert. Dies ist aus Sicht des Autors eine der zentralsten Grundsätze, die das Kreislaufwirtschaftsgesetz verankert.

Darüber hinaus entspricht dieses den Maßgaben der europäischen Umweltpolitik, eine ressourcen-, umwelt- und letzten Endes damit verbunden auch klimaschonende Kreislaufwirtschaft weiter voranzubringen. Die Ausschleusung von Schadstoffen, insbesondere Asbest ist somit nicht nur eine große Herausforderung für das Bauschuttrecycling und die Aufbereitung anderer mineralischer Ersatzbaustoffe, sondern auch eine Chance Stoffkreisläufe wieder schließen zu können und fügt sich in die Europäische Strategie, Maßnahmen für eine asbestfreie Zukunft zu forcieren [15], optimal ein.

## 6. Quellen

- [1] Baden-Württemberg: Gesetz des Landes Baden-Württemberg zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Gewährleistung der umweltverträglichen Abfallbewirtschaftung (Landes-Kreislaufwirtschaftsgesetz – LKrei-WiG) vom 17. Dezember 2020 (GBl. Nr. 46, S. 1233), zuletzt geändert durch Artikel 10 des Gesetzes vom 7. Februar 2023 (GBl. Nr. 2, S. 26), in Kraft getreten am 11. Februar 2023
- [2] Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU): UmweltWissen – Abfall Asbest ([https://www.lfu.bayern.de/buerger/doc/uw\\_9\\_asbest.pdf](https://www.lfu.bayern.de/buerger/doc/uw_9_asbest.pdf)), Stand: April 2018
- [3] Beteiligungsportal Baden-Württemberg: [https://beteiligungsportal.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/beteiligungsportal/UM/200728\\_Gesetzesentwurf-Neuordnung-des-Abfallrechts.pdf](https://beteiligungsportal.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/beteiligungsportal/UM/200728_Gesetzesentwurf-Neuordnung-des-Abfallrechts.pdf), abgerufen am 15.05.2023
- [4] BG Bau – Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft: „Novellierung der GefStoffV - Regelungen zu Asbest“, Vortrag im Rahmen des 10.DCONex Kongress - Messe Essen, 18./ 19. Januar 2023
- [5] Bund: Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG) vom 24. Februar 2012, zuletzt geändert durch Artikel 5 des Gesetzes vom 2. März 2023 (BGBl. I Nr. 56, S. 1), in Kraft getreten am 9. März 2023
- [6] Bund: Verordnung über Anforderungen an den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technische Bauwerke (ErsatzbaustoffV) vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598), Inkrafttreten zum 01.08.2023
- [7] Bund: Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV) vom 27. April 2009, zuletzt geändert durch Artikel 2 der Verordnung vom 30. Juni 2020 (BGBl. I Nr. 32, S. 1533), in Kraft getreten am 4. Juli 2021
- [8] Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS) – Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS): Technische Regel für Gefahrstoffe 519. Asbest: Abbruch-, Sanierungs- oder Instandhaltungsarbeiten (TRGS 519), Ausgabe: Januar 2014, zuletzt geändert und ergänzt: GMBL 2022 S. 269-272 v. 31.3.2022
- [9] Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS) – Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS): Technische Regel für Gefahrstoffe 517. Tätigkeiten mit potenziell asbesthaltigen mineralischen Rohstoffen und daraus hergestellten Gemischen und Erzeugnissen (TRGS 517), Ausgabe: Februar 2013, zuletzt geändert und ergänzt: GMBL 2015 S. 137-138 [Nr. 7] vom 02.03.2015
- [10] Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS): Nationaler Asbestdialog (Stand: 11.Mai 2020) <https://www.bmas.de/DE/Arbeit/Arbeitsschutz/Gesundheit-am-Arbeitsplatz/Nationaler-Asbestdialog/2020-05-11-sachstand-nationaler-asbestdialog.html>, abgerufen am 15.05.2023

- [11] Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS): Verordnung zur Änderung der Gefahrstoffverordnung und anderer Arbeitsschutzverordnungen (Stand: 03.03.2023) <https://www.bmas.de/DE/Service/Gesetze-und-Gesetzesvorhaben/verordnung-zur-aenderung-der-gefahrstoffverordnung-und-anderer.html>, abgerufen am 15.05.2023
- [12] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft-Abfall (LAGA) - Ausschuss für Abfalltechnik: Bericht des Erfahrungsaustausches *Umgang mit Bau- und Abbruchabfällen mit geringen Asbestgehalten* ([www.laga-online.de](http://www.laga-online.de)), April 2020
- [13] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft-Abfall (LAGA) - Ausschuss für Abfalltechnik: LAGA Mitteilung 23 *Vollzugshilfe zur Entsorgung asbesthaltiger Abfälle* ([www.laga-online.de](http://www.laga-online.de)), Stand: 29.11.2022, veröffentlicht am 08.05.2023
- [14] Destatis: Abfallwirtschaft Kurzübersicht – Abfallreihe - Abfallbilanz 2020 (<https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Tabellen/liste-abfallbilanz-kurzuebersicht.html>), abgerufen: 15.05.2023
- [15] EU-Parlament: 2019/2182(INL) – Arbeitnehmer vor Asbest schützen - Entschließung des Europäischen Parlaments vom 20. Oktober 2021 mit Empfehlungen an die Kommission zum Schutz an Arbeiter aus Asbest und Forderung einer Europäische Strategie zur Entfernung von Asbest (ESRAA) – EU-Kommission stärkt Schutz vor Asbest ([https://germany.representation.ec.europa.eu/news/eu-kommission-starkt-schutz-vor-asbest-2022-09-28\\_de](https://germany.representation.ec.europa.eu/news/eu-kommission-starkt-schutz-vor-asbest-2022-09-28_de)), angerufen am 15.05.2023
- [16] Gewerbeaufsicht Baden-Württemberg: Abfallverwertungskonzept nach LKreiWiG (<https://gewerbeaufsicht.baden-wuerttemberg.de/abfallrecht-formulare>), abgerufen am 15.05.2023
- [17] LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg: <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/blog/-/blogs/neues-von-der-baustelle-recycling-beton-herstellung-wird-vor-ort-besichtigt>, abgerufen am 15.05.2023
- [18] Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg: Ressourcenschonender Beton (R-Beton) (<https://um.baden-wuerttemberg.de/de/umwelt-natur/abfall-und-kreislaufwirtschaft/kreislaufwirtschaft/wertstoffe-aus-abfaellen/rc-beton/>), abgerufen am 15.05.2023
- [19] Umweltministerkonferenz: Protokoll zur 92. UMK Sitzung in Hamburg am 10.5.2019 ([https://www.umweltministerkonferenz.de/documents/protokoll-92-umk\\_1560263808.pdf](https://www.umweltministerkonferenz.de/documents/protokoll-92-umk_1560263808.pdf)), abgerufen am 15.03.2023
- [20] Umweltministerkonferenz: Umlaufbeschluss Nr. 55/2021 vom 09.11.2021 ([https://www.umweltministerkonferenz.de/umlbeschluesse/umlauf2021\\_55.pdf](https://www.umweltministerkonferenz.de/umlbeschluesse/umlauf2021_55.pdf)), abgerufen am 15.03.2023
- [21] Verein Deutscher Ingenieure ([www.vdi.de](http://www.vdi.de)): VDI 3876: 2018-11
- [22] Verein Deutscher Ingenieure ([www.vdi.de](http://www.vdi.de)): VDI 3866 – Blatt 1: 2021-11
- [23] Verein Deutscher Ingenieure ([www.vdi.de](http://www.vdi.de)): VDI 3866 – Blatt 5: 2017-06
- [24] Verein Deutscher Ingenieure ([www.vdi.de](http://www.vdi.de)): VDI 6202 – Blatt 3: 2021-09
- [25] Verein Deutscher Ingenieure ([www.vdi.de](http://www.vdi.de)): VDI 6202 – Blatt 20: 2017-11

## Ansprechpartner

### Dipl.-Ing. Falk Fabian

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft  
Baden-Württemberg  
Technischer Referent  
Referat 26 – Kreislaufwirtschaft: Infrastruktur, biogene Wertstoffe,  
Baustoff-Recycling  
Kernerplatz 9  
70182 Stuttgart, Deutschland  
+49 711 126 2673  
[falk.fabian@um.bwl.de](mailto:falk.fabian@um.bwl.de)





Wir widmen uns aktuellen verfahrens- und anlagentechnischen sowie politischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Themen, soweit sie die Abfall- und Kreislaufwirtschaft und die Energie- und Rohstoffwirtschaft betreffen. Unsere Aufgabe sehen wir in der Kommunikation zwischen Politik, Verwaltung, Wirtschaft, Technik und Wissenschaft.

## Wir geben seit fünfzig Jahren Fachbücher zu zahlreichen Themen des technischen Umweltschutzes heraus:

- Thermische Abfallbehandlung & energetische Verwertung
- Dokumentation von Abfallverbrennungsanlagen
- MBA & Ersatzbrennstoffe
- Recycling & Rohstoffe
- Mineralische Nebenprodukte & Abfälle
- Abwasser & Klärschlamm
- Strategie & Umweltrecht
- Immissionsschutz
- Biologische Abfallbehandlung...



Insgesamt sind bislang bei uns etwa zweitausend Fachbeiträge erschienen, die in ihrer Gesamtheit einen guten Überblick über technische, wirtschaftliche, rechtliche und politische Entwicklungen geben. In Kürze stellen wir unsere Wissensplattformen online für die Sie zeitlich befristete Zugriffslizenzen erwerben können.

Bestellen Sie direkt beim TK Verlag oder unter [books.vivis.de](http://books.vivis.de)

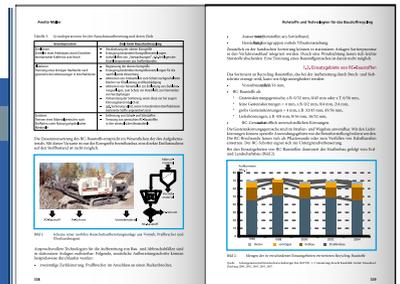
Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Dorfstraße 51

16816 Nietzwerder-Neuruppin

Tel. +49 3391-45 45-0

E-Mail: [order@vivis.de](mailto:order@vivis.de)



## Geogenic Trace Levels of Asbestos and Asbestos-Like Minerals in Building Materials

Werner Wruss, Michael Kochberger, Christoph Sutter, Oliver Mann and Klaus Wruss

Based on a planned reduction of the occupational exposure limit for asbestos in indoor air to 1,000 fibers per cubic meter ( $F/m^3$ ) in European legislation, relevant questions arise from the perspective of asbestos analysts and experts. These questions concern the achievable detection limits in asbestos bulk analysis, asbestos fiber analysis in indoor air, and the evaluation of inorganic bio-persistent fibers. The national regulations in Austria (BAWP 2023) and Germany (LAGA 23) define asbestos bulk content levels below which materials, particularly waste, can be referred to as *asbestos-free*. However, these asbestos bulk content levels (0.008 wt.-% or 0.01 wt.-% asbestos content) still correspond to asbestos concentrations that can occur in construction chemicals despite the asbestos ban, as according to REACH Regulation 1907/2006, raw materials that are added as fillers in construction chemicals up to 10 % may have an asbestos content of up to 0.1 wt.-% when placed on the market. These geogenic asbestos content levels, apart from traces of chrysotile in limestones, mostly consist of amphibole asbestos. Amphibole asbestos has a significantly higher carcinogenic potential than white asbestos. Comparing the limit values for asbestos fiber content in indoor air under real conditions during grinding or small-scale renovation works is methodologically complex due to the accompanying massive dust development, particularly regarding obtaining a valid measurement result for 1,000  $F/m^3$  asbestos in indoor air. A corresponding asbestos bulk content measurement in construction chemicals with this asbestos concentration would require a detection limit below the currently prescribed limit of 0.001 wt.-% asbestos content. At these trace levels, material identification based on elemental distribution also has multiple degrees of freedom. However, this trace analysis in air measurements and bulk content measurements for asbestos is mostly required only during renovation works, which is why a two-step approach to the assessment of pollutants in buildings is being discussed. In the first step, suspicions and potential asbestos occurrences are investigated. If renovation work involving small-scale abrasive treatment of the building structure is planned, a risk assessment of asbestos emissions based on analyses with reduced detection limits must be conducted.

## Geogene Spurengehalte von Asbest und asbestähnlichen Mineralien in Baumaterialien

Werner Wruss, Michael Kochberger, Christoph Sutter, Oliver Mann und Klaus Wruss

1.	Grundlagen.....	128
1.1.	Problemstellung.....	128
1.2.	Begriffsdefinition – Asbest .....	130
1.3.	Bautechnische Nutzung – Asbestgesamtgehalt .....	130
1.4.	Umwelthygienische Betrachtung.....	131
2.	Regelwerke .....	132
3.	Mineralogie .....	134
4.	Analytik .....	135
5.	Diskussion.....	136
6.	Ausblick.....	137
7.	Quellen.....	138

Ausgehend von einer geplanten Reduktion des Arbeitsplatzgrenzwertes von Asbest in der Raumluft auf  $1.000 \text{ F/m}^3$  in der europäischen Legislative, ergeben sich aus Sicht des Asbestanalytiker und des Gutachters relevante Fragestellungen. Diese Fragestellungen betreffen die zu erreichenden Nachweisgrenzen bei der Asbestgesamtgehaltsanalytik, bei der Asbestfaseranalytik in der Raumluft und hinsichtlich der zu bewertenden anorganischen biounlöslichen Fasern. Die nationalen Regelwerke in Österreich (BAWP 2023) und Deutschland (LAGA 23) definieren erstmalig Asbestgesamtgehalte, bei deren Unterschreiten das Material insbesondere der Abfall als *asbestfrei* angesprochen werden kann. Diese Asbestgesamtgehalte (0,008 Ma.-% bzw. 0,01 Ma.-% Asbestgesamtgehalt) liegen jedoch bereits in Größenordnungen an Asbestgehalten, welche nach wie vor trotz Asbestverbot in Bauchemikalien vorkommen können, da gemäß REACH-Verordnung 1907/2006 Rohstoffe, welche bis zu 10 % in Bauchemikalien als Füllstoffe beigemischt werden, mit einem Asbestgesamtgehalt von bis zu 0,1 Ma.-% in Verkehr gebracht werden dürfen. Diese geogenen Asbestgesamtgehalte sind abgesehen von Chrysotilspuren in Kalken meist Amphibolasbest. Amphibolasbest besitzt ein relevant höheres kanzerogenes Potential als Weißasbest. Grenzwertvergleichsmessungen auf den Asbestfasergehalt in der Raumluftunter unter Realbedingungen bei

schleifenden oder kleinteiligen Renovierungsarbeiten sind wegen der begleitenden massiven Staubentwicklung insbesondere hinsichtlich eines validen Messwertes von  $1.000 \text{ F/m}^3$  Asbest in der Raumluft methodisch komplex. Eine mit diesem Asbestgehalt korrespondierende Asbestgesamtgehaltsmessung in den Bauchemikalien müsste eine Nachweisgrenze unter der momentan vorgegebenen Nachweisgrenze von  $0,001 \text{ Ma.-%}$  Asbestgesamtgehalt aufweisen. Bei diesen Spuren besitzt auch die Materialidentifikation basierend auf der Elementverteilung mehrere Freiheitsgrade. Diese Spurenanalytik bei den Luftmessungen und Gesamtgehaltsmessungen auf Asbest ist jedoch weitgehend nur bei Renovierungsarbeiten gefordert, weshalb ein zweigeteilter Ansatz bei der Schadstoffbefundung von Bauwerken diskutiert wird. Im ersten Schritt werden die Verdachtsmomente erhoben und allfällige Asbestvorkommen erhoben. So Renovierungsarbeiten mit kleinteiliger schleifender Bearbeitung der Bausubstanz geplant sind, muss eine Risikobewertung der Asbestemissionen basierend auf Analysen mit reduzierten Nachweisgrenzen erfolgen.

## 1. Grundlagen

### 1.1. Problemstellung

Die Entschließung des Europäischen Parlaments vom 20. Oktober 2021 mit Empfehlungen an die Kommission zum Schutz der Arbeitnehmer vor Asbest (2019/2182(INL)) sieht eine Reduktion des Arbeitsplatzgrenzwertes auf  $1.000 \text{ F/m}^3$  in der Raumluft vor [5].

Es ist bei Fragen der Umwelthygiene unbestrittenes Ziel der technischen Entwicklung, dass im Zuge des wissenschaftlichen Fortschrittes Substanzen-insbesondere kanzerogene Substanzen -sukzessive präzisere Bewertungen ihrer ökotoxischen Wirkungen erfahren. Diese präziseren Bewertungen führen im weitesten Bereich zu Verschärfungen bezüglich deren zulässigen Gehalten in der Umwelt und der Bewertung hinsichtlich der zulässigen Exposition insbesondere von Menschen durch diese Substanzen (emissionsseitig und immissionsseitig) verbunden mit Vorgaben oder Verboten hinsichtlich des Inverkehrbringens.

Pestizide, welche über Jahre unbedenklich angesehen wurden, werden wegen ihrer kanzerogenen Wirkung EU-weit verboten. Persistente organische Schadstoffe erhalten immer geringere Grenzwerte hinsichtlich deren zulässigen Gehalte in der Umwelt. Der kanzerogene Asbest, die *Wunderfaser* der Nachkriegsjahre wurde ebenfalls mit fortschreitendem Stand der Technik und Umwelthygiene immer kritischer gesehen. Die zulässigen Arbeitsplatzkonzentration von Asbestfasern in der Raumluft haben in den letzten Jahren Reduktionen von  $100.000 \text{ F/m}^3$  über  $10.000 \text{ F/m}^3$  bis zum jetzigen von der EU angestrebten Grenzwert von  $1.000 \text{ F/m}^3$  erfahren [5].

Diese massive Reduktion der zulässigen Emissionen in die Raumluft geht naturgemäß fachlich technisch mit einer Reduktion der geforderten Bestimmungsgrenzen von Asbestgesamtgehalten in den Materialproben, welche das Freisetzungspotential der Emissionen bei Bearbeitung asbesthaltiger Materialien beschreiben können, einher.

Demnach ist es 2023 Stand der Technik, Asbest in Materialproben – insbesondere in Putzen, Spachtelmassen und Fliesenkleber mit einer Bestimmungsgrenze von 0,001 Ma.-% und darunter zu bestimmen (siehe hierzu auch die VDI 6202- 3).

Bei diesen Gehalten führt in der entsprechenden Rasterelektronenmikroanalytik (welche nur geringste Teile einer Probe naturgemäß erfassen kann) bereits das Auffinden einer einzigen Faser zum Erreichen dieser Bestimmungsgrenze von 0,001 Ma.-%.

Diese o.a. Faser ist gem. VDI 3866 Blatt 5 Anhang B (2019) z.B. eine Faser mit einem Durchmesser von 1  $\mu\text{m}$  und einer Länge von 5  $\mu\text{m}$ . Diese Faser hat bei einer angenommenen Dichte von 3  $\text{g}/\text{cm}^3$  ein Gewicht von  $10^{-5}$   $\mu\text{g}$ . Bei einer Aufbereitung gem. VDI 3866 Blatt 5 Anhang B (2019) und Herstellung des Suspensionspräperates nach dem Verfahren BIA IFA 7487 werden etwa 0,3  $\text{mg}/\text{cm}^2$  Probe auf dem Messfilter aufgebracht. Bei einer Untersuchung von 0,5  $\text{mm}^2$  werden anteilig etwa 0,001 mg (1  $\mu\text{g}$ ) Probe bewertet. Woraus sich größenordnungsmäßig der Faktor 100.000 oder ein Gehalt von 0,001% ergibt.

Diese Bestimmungsgrenze im Sinne von 1 Faser (0,001 Ma.-%) ist nun dahingehend sinnvoll, da dieser Gehalt einen Asbestgehalt in Materialproben von 10  $\text{mg}/\text{kg}$  Bauchemikalie repräsentiert, welcher wiederum bei kleinteiliger schleifender Bearbeitung – so analog zur Fachliteratur (siehe TRGS 517 Anlage 2 Verfahren 2) etwa 0,1 % bis 1 % des Materials in einatembare Stäube zerkleinert wird – in Form von WHO – Fasern als einatembare Staub freigesetzt wird.

Daraus ergibt sich, dass bei Massegehalten an Asbest von 0,001 Ma.-% oder eben einer analytisch aufgefundenen Faser in Bauchemikalien bei kleinteiligem schleifendem Bearbeiten jedenfalls Emissionen von über 10.000  $\text{F}/\text{m}^3$  zu erwarten sind (siehe Expositions-Risiko-Rechner auf [asbest-beratung.de](http://asbest-beratung.de)).

Es stellen sich die Fragen, ob man eine Gefährdungsabschätzung auf die fünf Amphibol-asbeste und den Serpentin-asbest Chrysotil beschränkt und weshalb weitere bereits als *kanzerogen* eingestufte Fasern nicht berücksichtigt werden bzw. andere biounlösliche lungengängige Fasern nicht beurteilt werden.

Nachdem nun in den Regelwerken in Deutschland und Österreich, wo im BAWP 2023 (Bundesabfallwirtschaftsplan) der Großteil der deutschen Regelungen übernommen wurde, wie o.a. Grenzwerte für Asbestgesamtgehalte weit unter dem Gefährlichkeitskriterium vom 0,1 Ma.-% Asbestgesamtgehalt (HP 7) formuliert wurden, stellt sich die Frage, wie aus der Sicht eines Analysenlabors und/oder eines Gutachters mit diesem Umstand umzugehen ist.

Die Empfehlung [5] zum Schutz europäischer Arbeitnehmer vor Asbest, welche einen Arbeitsplatzgrenzwert (level of protection) von 1.000  $\text{F}/\text{m}^3$  vorsieht, wurde vom Rat der Europäischen Union angenommen. Bei einem Faserfreisetzungspotential vom Faktor 100 bis 1.000 würde dieser Grenzwert die Notwendigkeit von Gesamtgehaltsbestimmungen mit Nachweisgrenzen sogar unter 0,001 Ma.-% Asbestgesamtgehalt notwendig machen.

## 1.2. Begriffsdefinition – Asbest

Asbest ist eine technisch – rechtliche Sammelbezeichnung für sechs verschiedene faserförmige Minerale. Unter dieser Bezeichnung werden konventionsgemäß fünf Amphibolminerale (u.a. Blau- und Braunasbest) und der Faserserpentin Chrysotil (Weißasbest) zusammengefasst. In der ISO 22262 finden zusätzlich die asbestiformen Amphibolminerale Richterit und Winchit Erwähnung. Bei allen Mineralen handelt es sich um natürlich gebildete Silikate, die entweder den Band-/Doppel-Kettensilikaten (Amphibolasbest) oder den Schichtsilikaten (Serpentinasbest) zugehörig sind. Die Fasern des Serpentinastes (Chrysotil) sind in der Regel länger und flexibler als die der Amphibolasbeste, die generell gerade, kürzer und steifer sind. Aufgrund der vielen unterschiedlichen mineralabhängigen Eigenschaften (u.a. Temperaturbeständigkeit, gut Isoliereigenschaften) der Asbestminerale wurde etwa 3.000 bis 3.500 verschiedene asbesthaltige Produkte erzeugt.

## 1.3. Bautechnische Nutzung – Asbestgesamtgehalt

Die Allgemeine Unfallversicherungsanstalt in Österreich formuliert im Leitfaden M.plus 267 (2018) [10] folgendes über die generelle und bautechnische Nutzung von Asbest:

Mit Asbest muss praktisch in allen vor 1990 erlaubten Verwendungsbereichen gerechnet werden. Auf Grund seiner Eigenschaften wurde Asbest vielfach zur Isolierung in Kraftwerken oder im Schiffsbau, Brandschutz in öffentlichen Gebäuden und Hochhäusern, an Heizungsanlagen, für Fassaden- und Dachverkleidungen und an Kraftfahrzeugen sowie öffentlichen Verkehrsmitteln verwendet. Neben feuerfesten Geweben und Schnüren, Stopf- und Spritzmassen, Asbestpappe und Asbestzement sind auch Drahtnetze, Filter (darunter auch solche von Atemschutzmasken), Dichtungsringe sowie Kupplungs- und Bremsbeläge als potenziell asbesthaltige Produkte zu nennen. In unzähligen Gebäuden, unter anderem in Einfamilienhäusern, die in den Achtzigerjahren des vorigen Jahrhunderts oder davor erbaut wurden, kann Asbest vorhanden sein. Seit 1978 ist die Verwendung von Spritzasbest in Gebäuden verboten. Eine Gefährdung von Personen in Innenräumen kann durch schwachgebundene Asbestprodukte gegeben sein. Mit zunehmender technischer Gebäudeausrüstung steigert sich die Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins von *Altlasten* in Bürohäusern, Großgaragen, Sporthallen, Hallen mit Flachdächern etc.

Diese Aufzählung ist noch durch die Bauchemikalien der PSF-Materialien (Putze Spachtelmassen und Fliesenkleber), welche seit dem VDI-Diskussionspapier 2015 [4] in den Fokus der Asbestspurenbetrachtung gerückt sind und durch Asbestzementkleinteile (z.B. Abstandhalter) zu ergänzen.

Nun ist das Inverkehrbringen von asbesthaltigen Materialien in Österreich seit 1990 und in Deutschland seit 1993 weitestgehend verboten. Jedoch bezieht sich dieses Verbot nach wie vor auf asbesthaltige Materialien/Rohstoffe mit einem Asbestgesamtgehalt von  $> 0,1$  Ma.-%. Auch wenn die beabsichtigte Zugabe von Asbestfasern zu Baustoffen bzw. Bauchemikalien (z.B. Füllstoff und Verstärkungsmittel) nicht mehr stattfindet und die Asbestfasern der Vergangenheit durch alternative Rohstoffe substituiert wurden,

können diese Rohstoffe nach wie vor mit einem Asbestgehalt von maximal 0,1 Ma.-% Asbest in Verkehr gebracht werden. Schon 1985 war dieser Umstand ein Thema. Der Asbestersatzstoffkatalog [1] hält fest, dass [...] zu beachten ist, dass Talkum einen hohen Anteil faserförmiger Produkte in kritischer Abmessung u.a. Asbest enthalten kann [...]. Bei einem Massenanteil von bis zu 10 Ma.-% an Füllstoffen in Bauchemikalien/Baumaterialien würde sich bei einem worst-case Szenario von 0,1 Ma.-% Asbest im Füllrohstoff ein Asbestgesamtgehalt von 0,01 Ma.-% in der Bauchemikalie ergeben. Dieser Asbestgehalt liegt in der Größenordnung der derzeit diskutierten Asbestgesamtgehaltsbegrenzung für die Einstufung *asbestfrei*.

Zu beachten ist hier, dass es sich bei diesen geogenen Asbestgehalten mineralogisch überwiegend um Amphibole handelt, jedoch findet sich auch punktuell Chrysotil in Talkvorkommen.

### 1.4. Umwelthygienische Betrachtung

Die toxikologische Bewertung von Asbest findet sich in unzähligen Publikationen und Fachbüchern. Demnach sei nur festgehalten, dass in Österreich die Anzahl der asbestinduzierten Erkrankungen (anerkannte Berufskrankheiten) nach wie vor zunimmt (Bild 1) [10].

Die Empfehlung an die Kommission zum Schutz der Arbeitnehmer vor Asbest [...] weist darauf hin, dass jährlich weltweit etwa 250.000 Menschen aufgrund der Exposition gegenüber Asbest sterben und weist darauf hin, dass die Anzahl der Todesfälle aufgrund von durch die Belastung mit Asbestfasern verursachten Krankheiten in den letzten Jahren sogar noch gestiegen ist [...].

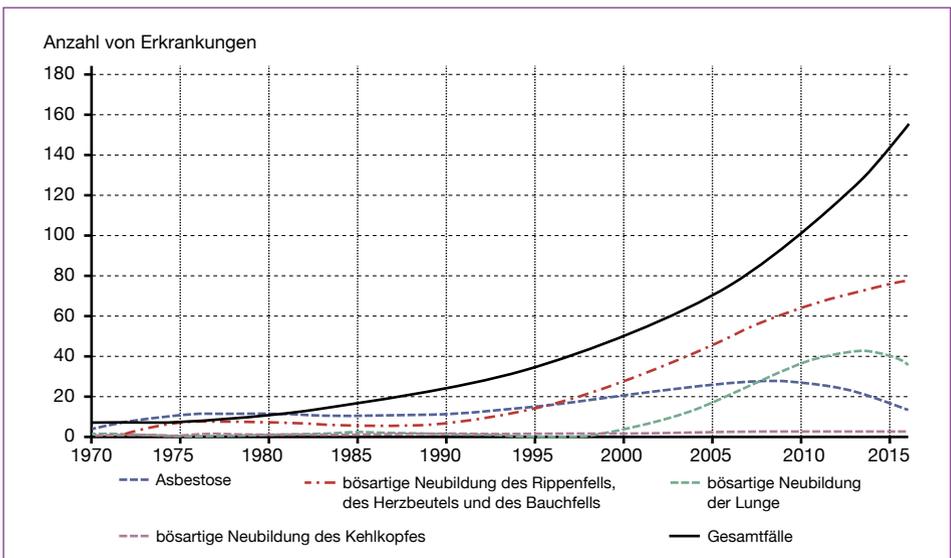


Bild 1: Anzahl asbestinduzierter Erkrankungen in Österreich

Quelle: M.plus 267 – 07/2018 – hep, Richtiger Umgang mit Asbest AUYA

Weiter beinhaltet die Empfehlung an die Kommission die Richtlinie 2009/148/EG zu aktualisieren und das Konsultationsverfahren zur Aktualisierung der Liste der Silikate mit Faserstruktur, die in den Geltungsbereich der Richtlinie fallen, einzuleiten, und in diesem Zusammenhang die Aufnahme von Riebeckit sowie Winchit, Richterit, Fluoredenit und Erionit in die Liste, die bereits Aktinolith, Anthophyllit, Tremolit und Fluoredenit umfasst, zu erwägen (Punkt 29 [5]).

Hierzu ist vom Standpunkt der Kanzerogenität festzuhalten, dass faserförmige Amphibole ein relevant höheres Kanzerogenitätspotential als Chrysotil aufweisen [2]. Von weiteren Mineralen ist die Kanzerogenität bekannt. So ist das Mineral Erionit (Faserzeolith) in der CLP-Verordnung als Kanzerogenität 1A eingestuft. In der TRGS 905 werden u.a. die Mineralfasern der Schichtsilikate Attapulgit, Halloysit oder Sepiolith ebenfalls als kanzerogen eingestuft. In der Literatur werden zusätzlich die krebsauslösenden Wirkungen von Talk [11] beschrieben.

So hat Johnson und Johnson kürzlich (Frühling 2023) eine Zahlung von etwa 9 Milliarden Dollar zur Streitbeilegung wegen allfälliger Krebsgefahren aufgrund von geogenen Asbestgehalten in talkhaltigen Kosmetika angeboten und diese Produktlinie eingestellt [8].

## 2. Regelwerke

In Österreich wurde der BAWP (Bundesabfallwirtschaftsplan) 2023 [3] veröffentlicht. Hier findet sich erstmalig eine Behandlung von Asbestspuren ( $< 0,1$  Ma.-%) und deren Risikobetrachtung.

[...] sind Asbestgehalte in den asbesthaltigen Abfällen von höchstens  $0,1$  Ma.-% bekannt oder zu vermuten, dann ist eine Messung der Asbestemissionen oder eine Gefährdungsabschätzung z.B. im Zuge einer Risikoanalyse durch Grenzwert-Vergleichsmessungen gemäß Grenzwertverordnung 2021 § 28 oder gemäß TRGS 910 *Risikobezogenes Maßnahmenkonzept für Tätigkeiten mit krebs erzeugenden Gefahrstoffen* vom Februar 2014 durchzuführen. Sind keine gesundheitsgefährdenden Emissionen gemessen worden oder zu erwarten, dann ist eine Behandlung als asbesthaltiger Abfall nicht erforderlich. Ein Recycling ist nur dann möglich, wenn der Asbestgehalt  $< 0,008$  Ma.-% beträgt. [...].

In Österreich besteht derzeit keinerlei Verpflichtung den Asbestgesamtgehalt von in Verkehr zu bringenden Rohstoffen zu bestimmen.

In Deutschland ist eine Novellierung der LAGA 23 im Jahre 2023 vorgesehen. Im Entwurf ist hinsichtlich geogener Asbestspuren folgendes festgehalten [9]:

[...] 6.3.3 Der Umgang mit mineralischen Bauabfällen, die geogen bedingt Asbest enthalten:

Die Verwertung von Bauabfällen sowie der Wiedereinsatz von RC-Baustoffen, die jeweils absichtlich zugesetzte Asbestanteile aufweisen, ist grundsätzlich nicht zulässig (Verordnung (EG) 1907/2006, Anhang XVII, Nr. 6 – REACH-Verordnung).

Im Gegensatz dazu lässt das Chemikalienrecht gegenwärtig die Gewinnung von Gesteinen sowie die Verwertung von Bauabfällen und den Wiedereinsatz von RC-Baustoffen zu, sofern deren Asbestanteil geogen bedingt (*nicht absichtlich zugesetzt*) und nicht größer als 0,1 Ma.-% ist (Verordnung (EG) 1907/2006, Anhang XVII, Nr. 6 i. V. m. GefahrstoffV, Anhang II, Nr. 1, Abs. 2).

Da das Gefahrenpotenzial lungengängiger Asbestfasern unabhängig vom Ursprung ist, muss diese Situation aus abfallwirtschaftlicher Sicht äußerst kritisch gesehen werden.

Umso wichtiger ist es, dass alle Akteure die rechtlichen Randbedingungen beachten, unter denen eine Verwertung sowie eine Wiederverwendung von Gesteinen mit natürlichen Asbestgehalten zulässig ist. An erster Stelle seien hier die geltenden Vorschriften des Arbeitsschutzes in Verbindung mit der GefStoffV genannt, im Speziellen die Regelungen der TRGS 517 (*Tätigkeiten mit potenziell asbesthaltigen mineralischen Rohstoffen und daraus hergestellten Gemischen und Erzeugnissen*).

Diese Regelungen beinhalten in Nummer 5.2 (TRGS 517) explizit Anforderungen an die Wiederaufbereitung und Wiederverwertung und somit den Umgang mit Bauabfällen und RC-Baustoffen. Hierbei sind alle Maßnahmen sowie die darauffolgenden Tätigkeiten des Wiedereinsatzes eingeschlossen, unabhängig davon ob diese Materialien die Abfalleigenschaft besitzen oder nicht.

Im Einzelnen schreibt die TRGS 517 u.a. vor, dass

- fachkundig ermittelt und beurteilt werden muss, ob und in welchem Umfang eine Asbestexposition vorliegt,
- Informationen über eine eventuelle Asbestbelastung in der Entsorgungskette eingeholt werden müssen,
- eine Gefährdungsbeurteilung durchgeführt werden muss,
- geeignete Schutzmaßnahmen festgelegt, umgesetzt und laufend auf ihre Wirksamkeit hin überprüft werden müssen.

Diese Pflichten greifen auch dann, wenn es sich um Tätigkeiten mit Abfällen oder RC-Baustoffen mit nur geringen geogen bedingten Asbestbelastungen handelt [...].

Die Asbestfreiheit von Bau – und Abbruchabfällen definiert sich im Entwurf der LAGA 23 im Kapitel 5.1.3. folgendermaßen:

[...] Haufwerke mineralischen Ursprungs, bei denen ein begründeter Verdacht auf Asbest besteht, können nur dann als asbestfrei angesehen werden, wenn eine Beprobung nach den einschlägigen Vorgaben (LAGA PN 98, DIN 19698) und eine Untersuchung nach VDI 3876 stattgefunden hat und der Beurteilungswert von 0,010 Ma.-% unterschritten wird [...].

### 3. Mineralogie

Asbestminerale kommen in den zwei silikatischen Mineralgruppen der Amphibole und Serpentine vor. Die Mineralgruppe der Amphibole hat eine der größten chemischen Variabilität und bildet häufig Mischkristallreihen mit vielen Endgliedern aus. Auch die Serpentinegruppe bildet eine Mischkristallreihe aus. Diese hat aber nicht so eine große Elementvariabilität wie die Amphibole.

Zu den Amphibolasbesten zählen die Minerale Anthophyllit, Amosit (die faserförmige Varietät von Grunerit), Tremolit, Aktinolith und Krokydolith (die faserförmige Varietät von Riebeckit). Die Amphibole bilden typischerweise lang-prismatische bis faserförmige Aggregate, die nur mittels chemischer Analyse eingeteilt werden können. In der Bild 2 sind die mineralogischen Klassifikationsdiagramme für Mg-Fe-Ca-Amphibole und Alkali-amphibole dargestellt, die anhand der chemischen Zusammensetzung definiert werden. In den Klassifikationsdiagrammen sind auch die Mischkristalle eingezeichnet, u.a. das Asbestmineral Aktinolith, ein Mischkristall zwischen den Ca-Mg-Endglied (Tremolit) und den Fe-Mg-Endglied (Ferroaktinolith).

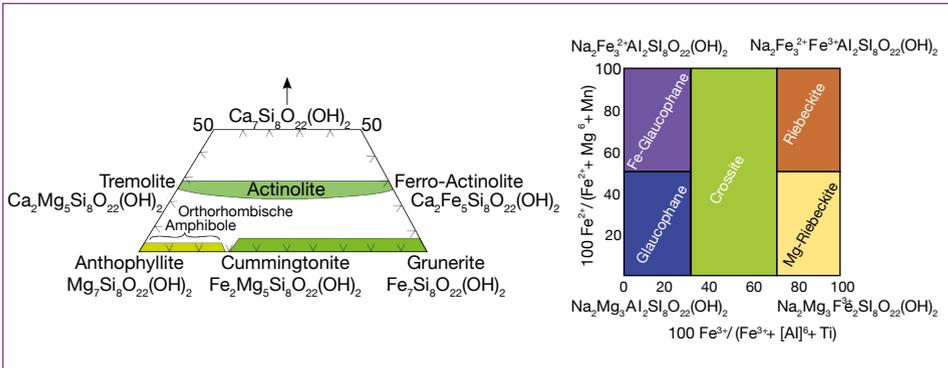


Bild 2: Klassifikationsdiagramme für Mg-Fe-Ca-Amphibole (links) und Alkali-amphibole (rechts)

Quelle: <https://www.alexstreiken.it/english/pluto/amphiboles.php>

Mit der allgemeine Summenformel  $(Mg,Fe,Ni,Al,Zn,Mn)_{2-3}(Si,Al,Fe)_2O_5(OH)_4$  lassen sich die Serpentinminerale beschreiben. Das häufigste Endglied ist mit der Formel  $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$  der Antigorit (Blätterserpentin) bzw. der Chrysotil (Faserserpentin).

Serpentinminerale bilden sich immer sekundär, also als Umwandlungsprodukt, von aluminiumarmen und magnesiumreichen Mineralen, wie Olivin oder Mg-Pyroxenen bei der Metamorphose. Die Amphibole können primär aus einer Schmelze auskristallisieren oder auch bei der Metamorphose sekundär entstehen. Aufgrund der großen chemischen Variabilität der Amphibole wird hier nicht näher eingegangen.

Eine weitere Entstehungsmöglichkeit für beide Mineralgruppen ist bei Bildung von Marmoren. Marmore bilden sich bei der Metamorphose aus Kalksteinen. Die meisten **Kalkgesteine** bildeten sich als See-/Meersedimente und bestehen aus Calcit und/oder Dolomit. Teilweise sind die Ablagerungen mit Quarz oder anderen Silikaten vermischt.

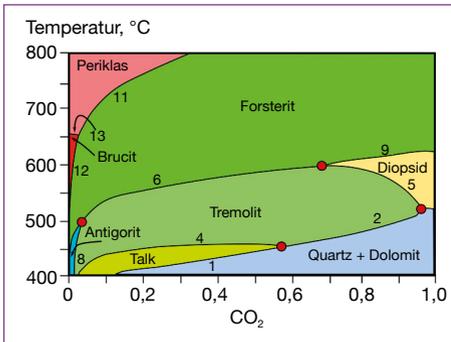


Bild 3: Entstehende Mineralphasen bei der Metamorphose von quarzreichen Dolomiten, es bilden sich in Abhängigkeit von Temperatur und Zusammensetzung Talk, Tremolit, Serpentin (Antigorit), Diopsid, Olivin (Forsterit), Brucit und Periklas

Quelle: <https://www.alexstrekeisen.it/english/meta/tremolitemarble.php>

Bei der Metamorphose dieser Ablagerungen reagieren die Silikate mit dem Kalken und es bilden sich Amphibole (u.a. Tremolit), Talk oder Serpentine (u.a. Chrysotil), wie die Bild 3 von den entstehenden Mineralphasen bei der Metamorphose von quarzreichen Dolomitgesteinen zeigt.

Zusammenfassend lässt die mineralogische Betrachtung der Genese der Asbestminerale den Umstand ersehen, dass viele der derzeit in Verkehr gebrachten Rohstoffe geogene Asbestgehalte in umweltmedizinisch relevanten Spuren aufweisen können.

## 4. Analytik

Die Asbestminerale werden im deutschsprachigen Raum vor allem mittels Rasterelektronenmikroskopie analysiert. Dabei wird die Morphologie und die chemische Zusammensetzung der Asbestminerale bestimmt.

Laut WHO wird ein Partikel als Faser definiert, wenn das Verhältnis von Länge zum Durchmesser größer 3:1 ist. Es werden in den Normen auch andere Länge zu Durchmesser Verhältnisse angegeben (z.B. 20:1 für Asbestfasern - ISO 22262). In Materialproben ist eine Unterscheidung von Partikel und Fasern irrelevant, da es gemäß TRGS 517 und BAWP 2023 unerheblich ist, ob eine kanzerogene Asbestfaser aus einem Partikel oder einer Faser bei Bearbeitung freigesetzt wird.

Weiters gibt es Unsicherheiten bei der Faseridentifizierung mittels Elementzusammensetzung. Für die Einteilung der gefundenen Asbestminerale wird in den einschlägigen Normen für die Asbestidentifizierung fixe Elementzusammensetzungsbereiche angegeben. So wird gemäß VDI 3492 für Chrysotil ein maximaler Aluminiumgehalt von 2 Ma.-% und gemäß IFA 7491 ein Aluminiumgehalt bis zu 3,5 Ma.-% angegeben. Da die Zusammensetzung von den Bildungsbedingungen abhängt, variiert diese mit der Herkunft des Minerals. So besitzt der Chrysotil aus dem Ural einen Aluminiumgehalt von bis zu 5 Ma.-% [12]. Gemäß IFA 7491 wären diese Chrysotilfasern nicht als Asbest einzu-stufen. Solche unpräzisen Aussagen bzgl. der Mineralart können mit der teureren und aufwändigeren TEM-Analysenmethode, wie z.B. in Frankreich vorgeschrieben, beseitigt werden. Die TEM-Analytik bestimmt die Kristallstruktur der untersuchten Faser exakter.

Weiter werden Rohstoffe nach wie vor zum Teil lediglich phasenkontrastmikroskopisch nach VDI 3866 Blatt 4 untersucht. Diese VDI-Richtlinie besitzt eine zumindest für den Grenzwert von 0,1 Ma.-% (HP 7) nicht geeignete Nachweisgrenze.

## 5. Diskussion

Eine europäische Rahmenrichtlinie für nationale Strategien zur Asbestsanierung begrüßt die Renovierungswelle, in der die Renovierung von 35 Millionen Gebäuden bis 2030 angestrebt wird; teilt die in der Mitteilung zum Ausdruck gebrachte Auffassung, dass besonders darauf zu achten ist, dass die Arbeitnehmer, die alte Gebäude renovieren und an Noteinsätzen teilnehmen, vor Asbestexposition geschützt werden. Es ist hierbei vom Ökotoxischen Standpunkt unerheblich, ob eine absichtlich anthropogen verarbeitete WHO – Faser (Bild 4) oder eine rein geogen im Rohstoff der Bauchemikalie vorliegende WHO – Faser (Bild 5) auf das Lungengewebe wirkt.

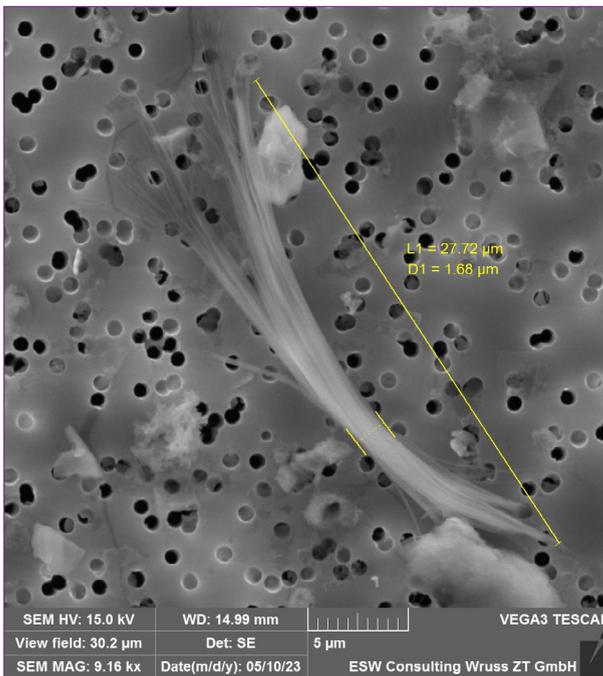


Bild 4:

Anthropogene Chrysotilfaser

Bei schleifender Bearbeitung von asbesthaltigen Baustoffen im Zuge von Renovierungsarbeiten ist nun wie bereits dargelegt ein Faserfreisetzungsfaktor von zwischen 100 und 1.000 in Zusammenschau von Asbestgesamtgehalt und Emissionen in die Raumluft zu ersehen. Demnach korreliert ein Asbestfasergehalt in der Raumluft von 1.000 F/m<sup>3</sup> fachlich technisch bei worst-case Bearbeitung (Schleifen) mit einem Asbestgesamtgehalt von 0,0001 Ma.-% im bearbeiteten PSF - Material. Das würde bedeuten, dass die Asbestgesamtgehaltsanalytik im Vergleich zu der heutigen Spurenanalytik in der Nachweisgrenze um den Faktor 10 abgesenkt werden müsste. Da weiter die VDI 3496 keine Messaufgabe der Asbestfasermessungen in der Raumluft, während der staubgenerierenden Arbeiten kennt und das Verfahren zur getrennten Bestimmung der Konzentrationen von

lungengängigen anorganischen Fasern in Arbeitsbereichen – Rasterelektronenmikroskopisches Verfahren (BGI/GUV-I 5025-46) [9] – bei stark staubbelasteten Filtern die Bestimmungsgrenze von  $1.000 \text{ F/m}^3$  nicht gewährleistet, sind methodische Adaptierungen notwendig.

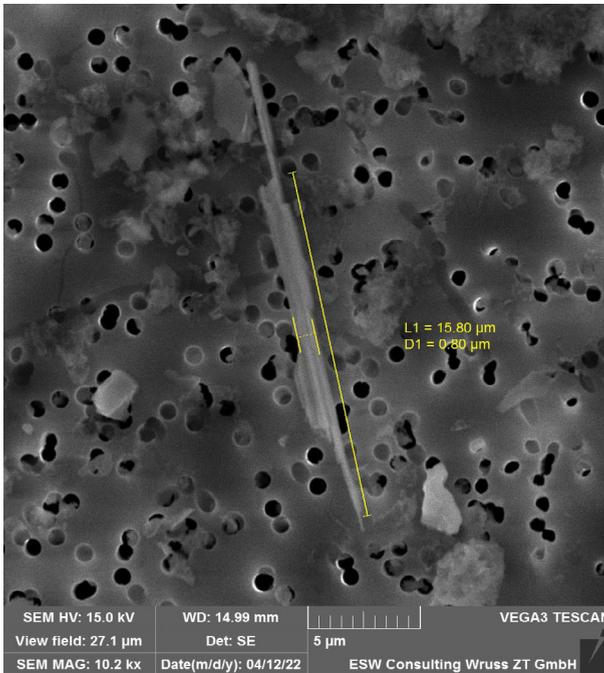


Bild 5:

Geogene Tremolitfaser in PSF

## 6. Ausblick

In Zusammenschau von analytischen Betrachtungen und bestehenden sowie geplanten Grenzwerten der Thematik *Asbest* liegen zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine vollständig zufriedenstellenden Lösungsansätze vor. In Anbetracht der zu erwartenden ressourcenschonenden Renovierungswelle an Gebäuden, wird es notwendig sein den Befundungsprozess der Asbestgesamtgehaltsbestimmungen und der Risikobetrachtungen/Emissionsbestimmungen zweistufig zu gestalten. Die grundlegende Befundung gemäß VDI 6202 Blatt 3 von PSF-Materialien mit einer Asbestspurenanalytik mit einer Bestimmungsgrenze von 0,001 Ma.-% muss nach Planung der Bearbeitungsschritte dieser Baumaterialien/Bauchemikalien vermutlich in einem zweiten Schritt präzisiert werden. So ein schleifendes stark staubendes Verfahren bei der Renovierung angedacht ist oder in weiterer Folge ein feinkörniges Brechen im Zuge von Recyclingarbeiten geplant wird, müssen im Sinne einer umwelthygienisch korrekten Projektumsetzung die analytischen Untersuchungen sowohl der Gesamtgehaltsbestimmung als auch der Raumluftmessungen zur Risikoabschätzung mit geänderten (niedrigeren) Nachweisgrenzen erfolgen. Eine weitere Möglichkeit wäre ein verpflichtender Proberückbau

im Zuge der Risikoabschätzung bei welchem die anfallenden Stäube mit möglichst niedriger Nachweisgrenze auf deren Asbestgesamtgehalt hin untersucht werden. Dies möglicherweise auch mit Einbeziehen weiterer asbestiformen Minerale bei der Quantifizierung.

## 7. Quellen

- [1] Asbestersatzstoffkatalog (Erhebung über im Handel verfügbare Substitute für Asbest und asbesthaltige Produkte – Band 10: Chemische Produkte und Sonstiges) des Deutschen Umweltbundesamtes für die gewerblichen Berufsgenossenschaft e.V.
- [2] Baur, X.; Schneider, J.; Weitowitz, H.-J.; Velasco Garrido, M.: Gibt es Unterschiede in den gesundheitsschädlichen Wirkungen von Chrysotil- und Amphibol-Asbest? *Pneumologie* 2012; 66: 497 – 506
- [3] Bundes-Abfallwirtschaftsplan (BAWP) 2023 (bmk.gv.at)
- [4] Diskussionspapier zu Erkundung, Bewertung und Sanierung, VDI Handlungsfelder Juni 2015
- [5] Entschließung des Europäischen Parlaments vom 20. Oktober 2021 mit Empfehlungen an die Kommission zum Schutz der Arbeitnehmer vor Asbest (2019/2182(INL))
- [6] <https://www.alexstrekeisen.it/english/meta/tremolitemarble.php>
- [7] <https://www.alexstrekeisen.it/english/pluto/amphiboles.php>
- [8] Johnson & Johnson Reaches Deal for \$8.9 Billion Talc Settlement - The New York Times (nytimes.com)
- [9] Mitteilung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 23, Vollzugshilfe zur Entsorgung asbesthaltiger Abfälle – Stand 29.11.2022 veröffentlicht am 08.05.2023
- [10] M.plus 267 – 07/2018 – hep, Richtiger Umgang mit Asbest AUVA
- [11] Neumann, V.; Schulz, F.; Theile, A.; Löseke, S.; Püschel, K.; Tannappel, A. (2011). Fallbericht zu einer seltenen Berufskrankheit: Eine zu Lebzeiten nicht anerkannte Talkose. *Pneumologie*, 65(08), 471– 476. <https://doi.org/10.1055/s-0030-1256286>
- [12] Virta, R. L. (2002). Asbestos: Geology, Mineralogy, Mining, and Uses. Open-file report /. <https://doi.org/10.3133/ofr02149>

### Ansprechpartner



**Professor Dipl.-Ing. Dr. techn. Werner Wruss**

ESW Consulting WRUSS ZT-GmbH

Geschäftsführer

Rosagasse 25 – 27

1120 Wien, Österreich

+43 18125318 0

werner.wruss@wruss.at



**Dipl.-Ing. Michael Kochberger**  
ESW Consulting WRUSS ZT-GmbH  
Ingenieurconsultent für Technische Chemie  
Rosasgasse 25 – 27  
1120 Wien, Österreich  
+43 18125318 17  
michael.kochberger@wruss.at



**Dipl.-Ing. Oliver Mann**  
ESW Consulting WRUSS ZT-GmbH  
Laborleiter  
Rosasgasse 25 – 27  
1120 Wien, Österreich  
+43 18125318 0  
oliver.mann@wruss.at



**Christoph Sutter, Bsc.**  
ESW Consulting WRUSS ZT-GmbH  
Abteilungsleiter REM – Analytik; Mineralogie  
Rosasgasse 25 – 27  
1120 Wien, Österreich  
+43 18125318 0  
christoph.sutter@wruss.at



**Dipl.-Ing. Dr. mont. Klaus Wruss**  
ESW Consulting WRUSS ZT-GmbH  
Rosasgasse 25 – 27  
1120 Wien, Österreich  
+43 18125318 0  
klaus.wruss@wruss.at

## Research Project RECBest – Protect Recycling Material from Asbestos, Collection and Ejection of Asbestos as a Contaminant from CDW to Secure Recycling Material –

Robert Texter and Dirk Pieper

The company Buhck Umweltservices GmbH & Co. KG, supported by the two project partners of the FGGB department - building physics and building construction and the FGMVTA department - mechanical process engineering and processing of the Technical University of Berlin in close cooperation with the associated partner Contrino Consulting are responsible for the chapter 4 in research project RECBest.

During demolition, dismantling or renovation / modernization measures in the construction sector large quantities of mixed mineral waste occur that have to be supplied to an approved recovery or disposal procedure. With increasing exploration of the building materials by experts and appraisers, there is an increasing awareness that numerous of the building materials and chemical construction products installed up to 1993 were potentially mixed with asbestos, so that the resulting dismantling waste must be disposed of.

In the research project, suitable detection and treatment methods were and are being determined and examined in more detail, and concepts are being developed to remove asbestos-containing components from the mineral waste stream that cannot be removed on-site during the remediation work. The aim is to reduce the construction waste to be landfilled, to save valuable landfill volume and to obtain recyclable building materials.

The first results of the real tests for detection on the flood protection wall and the treatment of the broken concrete clearly demonstrate that in the case of investigations by experts, all types and forms of contamination by materials containing asbestos must be intensively examined or explored in order to plan and carry out targeted rehabilitation and to be able to supply the renovated and pollutant-free building with high-quality material recycling.

According to the current state of knowledge, the detection and selection of precast elements containing asbestos in the concrete rubble after the demolition of the building is not sufficiently possible with the sorting technology currently used in the industry.

## Forschungsprojekt RECBest

### – Recyclingmaterial vor Asbest absichern, Erfassung und Ausschleusung von Asbest als Störstoff aus Bau- und Abbruchabfällen zur Recyclingmaterialabsicherung –

Robert Texter und Dirk Pieper

1.	Problemstellung.....	142
2.	Aufgabenstellungen im Forschungsvorhaben .....	142
2.1.	Systematisierung nach Art der Herkunft / des Anfalls.....	142
2.2.	Kategorisierung nach stofflicher Beschaffenheit .....	142
2.3.	Recherche und Erprobung von Detektions- und Erkennungsverfahren .....	143
2.4.	Recherche und Erprobung von Behandlungsverfahren .....	143
3.	Erste Ergebnisse des Forschungsvorhabens RECBest .....	144
3.1.	Systematisierung .....	144
3.2.	Kategorisierung und Differenzierung.....	144
3.2.1.	Kategorisierung und Darstellung der getrennt erfassten Stoffe (Schadstoffgutachten – bekannt asbesthaltig, getrennt aus der Sanierung) .....	144
3.2.2.	Kategorisierung und Darstellung der gemischt erfassten Stoffe (Schadstoffgutachten – bekannt asbesthaltig, aber nicht abtrennbar) .....	144
3.2.3.	Kategorisierung und Darstellung der gemischt erfassten Stoffe (Klein(st)baustellen ohne verpflichtende Schadstoffgutachten – Regelvermutung asbestfrei) .....	146
3.3.	Erprobung verfügbarer Technik / Verfahren .....	147
3.3.1.	Forschungsziele .....	147
3.3.2.	Zerstörungsfreie Detektion .....	148
3.3.3.	Zerstörende Detektion .....	149
3.3.4.	Brechen und Sieben.....	150
4.	Zusammenfassung.....	152

Für das Arbeitspaket 4 im Forschungsvorhaben RECBest zeichnen maßgeblich die Firma Buhck Umweltservices GmbH & Co. KG, unterstützt durch die beiden Projektpartner des Fachgebiets FGGB – Bauphysik und Baukonstruktion sowie des Fachgebiets FGMVTA – Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitung der Technischen Universität Berlin in enger Zusammenarbeit mit dem assoziierten Partner Contrino Consulting, verantwortlich.

## 1. Problemstellung

Bei Abbruch-, Rückbau- oder bei Sanierungs- / Modernisierungsmaßnahmen im Baubereich fallen große Mengen an gemischten, mineralischen Abfällen an, die der weiteren Verwendung oder der Entsorgung zugeführt werden. Mit zunehmender Erkundung der Bausubstanzen durch Sachverständige und Gutachter wächst die Erkenntnis, dass zahlreiche der bis 1993 verbauten Baustoffe und bauchemischen Produkte potenziell mit Asbest versetzt wurden, sodass die daraus erzeugten Rückbauabfälle einer Beseitigung zugeführt werden müssen.

Im Forschungsvorhaben RECBest wurden und werden geeignete Detektions-, Erkennungs- und Behandlungsverfahren ermittelt, näher untersucht und Konzepte entwickelt, um asbesthaltige Anteile aus dem mineralischen Abfallstrom, die im Zuge der Sanierungstätigkeiten vor Ort nicht entfernt werden können, auszuschleusen. Ziel ist die Reduzierung der zu deponierenden Baurestmassen, die Schonung von wertvollem Deponievolumen sowie die Gewinnung wiederverwertbarer Recyclingbaustoffe.

## 2. Aufgabenstellungen im Forschungsvorhaben

### 2.1. Systematisierung nach Art der Herkunft / des Anfalls

Baukörper, die vor 1993 errichtet wurden, werden vor dem geplanten Rückbau oder der geplanten Modernisierung in der Regel durch Schadstoffgutachter auf eine mögliche Belastung mit bautypischen Gefahrstoffen bzw. Schadstoffen wie z.B. Asbest, untersucht. Dabei sind die Grundprinzipien der Untersuchung die Sichtkontrolle und die sensorische Bewertung. Sensorisch auffällige Bauteile und Baustoffe werden beprobt und analysiert.

Die als schadstoffhaltig erkannten Bereiche / Bauteile / Bauabfallarten werden beschrieben und benannt, so dass diese vor Ort während der Rückbauarbeiten von zugelassenen, sachkundigen Unternehmen, den gesetzlichen Bestimmungen entsprechend, aus dem Baukörper entfernt werden können. Ist dies nicht oder nicht zu hundert Prozent möglich, ergeben sich entsprechend zu systematisierende Stoffgruppen zur Entsorgung.

Die nähere Betrachtung der Abfallzusammensetzung in Abhängigkeit von der Herkunft des Bauabfalls ist ebenfalls Gegenstand des Forschungsvorhabens.

### 2.2. Kategorisierung nach stofflicher Beschaffenheit

Durch die damalige Zugabe von Asbest als Materialkomponente und Zuschlagstoff während der Herstellung unterschiedlicher Produkte / Materialien / Baustoffe ergibt sich die Notwendigkeit der Systematisierung nach Art und Herkunft vor allem aber auch die Notwendigkeit einer Kategorisierung im Hinblick auf eine weitere Verwendung bzw. Nutzbarmachung dieser Materialien im Rohstoffkreislauf. Mit Blick auf die verschiedenen, bei Rückbau oder Modernisierung anfallenden, asbestbelasteten Bauabfallarten und Bauabfallqualitäten und deren Bindungsform wurden diese charakterisiert und kategorisiert.

### 2.3. Recherche und Erprobung von Detektions- und Erkennungsverfahren

Des Weiteren wurden und werden Verfahren und Technologien recherchiert und erprobt, die eine Detektion schon im Baukörper bzw. eine spätere Realabtrennung von asbesthaltigen Objekten anhand von Form und/oder stofflicher Zusammensetzung aus einem mineralischen Abfallgemisch möglich machen sollen. In diesem Zusammenhang wurden

- verschiedene Detektionsverfahren näher betrachtet, die eine Lokalisierung asbesthaltiger Objekte im Baukörper ermöglichen könnten, mit Ziel einer gezielten Sanierung vor dem Rückbau von Betonbauwerken.
- Erkennungstechnologien auf Basis von Röntgenstrahlen und NIR-Nahinfraroterken- nung auf ihre Anwendbarkeit auf schadstoffhaltige Abfallströme hin näher untersucht.

### 2.4. Recherche und Erprobung von Behandlungsverfahren

Neben möglichen Erkennungsverfahren wurden und werden im Rahmen des For- schungsvorhabens auch Informationen zu gezielten bzw. anwendbaren Behandlungs- verfahren zusammengetragen.

Ziel ist es, diejenigen Bauabfallqualitäten, die potenziell einer technischen Behandlung zugänglich gemacht werden können, so zu behandeln, dass die enthaltenen, asbest- haltigen Objekte / Anteile separiert werden.

Auch eine Recherche, Untersuchung sowie Tests möglicher Verfahren zur Detektion / Erkennung und Behandlung / Separierung bzw. Abreicherung des Gefahrstoffs Asbest aus der Abfallfraktion sowie im Weiteren die Prüfung und Zusammenstellung der gesetzlich und genehmigungsrechtlich erforderlichen Zulassungsvoraussetzungen derartiger Behandlungsverfahren bzw. -anlagen sind Bestandteil der Untersuchungen.



Bild 1: Haufwerke von Bauschuttabfällen aus dem Abbruch und der Anlieferung bei der Entsorgungsanlage

## 3. Erste Ergebnisse des Forschungsvorhaben RECBest

### 3.1. Systematisierung

Nach eingehender Analyse der in der Praxis gemäß geltendem Recht und einschlägigen Vorschriften üblichen Vorgehensweisen beim Rückbau von Gebäuden, der gutachterlichen Bewertung und der Sanierung von gutachterlich belegten schadstoff- und asbestbelasteten Bauwerken konnten in einem ersten Schritt zunächst drei *grundsätzlich übliche* Arten des Anfalls / der Herkunft mineralischer Bauabfälle herausgearbeitet werden. Daraus ergeben sich grob gefasst drei Anfall- / Erfassungswege.

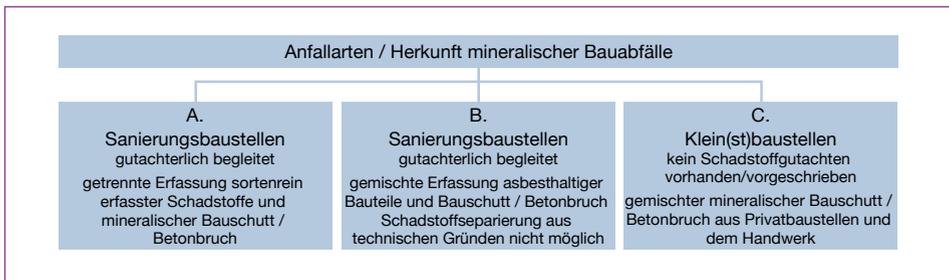


Bild 2: Kategorisierung mineralischer Bauabfälle nach Art des Anfalls / der Herkunft

### 3.2. Kategorisierung und Differenzierung

Die Anfallart A. beinhaltet Materialströme, die bei der Sanierung von Gebäuden bzw. Bauwerken als – schadstoffgutachterlich belegt – asbesthaltig anfallen und als solche getrennt erfasst werden.

#### 3.2.1. Kategorisierung und Darstellung der getrennt erfassten Stoffe (Schadstoffgutachten – bekannt asbesthaltig, getrennt aus der Sanierung)

Die getrennte Erfassung der asbestbelasteten Anteile / Objekte ist nach dem Stand der verfügbaren Technik möglich und erfolgt im Rahmen einer Sanierung bzw. eines separaten Ausbaus direkt an der Anfallstelle. Der so generierte *sortenreine*, asbestbelastete Abfallstrom wird kategorisiert und unter Zuweisung der spezifischen AVV-Nummer direkt in einer Deponie beseitigt.

Da gemäß der Deklaration und der Einstufung als asbesthaltig nach geltendem Recht eine weitere Behandlung unzulässig ist und zudem für den Wirtschaftskreislauf keine sinnvolle Verwendungsmöglichkeit besteht, wurde dieser Stoffgruppen im Rahmen des Forschungsvorhaben keine weitere Aufmerksamkeit geschenkt.

#### 3.2.2. Kategorisierung und Darstellung der gemischt erfassten Stoffe (Schadstoffgutachten – bekannt asbesthaltig, aber nicht abtrennbar)

Die Anfallart B. beinhaltet Materialströme, bei denen durch die gutachterliche Tätigkeit im Rahmen der Sanierung von Gebäuden bzw. Bauwerken asbesthaltige Anteile festgestellt wurden, diese aber nicht ausgebaut oder getrennt erfasst werden können.

Die gemischte Erfassung fällt an, da die asbesthaltigen Anteile / Objekte auf der Baustelle durch eine Sanierung nicht oder nur teilweise abgetrennt werden können. Hierunter fallen im Wesentlichen Verbundstoffe, Baustoffe und Bauteile mit asbesthaltigen Restanhaftungen, asbesthaltige Abfälle aus Schadensereignissen sowie asbesthaltige Baustoffe, deren Ausbau (Separierung) aus technischen Gründen nicht möglich ist. Der so generierte, gemischte Abfallstrom wird bislang als asbesthaltiger Abfall in einer Deponie beseitigt.

In der Regel werden diese Abfälle wie folgt erfasst, kategorisiert und transportiert:

### **Asbesthaltiger, gemischter mineralischer Bauschutt (AVV-Nr. 170605\*)**

Asbest konnte nach bisherigen Erkenntnissen unter anderem in den folgenden Baustoffen nachgewiesen werden (Aufzählung nicht abschließend):

1. Fliesenkleber
2. Mörtelmassen
3. Farben und andere (Schutz-) Beschichtungen
4. Bauklebstoffe
5. Ausgleichsmassen
6. Spachtelmassen
7. Dicht- und Bitumenmassen

Bei allen oben angeführten Baustoffen führt ein Rückbau ohne vorherige Selektion / Sanierung der asbestbelasteten Anteile am bzw. im Baukörper zu einer Einstufung der anfallenden Gesamtmenge als asbesthaltiges Stoffgemisch gemäß AVV-Nr. 17 06 05\*.

Da sich die meisten asbesthaltigen Anteile in nicht weiter definierbaren Mörtel- und Klebmassen befinden, müssten Materialgemische so weit aufgebrochen werden, dass die Mörtel- und Klebmassen frei vorliegen. Praktisch würde es bedeuten, dass der Bauschutt gemahlen werden müsste, um eine saubere Trennung zwischen fest anhaftender Mörtelmasse und asbestfreiem Gestein generieren zu können. Da die Struktur des Gesteins / der mineralischen Baustoffe damit gänzlich verloren gehen würde, kommt ein Brechen dieser Fraktion abschließend nicht in Frage.



Bild 3:

Objekte aus dem gemischten, mineralischen Bauschutt

## Asbesthaltiger Betonbruch (AVV-Nr. 170605\*)

Die Zuordnung zu einem asbesthaltigen Bauabfallstoffstrom ergibt sich beim Betonbruch nach aktuellem Erkenntnisstand im Wesentlichen aus folgenden Gründen:

1. Es wurden Mauerstärken / Schalungshülsen im Betonbauwerk verbaut, die aus asbesthaltigem Faserzement hergestellt wurden.
2. Es wurden Abstandshalter im Betonbauwerk verbaut, die aus asbesthaltigem Faserzement hergestellt wurden.
3. Rauhe Oberflächen, Poren und Lunker wurden mit asbesthaltigen Spachtelmassen geglättet.
4. Zum Ausgleich von Unebenheiten wurden an horizontalen Flächen asbesthaltige Ausgleichsmassen vergossen.
5. Oberflächen wurden mit asbesthaltigen Farben oder anderen, asbesthaltigen Beschichtungen behandelt.
6. Trenn- bzw. Haftsichten zwischen Betonelementen oder Fertigungseinheiten wurden mit asbestfaserverstärktem Baustoff hergestellt.
7. Das Bauwerk wurde mit verlorener Schalung aus Asbestzementplatten errichtet.

In allen oben angeführten Fällen führt ein Rückbau ohne selektives, vorheriges Entfernen der asbestbelasteten Anteile am Baukörper zu einer Einstufung als asbesthaltiges Stoffgemisch gemäß AVV-Nr. 170106 \*.

Asbest findet sich im Betonbruch meist in fest verbauten Fertigelementen. Durch gezieltes Brechen in bestimmte, noch festzulegende Kornbereiche könnte ein nachfolgendes Erkennen (an) einer Bruchkante und eine Ausschleusung der Bruchstücke möglich sein.



Bild 4: Bruchkante entlang einer Schalungshülse

Foto: Balance Ing.- und Sachverständigen-gesellschaft mbH

### 3.2.3. Kategorisierung und Darstellung der gemischt erfassten Stoffe (Klein(st)baustellen ohne verpflichtende Schadstoffgutachten – Regelvermutung asbestfrei)

Die Anfallart C. beinhaltet Materialströme, die gemäß Erzeugerdeklaration und Augenscheinkontrolle als asbestfrei einzustufen sind – Regelvermutung.

Die hier gemischt erfassten Bauabfallströme stammen meist von behördlich nicht anzeige-, melde- oder genehmigungspflichtigen Klein- und Kleinstbaustellen aus

dem Privatbereich oder aus Sammel- bzw. Platzcontainern von Handwerksbetrieben und werden, sofern kein Verdacht oder keine augenscheinlichen Hinweise entgegenstehen, als asbestfrei betrachtet.

In der Regel stammen diese Kleinmengen von Bauvorhaben, bei denen keine gutachterliche Schadstoffuntersuchung stattgefunden hat. Sie werden entweder als Beton- oder Ziegelmaterial sortenrein erfasst oder – häufiger – dem gemischten, mineralischen Bauschutt zugeführt und gelangen nach Aufbereitung zu RC-Baustoffen zurück in den Rohstoffkreislauf.

### 3.3. Erprobung verfügbarer Technik / Verfahren

Beim Wasserversorgungs- und Abwasserentsorgungsunternehmen Hamburg Wasser, als Betreiber der kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen in Hamburg, konnte durch den Kontakt zum assoziierten Projektpartner Contrino Consulting im Jahr 2022 ein Realprojekt zur Erprobung der verfügbaren Technik und Verfahren realisiert werden. Im Rahmen einer Erweiterungsmaßnahme des Betriebsgeländes wurden Teile einer Hochwasserschutzwand abgebrochen. Konkret wurden zwei Teilbereiche einer Hochwasserschutzwand zurückgebaut, die in den 70er und 80er Jahren in Ort betonbauweise hergestellt worden sind. Gemäß Schadstoffgutachten wurden in beiden Teilbereichen jeweils asbesthaltige Fertigbetonobjekte im Baukörper festgestellt, so dass eine Sanierung mit anschließender Deponierung des Rückbaumaterials erforderlich war. In Absprache mit dem Bauherren Hamburg Wasser, dem zuständigen Umweltamt der Hansestadt Hamburg sowie dem Amt für Arbeitsschutz wurden Konzepte ausgearbeitet und abgestimmt, um basierend auf den bisherigen Erkenntnissen des Forschungsprojektes die beiden Teilbereiche zielführend und fachgerecht zurückzubauen. Vor allem die Themen *Detektion im Baukörper*, *selektiver Ausbau* sowie *Brechverhalten* wurden weiter untersucht.

#### 3.3.1. Forschungsziele

Ziele des Forschungsprojekts sind:

- Verifikation von Detektionsmethoden für Schalungshülsen sowie für Abstandshalter,
- Sanierung des Bauwerks durch die Anwendung des Wasserhöchstdruckverfahrens der Firma Kluge,
- Beprobungen und Analysen in verschiedenen Stadien des Rückbaus durch die Firma Wessling,
- Untersuchung der allgemeinen Vorgehensweise beim Rückbau für eine optimierte Ansprache von Abstandhaltern und Spannhülsen/Mauerstärken am Beispiel einer freistehenden Wand,
- Brech- und Siebversuche zum späteren, gezielten Auffinden von asbesthaltigen Bauteilen oder deren Bruchstücken,
- Arbeitsbegleitende Luftmessungen und Material- bzw. Stoffstromanalysen,
- Erfassen von Bruchbildern und Stückigkeiten als Basis für eine spätere, automatisierte Bilderkennung.

### 3.3.2. Zerstörungsfreie Detektion

Unter der Annahme, dass asbesthaltige (oder auch asbestfreie) Fertigelemente, wie Abstandshalter und Mauerstärken, durch ihre Faserstruktur und der in der Regel oberflächennahen Position innerhalb der Betonbauwerke / -teile eine Anomalie innerhalb der Bildgebung erzeugen, wurden diverse mobile Verfahren auf ihre Anwendung im realen Baufeld untersucht.

Die Versuche vor Ort wurden in einem Teilbereich der Hochwasserschutzwand durchgeführt, in dem an mehreren Stellen nachweislich asbesthaltige Abstandshalter an der Oberfläche mit dem bloßen Auge lokalisiert werden konnten.

#### Betonscan

Mit dem Verfahren des Betonscans wird bei Sanierungs- und allgemeinen Bauarbeiten mit Hilfe von Ultraschall die Position der Armierungsstähle im Bauwerk lokalisiert. Unter der Annahme, dass Abstandshalter bei der Errichtung des Bauwerks regelhaft mit einem Rödeldraht an Kreuzungspunkten von Armierungsstählen befestigt wurden, wurde mit Hilfe eines tragbaren Betonscangeräts gezielt nach diesen charakteristischen Punkten gesucht und diese dann in der Bildgebung intensiv näher betrachtet.

Weder die Rödeldrähte an den Abstandshaltern noch die aufgrund der Faserstruktur der Abstandshalter erwarteten Anomalien in der Bildgebung konnten bestätigt werden. Auch konnten die mit dem bloßen Auge an der Wandoberfläche äußerlich sichtbaren Abstandshalter nicht durch den Betonscan angesprochen werden. Bei der Anwendung des Betonscan konnten keine Anhaltspunkte bzw. reproduzierbare Anomalien in der Bildgebung ermittelt werden.

#### Aktive Thermografie

Das Wirkprinzip der aktiven Thermografie liegt in der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeit von Materialien oder Strukturen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde untersucht, ob die kompakten, faserhaltigen und oberflächennahen Abstandshalter sich aufgrund ihrer Struktur und Dichte gegenüber der sie umgebenden Betonstruktur langsamer abkühlen und sich somit – zumindest kurzzeitig – in der Bildgebung abgrenzen und dadurch lokalisieren lassen.

Mit einem mobilen Baustellen-Heizlüfter wurden definierte Abschnitte der Hochwasserschutzwand in unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Intensitäten aufgewärmt und im Anschluss mit einer Wärmebildkamera abfotografiert und direkt ausgewertet.

Die s.g. Lunken an der Bauwerksoberfläche (ehem. Luftporen an der Oberfläche der Schalungselemente beim Vergießen des flüssigen Betons), äußerlich bereits sichtbare Mauerstärken und oberflächennahe Zuschlagsstoffe/Kiesel konnten mit Hilfe der Bildgebung gut erkannt werden. Andere asbesthaltige Abstandshalter oder auffällige Anomalien, die auf Abstandshalter hindeuten könnten, konnten weder erkannt noch hergeleitet werden.

### 3.3.3. Zerstörende Detektion

Zu den zerstörenden Detektionsverfahren zählen in diesem Fall das maschinelle Abfräsen, das manuelle Freistemmen sowie das Brechen der Betonoberfläche mit Hilfe von Baumaschinen.

#### Fräsen

Zu den zugelassenen Verfahren des Fräsens im Bereich der Asbestsanierung zählt das Abfräsen von Spachtelmassen bzw. Putzen im Innenbereich.

Für den Außenbereich sowie speziell für Betonoberflächen gibt es derzeit noch kein behördlich zugelassenes Verfahren, so dass auf das großflächige Fräsen verzichtet werden musste.

#### Freistemmen

Aufgrund der im Rahmen des Betonscannens ermittelten Kreuzungspunkte von Armierungsstählen wurde bei diesem Projekt auf das flächige Freistemmen der Betonoberfläche verzichtet. Stattdessen wurde gezielt an den Kreuzungspunkten nach Abstandshaltern gesucht. Auf diese Weise konnte auf einer Fläche von 9,5 m<sup>2</sup> (1,90 m x 5,00 m) insgesamt fünf Abstandhalter in einem horizontalen Abstand von 0,8 m lokalisiert werden, welches auf der einen Seite der Wand ein Einbauschema für die Abstandhalter bei der Errichtung der Hochwasserschutzwand erkennen lässt.

Dieses oder ein vergleichbares Einbauschema ließ sich in den verbleibenden Bereichen des Bauwerks jedoch nicht reproduzieren.

#### Brechen mittels Abbruchscheren

Das üblicherweise für den Rückbau einer Wand verwendete, hydraulisch betriebene Anbaugerät für Bagger / Greifer sind Abbruchscheren. Diese sind in den unterschiedlichsten Ausführungen am Markt verfügbar.

#### Abbruchscheren – konventioneller Rückbau

Im konventionellen Rückbau wird mit der Abbruchschere in einem Arbeitsgang so viel Druck auf den Beton ausgeübt, dass dieser außerhalb und innerhalb des Armierungskäfigs bricht. Ein gezieltes Nachfassen mit der Abbruchschere sorgt dafür, dass der Armierungsstahl in zwei Arbeitsschritten weitgehend freiliegt. Verbaute Fertigelemente, wie Abstandhalter sind im Anschluss nur noch aus dem Betonbruch heraussuchbar. Ein Entfernen aus dem ursprünglichen Baukörper ist damit unmöglich.

#### Abbruchscheren – dosierter Rückbau

Um ein Entfernen von Abstandhaltern im ursprünglichen Baukörper zu untersuchen, wurde an einem weiteren Teilstück eine vorsichtiger und gezieltere Herangehensweise mit der Abbruchschere gewählt. Dazu hat der Maschinenführer die hydraulische Kraft der Abbruchschere geringer dosiert.

Ziel war es, mit fein dosiertem Druck auf die Wand nur die Oberfläche (bis zur Armierung) zu brechen, um so eine Bruchkante zwischen den Fertigbauelementen und dem Beton zu forcieren, die Abstandshalter freizulegen und somit ein Auffinden mit dem bloßen Auge zu ermöglichen.

Es konnten durch Absuchen der gebrochenen Wand mehrere Abstandshalter lokalisiert werden, die selten ganz, meist gebrochen direkt am Armierungsstahl zu finden waren. Ein Suchen und Auffinden von Bruchstücken der Abstandshalter im gebrochenen Material war in keinem vertretbaren Zeitaufwand-Nutzen-Verhältnis durchführbar. Während der kurzen Suche konnten keine Abstandshalter im Abbruchmaterial gefunden werden.

Es ist festzuhalten, dass diese Vorgehensweise zum Auffinden der Abstandshalter mehr dem Zufall unterliegt als einer gezielten Suche. Die Tatsache, dass die meisten Abstandshalter zerbrochen waren, verlagert die Abtrennung / Ausschleusung dieser Materialien leider in die spätere Behandlung / Sortierung des vorgebrochenen Abbruchmaterials.

Ein komplettes Bauwerk nach diesem Prinzip zurückzubauen erhöht das Auffinden von Abstandhaltern nur dann, wenn deren Positionierung vorab grob ermittelt werden konnte. Ein vollständiges Entfernen der schadstoffhaltigen Objekte ist durch dieses Vorgehen nach erstem Erkenntnisstand jedoch nicht möglich. Bei allen Arbeiten des Rückbaus mittels Abbruchschere wurde gezielt Wasser zur Niederschlagung von Stäuben eingesetzt.

### 3.3.4. Brechen und Sieben

Neben dem Brechverhalten im Baukörper sollte im Rahmen des Forschungsvorhaben die Eignung von unterschiedlichen Brechtechniken zur Aufbereitung des auf der Baustelle vorgebrochenen Rückbaumaterials untersucht werden.

Branchentypische Brecher für solche Aufgabenstellungen sind mit einem Durchsatz von mehr als 100 t/h Betonbruch zu groß dimensioniert. Für das Vorhaben bei Hamburg Wasser wurde aus diesem Grund auf hydraulische Anbaugeräte, sogenannte *Brecherlöffel* zurückgegriffen. Dabei reduziert sich das anzuwendende Brechverfahren auf das Backenbrechen. Andere Brechtechniken, wie Prall- und/oder Kegelbrecher, standen als Anbaugeräte nicht zur Verfügung.

Nach dem Brechvorgang sollte das Brechgut in zwei Siebfractionen gesiebt werden. Der beschriebene Brech- und Siebvorgang stellt das standardisierte Behandlungsverfahren zur Herstellung von Recyclingbaustoffen dar.

Zum Sieben sollte ein so genannter *Sieblöffel* mit einer Siebtrommel zum Einsatz kommen. Leider konnte der Sieblöffel wegen fehlender hydraulischer Komponenten nicht eingesetzt werden.

#### Brechversuch

Für die Behandlungsversuche wurden dem Betonbruch gezielt weitere, gebrochene Objekte, die vorher beim Rückbau sichergestellt wurden, hinzugefügt. Um ihr Auffinden zu erleichtern, wurden diese vorab mittels Markierungsfarbe deutlich kenntlich gemacht.

In den Versuchsdurchgängen wurden etwa 0,5 m<sup>3</sup> des gemischten Abbruchmaterials bei einer voreingestellten Spaltweite von 45 mm durch den Brecherlöffel bearbeitet.

Aus dem gebrochenen Material wurden mittels Handsiebung drei Körnungen separiert und vor Ort deren Massen ermittelt:

- 0 bis 5 mm     60 kg
- 5 bis 12 mm   39,1 kg
- > 12 mm       398,4 kg

Aus der Körnung 0 bis 5 mm wurde eine Materialprobe entnommen, die im Nachgang durch den Projektpartner Firma Wessling analytisch auf Asbest untersucht wurde.

Die Körnung 5 bis 12 mm wurde vor Ort grob nach erkennbaren, farblich markierten Bruchstücken durchsucht. Da nur eine sehr geringe Stückzahl an Bruchstücken gesichtet wurde und Anhaftungen von Erde und Sand ein Erkennen stark erschwerten wurde die Suche abgebrochen und auch hier eine Materialprobe zur weiteren Analyse durch Firma Wessling entnommen.

Das Ergebnis der rein optischen Suche nach markierten Bruchstücken lässt den Schluss zu, dass ein relevanter Teil der Probekörper größer als 12 mm geblieben sein muss.

Die Fraktion > 12 mm wurde daraufhin komplett manuell nach markierten und unmarkierten Bruchstücken von Abstandhaltern und Mauerstärken durchsucht, wobei auch hier die Anhaftungen ein Erkennen deutlich erschwerten. Neben den markierten Bruchstücken wurde lediglich ein weiteres Teil eines Abstandshalters gefunden, welches vor dem Brechvorgang nicht markiert wurde.

Aus den Durchläufen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Die für die Feldversuche auf der Referenzbaustelle eingesetzten Baumaschinen und Anbaugeräte sind allesamt für einen volumenstarken Materialdurchsatz konzipiert. Für das manuelle Auszählen und für das Suchen sind jedoch ausschließlich geringe Volumenströme bis < 0,5 m<sup>3</sup> zielführend.
- Für die Untersuchung von Betonbruchabfällen ist sortenreines Ausgangsmaterial ohne Anhaftungen oder Bodenmaterial zu verwenden. Anhaftungen und Bodenmaterial verfälschen deutlich die Ergebnisse der Suche, der Auszählung und die Sieblinie.
- Bruchstücke von Fertigbauteilen wie Abstandshalter oder Spannhülsen lassen sich zu einem Großteil in den gröberen Fraktionen wiederfinden. Dies schließt aber ein Vorkommen in den feinen Körnungen nicht aus.
- Bei einem Brechspalt beim Anbaugerät von 45 mm lösen sich Fertigteile (Abstandshalter und Mauerstärken) von der sie umgebende Betonmatrix nicht vollständig voneinander ab.
- Ein Erkennen von Abstandhaltern und Mauerstärken oder deren Bruchstücke anhand von charakteristischen Kanten und Formen ist mit dem menschlichen Auge bei Einzelbetrachtung der Objekte möglich.
- Zur Verifizierung der Feldversuche sind die Behandlungs- und Brechversuche in einem Technikaufbau zu wiederholen.

Bei allen Arbeiten rund um das Brechen, die manuelle Suche und das manuelle Sieben der Materialproben wurde neben den begleitenden Arbeitsplatz- und Raumluftmessungen ebenfalls die persönlichen Schutzmaßnahmen umgesetzt.

### Begleitende Analysen

Im Zuge des Projektes wurde ein mit der Firma Wessling entwickelte und mit den zuständigen Behörden abgestimmtes Messkonzept umgesetzt, um im Anschluss zu den verschiedenen Stadien des Projektes die arbeitsbegleitenden Messungen sowie die erforderlichen Materialanalysen für eine Bewertung und Beurteilung der Wirksamkeit der Maßnahmen zu Grunde legen zu können.

## 4. Zusammenfassung

Die ersten Ergebnisse der Realversuche zur Detektion an der Hochwasserschutzwand und der Behandlung des Betonbruchs machen deutlich, dass bei Erkundungen durch GutachterInnen intensiv alle Arten und Formen einer Kontamination durch asbesthaltige Materialien untersucht bzw. erkundet werden müssen, um eine zielgerichtete Sanierung planen und durchführen und dadurch den sanierten und schadstofffreien Baukörper einer hochwertigen stofflichen Verwertung zuführen zu können.

Das Detektieren im Bestand und Selektieren von asbesthaltigen Fertigteilelementen aus den Betonbruchabfällen nach dem Abbruch des Baukörpers ist nach dem aktuellen Stand der Erkenntnisse mit der aktuell branchenüblichen Sortiertechnik nicht hinreichend möglich.

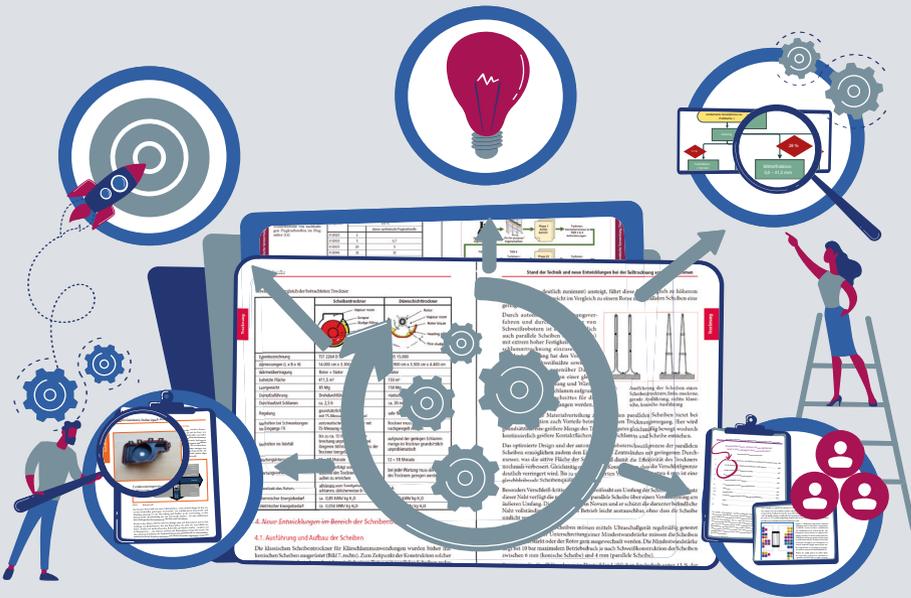
### Ansprechpartner



**Dipl.-Ing. Robert Texter**  
Buhck Umweltberatung GmbH  
Prokurist  
Vertrieb & Innovationen  
Liebigstraße 46  
22113 Hamburg, Deutschland  
+49 40 7200668 53  
rtexter@buhck.de

**Dipl.-Ing. Dirk Pieper**  
Buhck Umweltberatung GmbH  
Projektleiter  
Projektsteuerung Planung und Bau  
Liebigstraße 46  
22113 Hamburg, Deutschland  
+49 40 7200668 61  
dpieper@buhck.de

# Wissensplattform



Designed by vectorjuice / Freepik

Bislang sind bei uns etwa 2.000 digitale Fachbeiträge erschienen, die in ihrer Gesamtheit einen guten Überblick über technische, wirtschaftliche, rechtliche und politische Entwicklungen geben. Mit unserer Wissensplattform, die im Laufe des Jahres an den Start geht, haben Sie Zugriff auf unsere Veröffentlichungen. Sie können zwischen drei Arten von Lizenzen wählen:

## Unser Angebot für Neugierige: Testlizenz für 0 EUR

Uneingeschränkter Zugriff auf eine kleine Vorauswahl an Beiträgen. Mit jedem neuen Konferenzbuch erscheinen zwei weitere Artikel in Ihrem Portfolio.

## Unser Angebot für Fokussierte: thematische Monats- oder Jahreslizenzen

(Preise variieren je nach Thema und Dauer der Lizenz)

Sie haben Zugriff auf alle Fachbeiträge zu einem Themengebiet.

## Unser Angebot für Generalisten: unlimitierte Jahreslizenz für 220 EUR pro Jahr

Sie haben Zugriff auf alle Fachbeiträge der Wissensplattform. Alle Neuveröffentlichungen des TK Verlags werden Ihnen zeitnah zur Verfügung gestellt.

[books.vivis.de](http://books.vivis.de)

Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

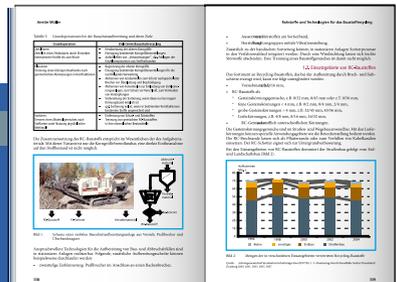
Dorfstraße 51

16816 Nietwerder-Neuruppin

Tel. +49 3391-45 45-0

E-Mail: [order@vivis.de](mailto:order@vivis.de)

**TK** Verlag



## Current Soil-Washing Methods for the Successful Treatment of PFAS-Contaminated Soils

Benjamin Faigle, Bernhard Volz and Hans-Georg Edel

The method of soil washing is currently the only economically feasible cleaning method for PFAS-contaminated soils on large scale.

A total of about 430,000 t of soil contaminated with PFAS and HCs was washed from August 2018 to October 2021 at the site of a former refinery in Bavaria. The cleaned soil could then be backfilled at site-specific costs of about EUR 50 per ton.

Since September 2022, Züblin Umwelttechnik GmbH has been operating an improved soil washing plant in Northern Germany, which was specially designed to treat soils contaminated with PFAS. Several hundred thousand tons of sandy soil with around 10 % fines will be washed and refilled on site.

The two large-scale remediation projects are presented. The technical concept comprises the soil washing unit, the sludge treatment and filtration of the process water. In both attempts, the washing water is circulated in a closed water cycle, therefore intensive treatment of sludge and polluted water is required.

One of the critical issues in soil washing is to optimize the washing process so that the washing liquid serves as the predominant contaminant sink. In this way, steady washing results are achieved, and all output fractions can be successfully processed while water consumption is kept to a minimum. Continuously achieving these results on a scale of 1,000 t to 2,000 t each day is a challenge for material flow. A special focus lies on the heterogeneous nature of input material, with varying contaminant load, soil quality and soil structure as well as affiliated contaminants.

The complex nature of the contaminant itself, the multitude of singular PFAS substances, further complicate operation and controlling. Progress shows that soil washing can even be a viable tool to treat the fine fraction, and various strategies in different treatment steps have been tested on multiple scales.

Since after treatment, the washed soils can be safely reused on site, large emissions from transportation and properly disposing the PFAS-materials is avoided while ever limited landfill space is maintained.

Future research is required for ever expanding the applicability of the method to highly challenging materials such as high fines and/or high organic content. Further projects for washing of PFAS contaminated soils in Europe are already in the planning stage.

## Aktuelle Waschverfahren zur erfolgreichen Reinigung von Böden mit PFAS-Belastung

Benjamin Faigle, Bernhard Volz und Hans-Georg Edel

1.	Bodenwäsche für Böden mit PFAS-Belastung.....	156
1.1.	Bodenwäsche im Rahmen einer Sanierung eines ehemaligen Raffineriegeländes .....	156
1.2.	Verbesserte Bodenwäsche für PFAS-Belastungen.....	157
2.	Ausblick und künftige Entwicklungen .....	159
3.	Quellen.....	160

In Deutschland, wie auch international [3], fand die Methode der Bodenwäsche in den späten 80er und 90er Jahren große Beachtung und breite Anwendung, vor allem für die folgenden Schadstoffgruppen: Mineralölkohlenwasserstoffe, BTEX, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), chlorierte aliphatische Kohlenwasserstoffe (CKW) und Schwermetalle [4]. Nach Jahren stetigem Zuwachs an Bodenwaschanlagen [2], verlor die Methode nach 2000 an Attraktivität für Sanierungsprojekte.

Im Allgemeinen verfolgt die Methode der Bodenwäsche zwei Ziele:

- Abtrennung des Feinanteils von restlichen Feststofffraktionen:  
Aufgrund der großen Oberfläche der feinen Bestandteile im Verhältnis zu ihrem Volumen ist die Klassierung in zwei oder mehr Fraktionen unterschiedlicher Partikelgröße ein Schlüsselement der Bodenwäsche. Nach der Klassierung wird jede Fraktion einer spezifischen, weiteren Behandlung zur Reinigung oder zur Entsorgung unterzogen.
- Physikalische und chemische Behandlung des Bodens mit den Waschsubstanzen, in der Regel hauptsächlich Wasser, so dass die Schadstoffe von der Festfraktion entfernt werden. Die Feinfraktion muss in einem weiteren Schritt vom Prozesswasser getrennt werden.

Es stehen eine Vielzahl von Technologien und Maschinen für die Feststoffbearbeitung und Klassierung (z.B. Siebdecks, Hydrozyklonstufe, Aufstromklassierer, usw.), sowie für die Schlammbehandlung und Reinigung des Prozesswassers zur Verfügung. Während das Fachwissen über die Bodenwäsche für viele Schadstoffe bekannt ist, wurde das Verfahren nur in wenigen Projekten für Böden mit PFAS über Größe von Feldversuchen hinaus tatsächlich großtechnisch angewendet.

## 1. Bodenwäsche für Böden mit PFAS-Belastung

Im Folgenden werden zwei großskalige Anwendungen der Bodenwaschtechnik für PFAS-belastete Böden vorgestellt. Die Aufbereitungskosten liegen bei diesen Projekten in der Größenordnung von 50 EUR/t, dies variiert jedoch je nach Rahmenbedingungen und Anforderungen der Kunden.

### 1.1. Bodenwäsche im Rahmen einer Sanierung eines ehemaligen Raffineriegeländes

Die ersten großskaligen Erfahrungen mit der Bodenwäsche für PFAS-kontaminierte Böden wurden im Rahmen eines Sanierungsprojekts einer ehemaligen Ö Raffinerie in der Stadt Ingolstadt in Süddeutschland gemacht [1]. Dort wurde mit einer Bodenwaschanlage erfolgreich über 360.000 t an Böden mit Mineralölkohlenwasserstoffen und zusätzlich über 70.000 t mit PFAS-Belastung behandelt.



Bild 1: Bodenwaschanlage zur Sanierung des Geländes einer ehemaligen Ö Raffinerie in Süddeutschland

Während die Bodenwäsche für Kohlenwasserstoffe im großen Maßstab bekannt ist, unterscheiden sich die Bodenbelastungen mit PFAS erheblich:

Während die PFAS im Vergleich zu vielen anderen Schadstoffen eine sehr gute Wasserlöslichkeit aufweisen, sind die Zielwerte um Größenordnungen niedriger, so dass eine ausgeklügelte Verfahrenstechnik innerhalb der Bodenwaschanlage und die Behandlung von Schlamm und Prozesswasser von großer Bedeutung sind.

Auf der Projektskala ist es zudem eine Herausforderung, eine konstante und gleichbleibende Qualität der Waschergebnisse zu gewährleisten, da die Zielwerte niedrig sind und die meisten PFAS-Kontaminationen eine Vielzahl von Einzelsubstanzen umfassen. Essentiell für eine geeignete Anlagensteuerung ist es, die wesentlichen Leitsubstanzen aus der großen PFAS-Gruppe zu identifizieren und sich darauf zu fokussieren. Die Ergebnisse dieses Projekts (Bild 2) zeigen, dass das Waschwasser die wesentliche Schadstoffsenke darstellt, sodass durch Optimierung und verbessertes Design auch die Feinfraktion erfolgreich gereinigt werden kann.

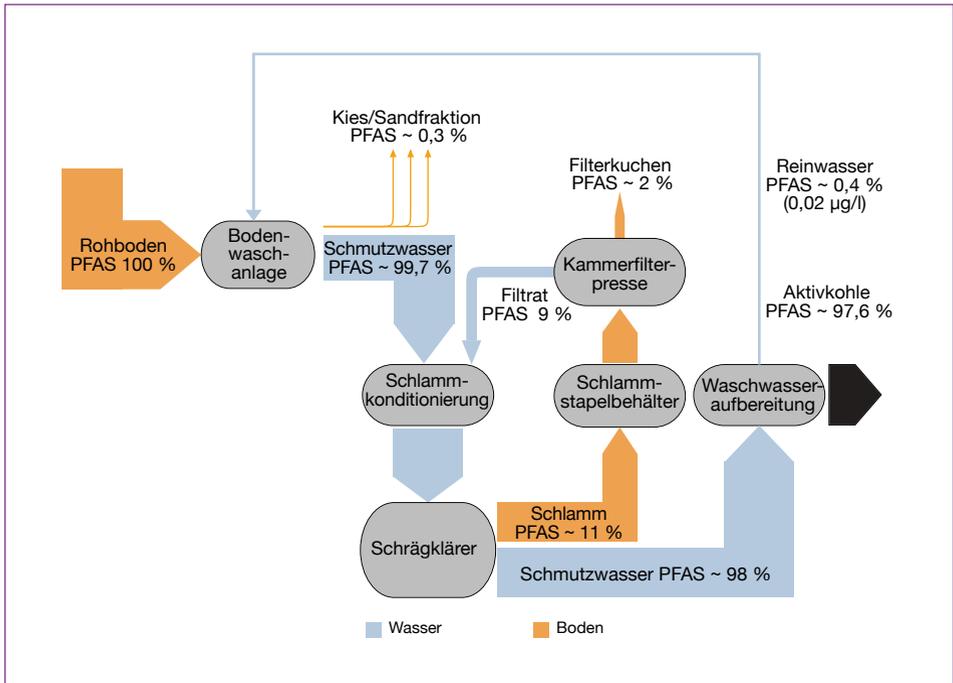


Bild 2: Schadstoffbilanz für die PFAS-Bodenwäsche in Ingolstadt: Das Waschwasser wirkt als wesentliche Schadstoffsenke

Die Methode der Bodenwäsche stellt als maßgeschneiderte Strategie für PFAS-kontaminierte Böden ein kosteneffizientes und wirksames Verfahren zur Wiederverwendung großer Mengen von belasteten Böden dar. Eine optimierte Behandlungsstrategie wird derzeit an einem Standort in Norddeutschland für mehrere hunderttausend Tonnen eingesetzt.

## 1.2. Verbesserte Bodenwäsche für PFAS-Belastungen

Auf den ersten Blick entspricht die Behandlungsstrategie den typischen Bodenwaschanlagen, doch für eine erfolgreiche Behandlung von PFAS-Böden wurden technische Details spezifisch angepasst.



Bild 3: Bodenwaschanlage für PFAS in Norddeutschland

Nach dem Wiegen wird das Eingangsmaterial über gekapselte Förderbänder in die Bodenwaschanlage geleitet, um Staubemissionen zu vermeiden. Eine Vorbehandlung kann sinnvoll sein, um lehmige Konglomerate aufzubrechen und den Kontakt zwischen Schadstoff und Waschwasser zu verbessern. In der Bodenwaschanlage ermöglichen mehrere Klassiersiebe, die aus Sprühbalken mit ausgeklügelter Kombination aus Betriebs- oder Frischwasser beschickt werden, eine Reduktion des Frischwasserverbrauchs bei gleichbleibender Waschleistung und Einhaltung niedriger Zielwerte. Der Feinanteil und der Sand werden in einem Aufstromklassierer getrennt, durch Ausnutzung des Gegenstromprinzips einem wird die Sandfraktion dabei gründlich gewaschen. Durch die Wahl geeigneter Betriebseinstellungen (Feststoffeintrag und -austrag, Flüssigkeitsdurchfluss sowie Wirbelbettdicke) müssen Klassierleistung mit den Anforderungen an die Waschleistung ausbalanciert werden, wobei beides von der Art und der Schadstoffbelastung des aktuellen Inputs abhängt.

Der PFAS-belastete Schlamm wird dann in einer Schlammbehandlungsanlage mit einem Durchsatz von mehreren hundert Kubikmetern pro Stunde bei einem Feinanteil von etwa 10 % behandelt. Eine standortspezifische Kombination aus Koagulationsmittel (z.B. Eisen(III), Aluminiumsalze, Aluminiumchlorhydrate usw.) und teils mehreren Flockungshilfsmitteln wird in angepasster Konzentration nach Messung von Prozessparametern dosiert, um den Schlamm zuverlässig einzudicken, ohne eine PFAS-Anreicherung im Feinanteil in Kauf zu nehmen. Die Klarphase wird mittels Schrägklärer abgetrennt. Da das verbliebene Waschwasser im Schlamm noch relevante Mengen an PFAS enthält, wird der Schlamm über mehrere vollautomatische Kammerfilterpressen entwässert. Werden die Zielwerte erreicht, wird der Filterkuchen auch auf dem Gelände als wiederverwendet, ansonsten erfolgt die fachgerechte Entsorgung. Bei einem angepasst optimierten Betrieb ist nur gereinigtes Wasser und kein zusätzlicher Waschzusatz erforderlich, um die mit PFAS kontaminierten Böden erfolgreich zu waschen.

Nach der Schlammbehandlung gelangt das klare Wasser über große Pufferbecken zur letzten Behandlungsstufe, der Waschwasserreinigungsanlage. Dort wird es über Sand- und Aktivkohlefilter gereinigt. Je nach Art des PFAS-Spektrums und ihrer Konzentration

werden verschiedene Arten von Wasseraktivkohle nacheinander eingesetzt, um die Adsorptionskapazität und die wirtschaftliche Leistung zu optimieren. Die Waschflüssigkeit wird in einem geschlossenen Kreislauf zurückgeführt, was sowohl umweltfreundlich als auch kostensparend ist.

Ein gründliches Überwachungsprogramm für das Ausgangsmaterial ist unerlässlich, um einen zuverlässigen Waschprozess zu etablieren. Ein unabhängiger externer Gutachter führt die Überwachung durch, um sicherzustellen, dass die Zielwerte eingehalten werden und das gewaschene Material chargenweise zum Wiedereinbau freigegeben werden kann.

In den ersten Wochen des Regelbetriebs wurden bei diesem Projekt über 40.000 t Sand und Kies erfolgreich gewaschen, ohne dass die Grenzwerte für die Verfüllung überschritten wurden, und auch ein guter Teil des Filterkuchens konnte wiederverwendet werden.



Bild 4: Tagesleistung von etwa 2.000 t gewaschenem Material

## 2. Ausblick und künftige Entwicklungen

Es ist davon auszugehen, dass weitere Verbesserungen entlang der gesamten Behandlungskette (Bodenwäsche/Feststoffbehandlung, Schlammbehandlung und Waschwasseraufbereitung) vorgenommen werden können, um die Effizienz zu verbessern und die Kosten zu senken, sowie um stabile Waschergebnisse für die Feinfraktionen zu erzielen. Insbesondere bei Böden mit hohem organischen Anteil (Mutterboden) bleibt die Wäsche der Feinfraktion eine anspruchsvolle Aufgabe und ein Bereich, in dem weiter geforscht und optimiert werden sollte. Weitere Untersuchungen werden zeigen, ob für diese Art von Material zusätzliche Behandlungsschritte notwendig und zielführend sind oder ob andere Behandlungsstrategien eingesetzt werden können.

### 3. Quellen

- [1] Brutscher, M.; Faigle, B.; Volz, B.; Bayer, F.; Brozio, D.; Ernst, A.; Baur, J.; Grabmann, F.: Sanierung einer ehemaligen Raffinerie - ein herausforderndes Großprojekt. Sonderdruck altlasten spektrum, Erich Schmidt Verlag, 2020.
- [2] Frauenstein, J.; S. Mahrle: Neues von der Jagd nach dem Boden. Altlasten Spektrum, 2008, <https://doi.org/10.37307/j.1864-8371.2009.02.06>.
- [3] Griffiths, Richard A.: Soil-washing technology and practice. Journal of Hazardous Materials 40 (2), 1995: [https://doi.org/10.1016/0304-3894\(94\)00064-N](https://doi.org/10.1016/0304-3894(94)00064-N).
- [4] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg: Handbuch – Bodenwäsche. Karlsruhe, 1993.

### Ansprechpartner



**Dr.-Ing. Benjamin Faigle**  
Züblin Umwelttechnik GmbH  
F&E  
Maulbronner Weg 32  
71706 Markgröningen, Deutschland  
+49 7145 9324 251  
[benjamin.faigle@zueblin.de](mailto:benjamin.faigle@zueblin.de)

**Bernhard Volz**  
Züblin Umwelttechnik GmbH  
Projektleiter Bodenwäsche  
Maulbronner Weg 32  
71706 Markgröningen, Deutschland  
+49 7145 9324 257  
[bernhard.volz@zueblin.de](mailto:bernhard.volz@zueblin.de)

**Dr. rer. nat. Hans-Georg Edel**  
Züblin Umwelttechnik GmbH  
F&E  
Maulbronner Weg 32  
71706 Markgröningen, Deutschland  
+49 7145 9324 249  
[hans-georg.edel@zueblin.de](mailto:hans-georg.edel@zueblin.de)



Wir widmen uns aktuellen verfahrens- und anlagentechnischen sowie politischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Themen, soweit sie die Abfall- und Kreislaufwirtschaft und die Energie- und Rohstoffwirtschaft betreffen. Unsere Aufgabe sehen wir in der Kommunikation zwischen Politik, Verwaltung, Wirtschaft, Technik und Wissenschaft.

## Wir geben seit fünfzig Jahren Fachbücher zu zahlreichen Themen des technischen Umweltschutzes heraus:

- Thermische Abfallbehandlung & energetische Verwertung
- Dokumentation von Abfallverbrennungsanlagen
- MBA & Ersatzbrennstoffe
- Recycling & Rohstoffe
- Mineralische Nebenprodukte & Abfälle
- Abwasser & Klärschlamm
- Strategie & Umweltrecht
- Immissionsschutz
- Biologische Abfallbehandlung...



Insgesamt sind bislang bei uns etwa zweitausend Fachbeiträge erschienen, die in ihrer Gesamtheit einen guten Überblick über technische, wirtschaftliche, rechtliche und politische Entwicklungen geben. In Kürze stellen wir unsere Wissensplattformen online für die Sie zeitlich befristete Zugriffslizenzen erwerben können.

Bestellen Sie direkt beim TK Verlag oder unter [books.vivis.de](http://books.vivis.de)

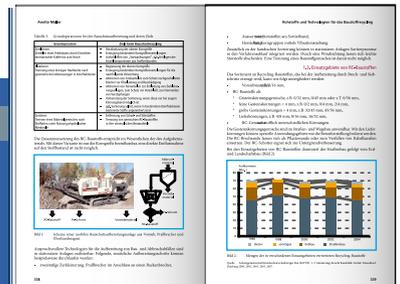
Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Dorfstraße 51

16816 Nietwerder-Neuruppin

Tel. +49 3391-45 45-0

E-Mail: [order@vivis.de](mailto:order@vivis.de)





## Schulungen zur Ersatzbaustoffverordnung

Im Zuge der Einführung der Ersatzbaustoffverordnung hat REMEX die Schulungsplattform MEB® Wissen entwickelt. Das Kursangebot reicht von den Grundlagen bis zu vertiefenden Vorträgen. Nutzer haben die Wahl zwischen zahlreichen Webinaren und On-demand-Kursen. Erfahren Sie mehr auf > [meb-wissen.de](http://meb-wissen.de)

REMEX GmbH // Am Fallhammer 1 // 40221 Düsseldorf // Deutschland  
T +49 211 17160-0 // F +49 211 17160-420 // [info@remex.de](mailto:info@remex.de) // [remex.de](http://remex.de)

# **Rückgewinnung von Ressourcen aus Rost- und Flugaschen**

## Project S-Cem for the Application in Cement and Building Materials Industry – a Contribution to Product Development, Decarbonisation, and Resource Conservation

Marco Abis, Georg Bachmann, Michael Larisch and Jörn Richter

As the European decarbonisation goals for 2050 have been set by the European Green Deal, innovative solutions and technologies for the reduction of CO<sub>2</sub> from energy intensive industries will play a pivotal role in the next three decades.

Among the energy intensive sectors, steel and cement production are in lead by CO<sub>2</sub> emissions in Europe. Focusing on the latter, CO<sub>2</sub> emissions from cement production are linked with both the limestone decarbonisation emissions and fuel emissions. Between different strategies for the CO<sub>2</sub> emissions reduction in cement factories, the reduction of the clinker factor (percentage of clinker in cement) by using supplementary cementitious materials is one of the most relevant approaches for the decarbonisation of the cement sector.

In this project, a patented process to produce high-quality mineral fraction from household waste incineration bottom ash has been developed, thus maximising the separation of ferrous and non-ferrous metals. This product is further mechanically treated with the end goal of obtaining a supplementary cementitious material.

The mechanical and chemical properties of the resulting cement binder have been further tested on normed cement prisms. In specific, two standard cements with increasing amounts of cement binder from waste incineration bottom ash has been tested for chemical composition, solidification times, water absorption and compressive strength.

Test results show the possibility of to use up to 15 % S-CEM for both standard cements without relevant deviations in the physical/chemical properties from the reference test prisms.

In conclusion, it is possible to use mechanically-treated incineration bottom ash as cement binder reducing the clinker factor in standard cements. Since binder from waste incineration bottom ash is meant to be used directly after the *hot phase* of the cement manufacturing, the use of this material can contribute to a significant reduction of the CO<sub>2</sub> emissions linked with the cement production. These benefits must also consider the potentially toxic elements and salts input in cement products expected by using bottom ash to different extents.

# Projekt S-CEM im Einsatz für die Zement- und Baustoffindustrie – ein Beitrag zur Produktentwicklung, Dekarbonisierung und Ressourcenschonung

Marco Abis, Georg Bachmann, Michael Larisch und Jörn Richter

1.	Hintergrund .....	166
2.	Versuchsaufbau .....	168
2.1.	Prozess .....	168
2.1.1.	Verstärkte Metallabscheidung .....	168
2.1.2.	Mahlen auf eine Feinheit beziehend auf eine spezifische Oberfläche nach Blaine .....	168
2.2.	Zementprüfungen an Normprismen 4 cm x 4 cm x 16 cm .....	171
3.	Ergebnisse .....	172
3.1.	Mahlversuch .....	172
3.2.	Chemische Zusammensetzung .....	172
3.3.	Wasseranspruch .....	174
3.4.	Erstarrungszeit .....	174
3.5.	Druckfestigkeit .....	174
4.	Umweltaspekte und weitere Entwicklungen .....	176
4.1.	CO <sub>2</sub> -Emissionen .....	176
4.2.	Schadstoffe und Schwermetalle .....	176
4.3.	Chloride .....	176
5.	Schlussfolgerungen und Ausblick .....	177
6.	Quellen .....	178

Da die Ziele, bis 2050 der erste klimaneutrale Kontinent zu werden und bis 2030 mindestens 55 % der Treibhausgasemissionen in Europa zu reduzieren, durch den Europäischen Green Deal festgelegt wurden [8], müssen energieintensive Branchen innovative Lösungen für ihre Dekarbonisierung finden. Unter diesen Sektoren ist ein wachsendes Interesse bei der Zementindustrie mit ihrer Klinkerherstellung zu beobachten [7, 15].

Im Jahr 2021 war die Zementindustrie für etwa 4 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Europäischen Union (EU) verantwortlich [9, 15].

Laut des Europäischen Joint Research Centre sind Strategien zur Verringerung der zementbedingten Emissionen zu entwickeln, wie die Verwendung von leistungsfähigeren Betonen, die Verringerung des Klinkerfaktors in Zementen sowie die Herstellung von Betonen mit alternativen Zusammensetzungen [15].

Parallel dazu wurden kontinuierlich Anstrengungen zur Verringerung der strom- und brennstoffbedingten Emissionen unternommen. Zum Beispiel ist die Verwertung fossiler Brennstoffe in Deutschland in den letzten 30 Jahren stark gesunken, wodurch in 2021 69 % des Wärmeenergiebedarfs der Zementindustrie durch Siedlungs- und Gewerbeabfall, Klärschlamm sowie Altreifen gedeckt wurden [25].

Dieser letzte Punkt ist die erste Motivation für dieses Projekt. Der Einsatz alternativer Brennstoffe in der Zementindustrie deckt sich weitgehend mit dem Einsatz konventioneller Abfälle in deutschen Verbrennungsanlagen [16].

Ähnliche Mechanismen werden bei der Verbrennung von alternativen Brennstoffen zur Herstellung von Zementklinker beobachtet. Auch wenn die Verbrennung bei Temperaturen von etwa 1.450 °C erfolgt [15], ist der Zusammenhang zwischen dem Eintrag von Schwermetallen aus dem Brennstoff/Rohmaterial und ihrer Konzentration in dem Zementklinker bereits beobachtet worden und keine Neuheit [10, 24].

Die zweite Motivation für dieses Projekt liegt in der Notwendigkeit von Alternativen zu gemahlenem Hüttensand (HS) und Steinkohlenflugasche (SFA) für die Zementherstellung. In diesem Fall könnten sich die Dekarbonisierung der Stahlindustrie [27, 28] und der Kohleausstieg in Deutschland [18] negativ auf die emissionsarme Zementproduktion auswirken [23, 24]. Die Ähnlichkeiten zwischen HS, SFA sowie Schlacke aus der Hausmüllverbrennung, veranlassen uns zu untersuchen, ob die Verbrennungsschlacke als vollwertiger Ersatz für die Zementherstellung angesehen werden kann.

## 1. Hintergrund

Die Schlacke ist der Hauptrückstand nach der Abfallverbrennung. Im Jahr 2020 wurden aus den deutschen 66 Hausmüllverbrennungsanlagen und 33 Ersatzbrennstoff Kraftwerken [19] sowie aus den ausländischen Anlagen, etwa 9,5 Mio. t Schlacke (AVV 19 01 12) in Deutschland verarbeitet (Tabelle 1) [20].

Die am häufigsten angewandte Schlackenbehandlung ist die Metallabscheidung, bei der mehr als 6 Mio. t Schlacken in 37 deutschen Anlagen zur Abtrennung von etwa 500.000 t reinen Metallen verarbeitet werden [3, 9, 14].

Die steigende Menge an erzeugten und behandelten Schlacken erfordert innovative Upcycling-Lösungen. Neben den bewährten Verwendungen als Straßenbaustoff, in technischen Bauwerken sowie als Deponiebaustoff sind weitere wirtschaftliche Alternativen anzubieten.

Tabelle 1: Rost- und Kesselaschen sowie Schlacken ohne 19 01 11 behandelt in Deutschland

Jahr	Input von Abfall- entsorgungsanlagen	angelieferter Abfall		davon im eigenen Betrieb erzeugte Abfälle
		davon aus dem Inland	davon aus dem Ausland	
		1.000 t		
2017	7.948	7.444	55	449
2018	7.797	7.431	62	304
2019	8.350	7.982	120	248
2020	9.469	9.148	113	209

Quelle: Statistisches Bundesamt (Destatis): Abfallentsorgung: Deutschland, Jahre, Abfallarten: Rost- und Kesselaschen sowie Schlacken (oh.190111). In: Tabelle 32111-0002, 2022. <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online> [Zugriff am 13.01.2023]

Verschiedene Fraktionen in der Asche (Glas, Keramik, Eisenoxide sowie Sonstiges) zeichnet sich chemisch und/oder mineralogisch durch eine besondere Zusammensetzung aus, die wiederum das Verhältnis zwischen ihren Hauptoxiden verändert [1]. Diese Unterschiede sind in dem in Bild 1 dargestellten ternären Diagramm deutlich zu erkennen.

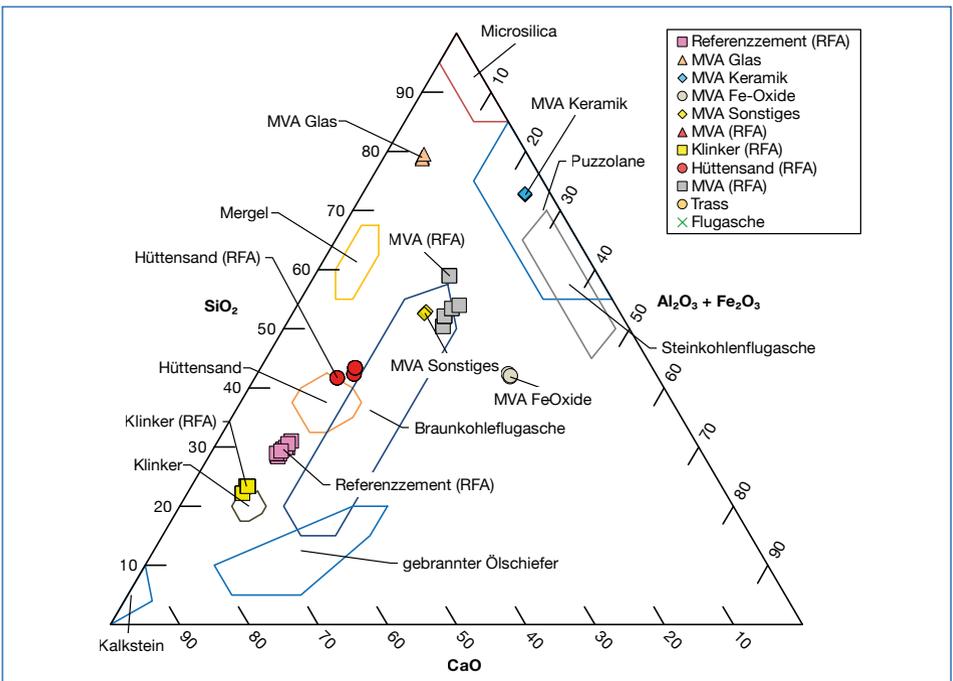


Bild 1: Ternäres Diagramm (nach Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)) für HMVA-Fraktionen [1, 12], Zementkomponenten [13] und andere Zementhauptbestandteile nach DIN 197-1 [4, 6, 21, 29]

Die HMVA weist eine mittlere Zusammensetzung zwischen HS und SFA auf, beides Materialien, die seit Jahrzehnten in der Zementindustrie verwendet werden. Es ist daher sinnvoll zu prüfen, ob HMVA auch für die Herstellung von Zementen oder zementhaltigen Bindemitteln eingesetzt werden kann.

Die wichtigsten Aspekte, die bei der Bewertung der Einsatzmöglichkeiten von Schlacke in Zementen zu berücksichtigen sind, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Erzielung der bestmöglichen Qualität bei der Abtrennung von Fe- und NE-Metallen aus den mineralischen Fraktionen der Schlacke,
- Anpassung der Endkorngröße (Feinheit) der resultierenden HMVA,
- Bestimmung der maximalen Menge an HMVA in der Zementmischung ohne Beeinträchtigung der physikalischen und mechanischen Eigenschaften.

Weitere Herausforderungen sind:

- Überwachung des Gehaltes an Salzen, insbesondere an Chloriden,
- Begrenzung des Schwermetallgehalts im Endprodukt.

## 2. Versuchsaufbau

### 2.1. Prozess

#### 2.1.1. Verstärkte Metallabscheidung

Die HMVA wurde zunächst nach dem neuesten Stand-der-Technik zur Metallabscheidung aufbereitet. Um Metall und unverbrannte Rückstände weiter abzutrennen, wurde ein zusätzlicher Behandlungsschritt, bestehend aus Brechern, Sieben und Metallabscheidern, eingeführt.

Die Zerkleinerungsschritte haben die Aufgabe, Schlackenklumpen zu zerkleinern und so die Metalle von mineralischem Ballast und Fremdstoffen zu befreien. Die Siebstufen haben die doppelte Aufgabe, sowohl Überkorn (und Metalle) aus dem gebrochenen Aufgabematerial abzutrennen als auch feinere Fraktionen abzuscheiden und so ein Verklemmen des Brechers zu verhindern. Schließlich haben die Wirbelstromabscheider die Aufgabe, die freigesetzten Metalle abzutrennen. Erwähnenswert ist auch der Abflachungseffekt des Brechers für die Metalle, der zu einer besseren Trennung in den NE-Abscheidern beiträgt.

#### 2.1.2. Mahlen auf eine Feinheit beziehend auf eine spezifische Oberfläche nach Blaine

Das wie im vorangegangenen Unterabschnitt beschriebene Material wurde einer industriellen Vertikalkugelmühle zugeführt, um eine spezifische Oberfläche nach Blaine von  $4.300 \text{ cm}^2/\text{g}$  zu erreichen. Der Blaine-Wert wurde als Richtwert aus den Erfahrungen mit der Feinheit von SFA übernommen, für die normalerweise Werte im Bereich von  $2.700$  bis  $5.300 \text{ cm}^2/\text{g}$  erreicht werden [22].

Das HMVA-Mehl sollt hinter der *heißen Phase* der Zementherstellung (Drehrohrofen) verwendet werden, was zu erheblichen Energie- und  $\text{CO}_2$ -Einsparungen führt.

# S-CEM®

im Einsatz für Zement- und Baustoffindustrie

Ein Beitrag zur Produktentwicklung,  
Dekarbonisierung und Ressourcenschonung



**eew**

Energy from Waste



**HEIDEMANN**

Recycling GmbH

[www.S-CEM.de](http://www.S-CEM.de)

# Energie aus Abfall



Herausgeber: Thomé-Kozmiensky (et. al)

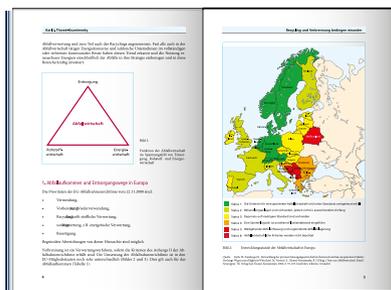
## Energie aus Abfall:

2006: <b>Band 1</b>	978-3-935317-24-5	<b>20,00 EUR</b>	2014: <b>Band 11</b>	978-3-944310-06-0	<b>30,00 EUR</b>
2007: <b>Band 2</b>	978-3-935317-26-9	<b>20,00 EUR</b>	2015: <b>Band 12</b>	978-3-944310-18-3	<b>35,00 EUR</b>
2007: <b>Band 3</b>	978-3-935317-30-6	<b>20,00 EUR</b>	2016: <b>Band 13</b>	978-3-944310-24-4	<b>35,00 EUR</b>
2008: <b>Band 4</b>	978-3-935317-32-0	<b>20,00 EUR</b>	2017: <b>Band 14</b>	978-3-944310-32-9	<b>50,00 EUR</b>
2008: <b>Band 5</b>	978-3-935317-34-4	<b>20,00 EUR</b>	2018: <b>Band 15</b>	978-3-944310-39-8	<b>50,00 EUR</b>
2009: <b>Band 6</b>	978-3-935317-39-9	<b>25,00 EUR</b>	2019: <b>Band 16</b>	978-3-944310-45-9	<b>60,00 EUR</b>
2010: <b>Band 7</b>	978-3-935317-46-7	<b>25,00 EUR</b>	2020: <b>Band 17</b>	978-3-944310-50-3	<b>60,00 EUR</b>
2011: <b>Band 8</b>	978-3-935317-60-3	<b>25,00 EUR</b>	2021: <b>Band 18</b>	elektr. Ausgabe	<b>40,00 EUR</b>
2012: <b>Band 9</b>	978-3-935317-78-8	<b>25,00 EUR</b>	2022: <b>Band 19</b>	978-3-944310-59-6	<b>85,00 EUR</b>
2013: <b>Band 10</b>	978-3-935317-92-4	<b>30,00 EUR</b>	2023: <b>Band 20</b>	978-3-944310-69-5	<b>85,00 EUR</b>

## Paketpreis

**560,00 EUR**  
statt 745,00 EUR

Bestellen Sie direkt beim TK Verlag oder unter [books.vivis.de](https://books.vivis.de)



Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Dorfstraße 51  
16816 Nietwerder-Neuruppin  
Tel. +49 3391-45 45-0  
E-Mail: [order@vivis.de](mailto:order@vivis.de)

**TK** Verlag

## 2.2. Zementprüfungen an Normprismen 4 cm x 4 cm x 16 cm

Die Eigenschaften von S-CEM als Bindemittel wurden durch die Prüfung von Normprismen aus Portlandzementklinker, HS und S-CEM-Mischungen bewertet.

S-CEM wurde im Vergleich zu zwei genormten Zementen getestet: einem Portlandhüttenzement Typ CEM II/B-S (CEM II) und einem Hochofenzement Typ CEM III/A (CEM III) (Tabelle 2). Diese Zemente wurden hergestellt und als Referenzmaterial verwendet.

Tabelle 2: Zusammensetzung der Referenzzemente; in Klammern: Normzementwerte nach DIN EN 197-1

Bestandteil	CEM II 32,5 R	CEM III 42,5 N
	%	
Klinker	66 (65 – 79)	58 (35 – 64)
Hütten sand	31 (21 – 35)	38 (36 – 65)
Anhydrit	3	4

Quelle: Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.) DIN EN 197-1:2011-11 Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement; Deutsche Fassung EN 197-1:2011

- Zur Herstellung von CEM II-Prüfprismen wurde der Massenanteil des Hütten sandes mit steigenden S-CEM-Mengen (5%, 10%, 15% und 31%) ersetzt (Bild 2, links).
- Für CEM III-Prüfprismen wurde der Massenanteil des Hütten sandes durch S-CEM in unterschiedlichen Gehalten (5%, 10%, 15%) bis hin zur vollständigen Substitution der Hütten sandfraktion ersetzt (38% S-CEM) (Bild 2, rechts).

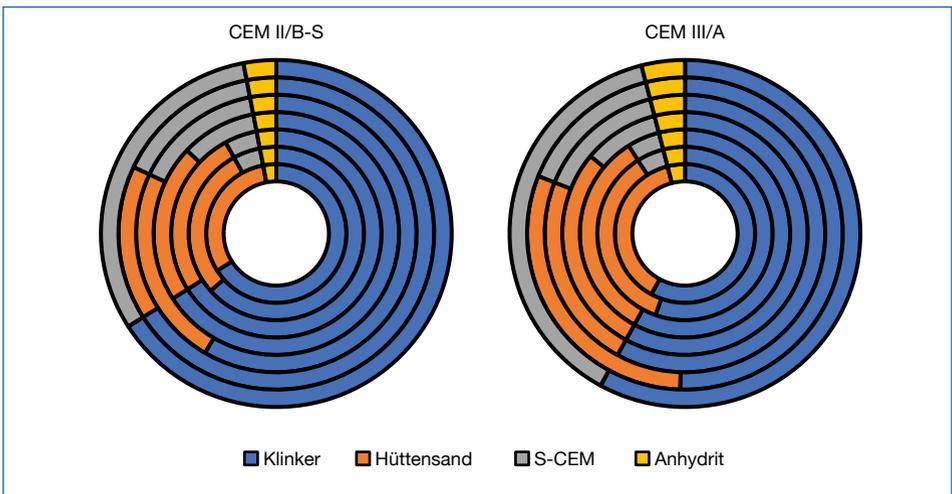


Bild 2: Zusammensetzung von CEM II-Testprismen (links) und CEM III-Testprismen (rechts)

Die Zusammensetzung jeder Fraktion wurde durch Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) und durch nasschemische Analyse (Königswasseraufschluss, ICP-OES) analysiert.

Für die Zementprismen wurden die wichtigsten mechanischen Eigenschaften wie (Erstarrungszeit, Wasseraufnahme, Druckfestigkeit), die chemische Zusammensetzung sowie die spezifische Oberfläche nach Blaine analysiert.

## 3. Ergebnisse

### 3.1. Mahlversuch

Bild 3 zeigt die Prüfanordnung für die Bestimmung der Erstarrungszeiten an Zementleimen nach DIN EN 196-3 [5]. Dieser Test wurde durchgeführt, um mögliche Probleme beim Hochskalieren des Prozesses zu bewerten.

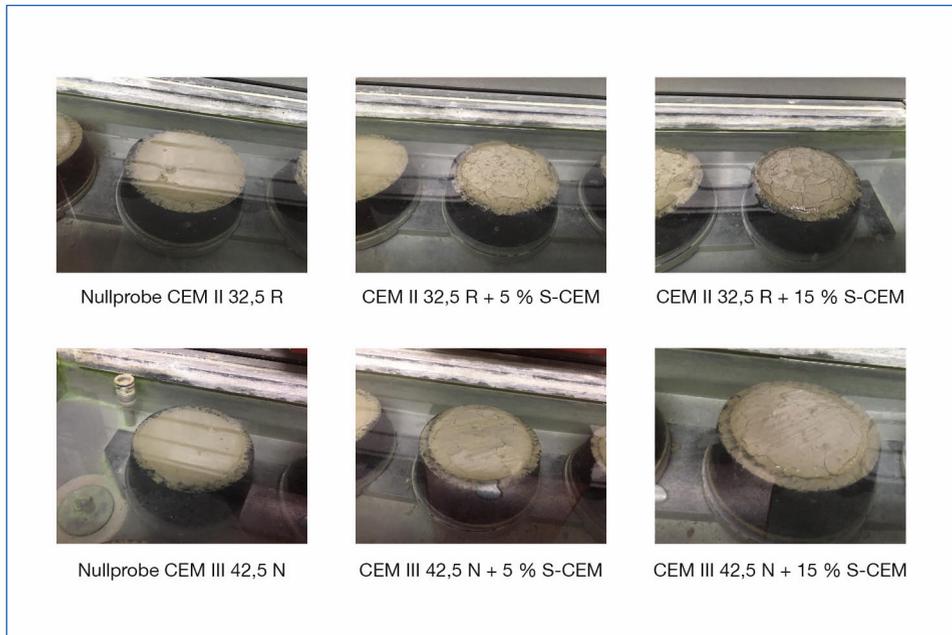


Bild 3: Vergleich der Prüfzementleime aus verschiedenen Zementmischungen am Ende des gemeinsamen Mahlens im Labormaßstab zur Prüfung der Erstarrungszeiten [DIN EN 196-3]

Bei der Zerkleinerung von HMVA-Proben in jedem Maßstab sind keine Probleme oder Nachteile aufgetreten. Bei den mit der Industriemühle durchgeführten Versuchen wurden etwa 1,2 t HMVA mit einer Aufgabemenge von 150 bis 300 kg/h, einem Druck von 300 bis 450 bar und einer Drehzahl von 200 bis 400 U/min verarbeitet.

Mit diesen Einstellungen wurden bei den verschiedenen Versuchen für die HMVA spezifische Oberflächen nach Blaine zwischen 3.000 und 6.100 cm<sup>2</sup>/g erreicht.

### 3.2. Chemische Zusammensetzung

Die RFA-Oxidzusammensetzung von HMVA, HS sowie SFA ist in Bild 4 dargestellt.

HMVA zeichnet sich durch einen relativ geringeren CaO-Gehalt und einen höheren SiO<sub>2</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Gehalt als HS aus. Im Gegensatz dazu liegen die SiO<sub>2</sub>- und Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Gehalte in HMVA im Bereich der deutschen SFA, während CaO etwas höher ist.

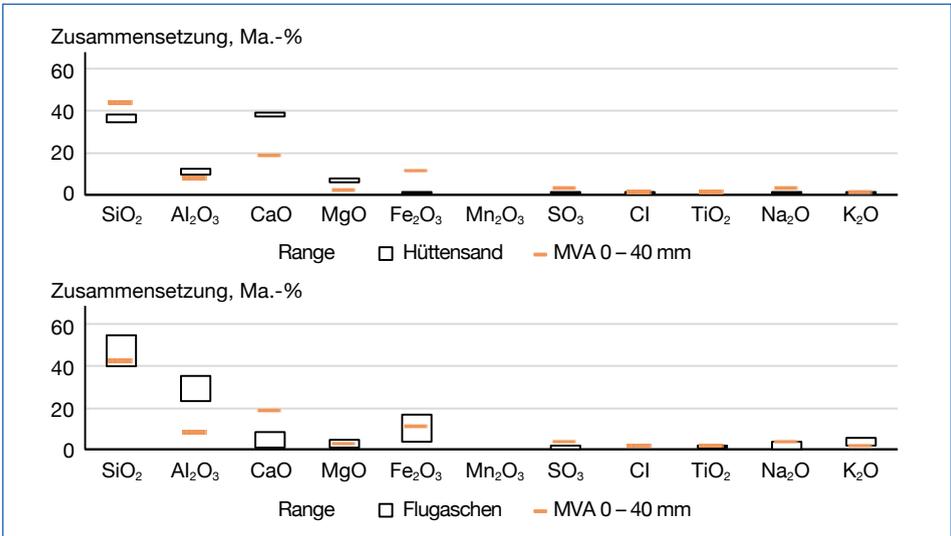


Bild 4: Vergleich der durchschnittlichen RFA-Zusammensetzung von HMVA und HS (analysiert in diesem Projekt, oben) und SFA ([30], unten)

Diese Unterschiede lassen sich auch im ternären Diagramm nachverfolgen. Insgesamt führen Mischungen mit 15 % S-CEM zu keinen relevanten Unterschieden in den Hauptoxidanteilen des resultierenden Zements (Bild 5):

- CaO: Referenzwert: 60 %; mit S-CEM: zwischen 50 % und 60 %
- SiO<sub>2</sub>: Referenzwert: 30 %; mit S-CEM: zwischen 30 % und 35 %
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Referenzwert: 10 %; mit S-CEM: zwischen 10 % und 15 %

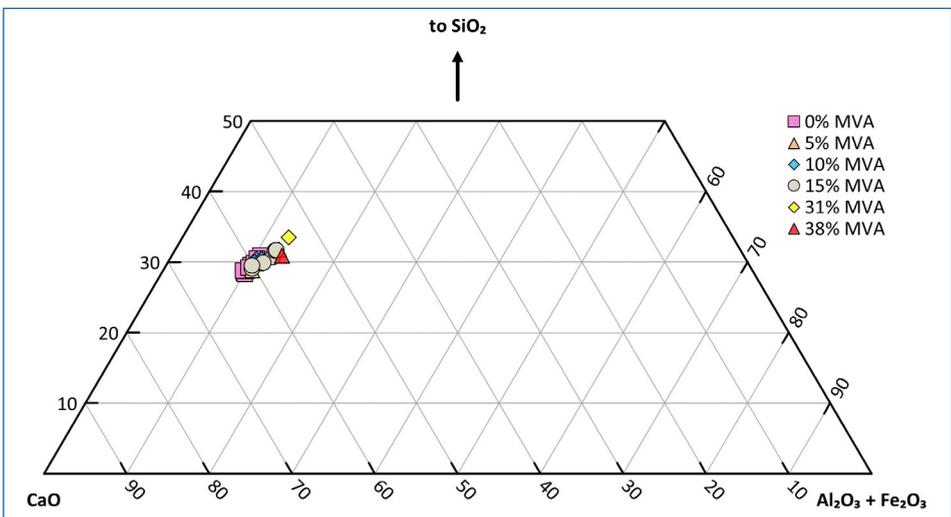


Bild 5: RFA-Ternärdiagramm für Zemente CEM II/III mit unterschiedlichen S-CEM-Massenanteilen

### 3.3. Wasseranspruch

Es ist festzustellen, dass es keine signifikanten Unterschiede im Wasseranspruch gibt, wenn die Menge an HMVA, die als Zuschlagstoff verwendet wird. In beiden Fällen liegen die Werte des Wasserbedarfs zwischen 24 und 31 %, gegenüber Werten zwischen 20 und 27 %, die bei der Herstellung von reinen Zementnormprismen festgestellt wurden.

### 3.4. Erstarrungszeit

Bild 6 zeigt die Ergebnisse in Bezug auf den Beginn und das Ende der Erstarrung.

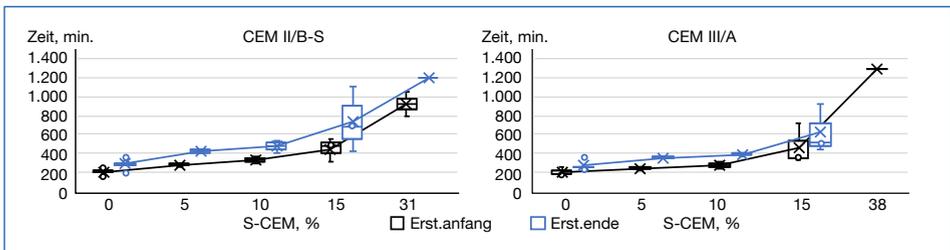


Bild 6: Erstarrungsbeginn und -ende für CEM II- und CEM III-Prismen mit unterschiedlichen HMVA-Gehalten

Aus Bild 6 ist ersichtlich, dass steigende S-CEM-Mengen in CEM II-Prismen zu leichten Verzögerungen des Erstarrungsbeginns führen. Andererseits unterscheidet sich die Dauer der Erstarrung nicht nennenswert vom Referenzfall. Diese Abweichungen sind bei den mit CEM III durchgeführten Versuchen stärker ausgeprägt.

Insgesamt erfüllen die Zementmischungen mit bis zu 15 % S-CEM die Anforderungen der DIN EN 197-1 [11].

### 3.5. Druckfestigkeit

Bild 7 zeigt ein Beispiel für einen Satz CEM II- und CEM III-Prismen, an denen die Druckfestigkeit der Zement- S-CEM-Mischung geprüft wurde.

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung sind in Bild 8 dargestellt. Aus der Bild lässt sich Folgendes feststellen:

- Eine Erhöhung des Anteils an Schlacke in der Mischung führt zu einer progressiven Abnahme der Druckfestigkeit.
- CEM III mit 5 bis 15 % HMVA-Gehalt weist eine durchschnittliche Druckfestigkeit von etwa 50, 45 bzw. 40 MPa auf.
- CEM II, die sich durch eine geringere Druckfestigkeit auszeichnen, ergeben bei einer Beimischung von 5 %, 10 % bzw. 15 % HMVA-Masseanteil eine durchschnittliche Druckfestigkeit von 44, 38 bzw. 31 MPa.
- CEM II und CEM III Prismen mit > 30 % HMVA zeigten Druckfestigkeitswerte unter 20 MPa selbst nach 28 Tagen.



Bild 7: Hergestellte Normprismen, Helligkeit: + 20 %

Die bei den Versuchen ermittelten Verluste der Druckfestigkeiten im Vergleich zu den Referenzzementen (0 % HMVA-Zugabe) in den ersten 28 Tagen sind offensichtlich, aber durchaus noch tolerabel und sind beim zukünftigen Bindemittleinsatz je nach Anwendungszweck zu berücksichtigen. Diese Beobachtung, die für die Zementmischungen mit 5 bis 15 % HMVA gilt, trifft wiederum nicht für die Mischungen mit > 30 % HMVA zu.

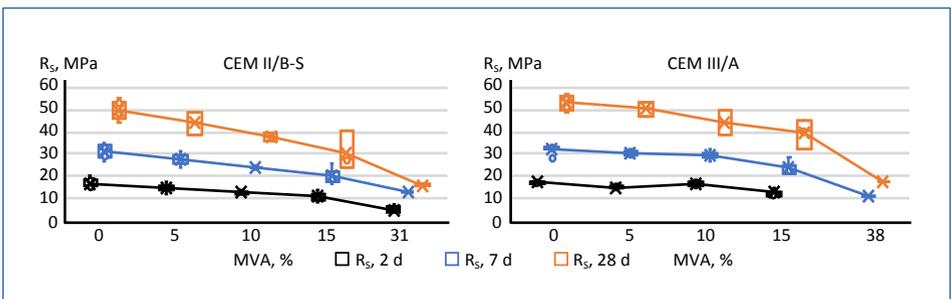


Bild 8: Druckfestigkeitsentwicklung mit steigendem HMVA-Anteil in der Mischung

## 4. Umweltaspekte und weitere Entwicklungen

### 4.1. CO<sub>2</sub>-Emissionen

Die Verwendung von HMVA als Bindemittel in Zementmischungen dürfte sich positiv auf die gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Zusammenhang mit der Zementherstellung auswirken.

Die Hauptquellen der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Zementindustrie entfallen auf 1. Klinkerbrand in Ofenanlagen (Dekarbonisierung von CaCO<sub>3</sub>) sowie 2. Verwendung von Brennstoffen. In den letzten zehn Jahren schwankten die direkten Kohlendioxidemissionen pro produzierten Zement um den Wert von 0,6 t CO<sub>2</sub>/t Zement [27].

Die getesteten HMVA sind für den Einsatz in der *kalten Phase* der Zementherstellung, also im Klinkermahlprozess, vorgesehen. Es ist ablesbar, dass nach Abzug der Emissionen, die mit der für die Verarbeitung der Asche eingesetzten Energie verbunden sind, für jeden Prozentpunkt substituierter HMVA eine 1:1-Reduzierung der zementbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen zu erwarten ist. Eine detaillierte Quantifizierung des Energiebedarfs für die Metallabscheidung und den Mahlprozess soll in der nächsten Phase des Projektes evaluiert werden.

### 4.2. Schadstoffe und Schwermetalle

Das Referenzdokument für die Bewertung von Ersatzbaustoffen in Deutschland ist das LAGA-Eckpunkte Dokument von 2004. In diesem Dokument werden Grenzwerte für die Elemente As, Cd, Cr (gesamt), Cu, Hg, Ni, Pb, Tl, Zn in Feststoffe angegeben.

Da einige dieser Elemente, insbesondere Cu, Zn und Pb, Merkmale von HMVA und generell von Rückständen aus der thermischen Abfallbehandlung sind, sollte die Verwendung von HMVA in Zementen von Fall zu Fall geprüft werden.

Andererseits ist es auch möglich, den Gehalt an unerwünschten Elementen in der behandelten HMVA zu kontrollieren und zu begrenzen, indem entweder die Abtrennung der Fe- und NE-Metalle verbessert (z.B. Vermeidung von Kreuzkontaminationen zwischen gemahlene Metalle und der gemahlene Asche) oder die zu behandelnde HMVA-Fraktion ausgewählt werden (z.B. Ausschluss der feineren Fraktion und/oder Ausschluss bestimmter mineralischer Bestandteile).

Da die Umweltverträglichkeit der gemahlene HMVA in Zementmischungen eine entscheidende Rolle für die Verwendung der Asche in der Zementindustrie spielt, werden weitere Aktivitäten (z.B. Prozess-Scale-up, Produktprüfung usw.) erwartet, die sich mit diesen Herausforderungen im Detail befassen.

### 4.3. Chloride

Das Vorhandensein von Chlorid in Schlacke ist eine bekannte Eigenschaft [2, 3]. Daher wird erwartet, dass die Verwendung von HMVA in Zementen die Konzentration in der Endmischung erhöht.

Aus einer ganzheitlichen Perspektive betrachtet, besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Menge des HMVA-Bindemittels und Chlorid in der Zementmischung. Aus diesen Ergebnissen geht hervor, dass es möglich ist, den Chloridgehalt zu kontrollieren, indem die Verwendung von HMVA auf Werte von 10 bis 15 % begrenzt wird.

Dieser Aspekt ist für Normzemente zu berücksichtigen und für HMVA-Mischungen, bei denen keine Unterscheidung zwischen verschiedenen Korngrößen vorgenommen wurde. Alternativ ist es möglich, zwei unterschiedliche Fraktionen zu erzeugen – eine Cl-arme HMVA-Mischung für genormte Bindemittel und Zemente und eine Cl-reiche Mischung (aus feineren HMVA-Fraktionen) für nicht-genormte Bindemittel.

## 5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die HMVA zeichnen sich durch eine Zusammensetzung aus, die zwischen der von Hüttensand und Steinkohleflugasche liegt, und dieser Aspekt ist die Grundlage für die Versuche zur Verwendung als Zuschlagstoff in Zementen. Im Allgemeinen wurden die Zement-/Bindemittelleigenschaften und -anforderungen durch den Zusatz von HMVA in den Zementmischungen ausreichend erfüllt. Vor diesem Hintergrund gibt es noch Herausforderungen, die in weiteren Aktivitäten und Debatten angegangen werden müssen.

Normativer Rahmen: Derzeit wird die Verwendung von mineralischen Abfällen in technischen Bauwerken durch eine *Eckpunkte-Dokument* (2004) basiert auf den LAGA M20 normiert. Da die Ersatzbaustoffverordnung (EBV) in August 2023 in Kraft treten und damit die LAGA M20 überholen wird, ist die Frage berechtigt, ob dies zu einer aktualisierten Verordnung führen wird. Dieser Aspekt erfordert notwendigerweise aktualisierte Grenzwerte, die eventuell die in den letzten Jahrzehnten zunehmende Verwendung alternativer Brennstoffe in der Zementindustrie [26] und ihr Potenzial, Schwermetalle aus dem Brennstoff in die Zemente zu übertragen, berücksichtigen sollten [10].

Schwermetalle, Chloride: um die Anforderungen bestehender und künftiger Vorschriften zu erfüllen, lassen sich zwei weitere Entwicklungsrichtungen ableiten. Die erste besteht in der Intensivierung der Aschebehandlung, wie in diesem Projekt gezeigt wurde und zielt auf weitere Aktivitäten zur Prozessverbesserung ab. Die zweite besteht in der Verbesserung der Eigenschaften der Schlacke während ihrer Herstellung. Dieser Aspekt kann mit dem Beispiel der Eisenindustrie in Verbindung gebracht werden, in der das Abschreckverfahren im Laufe der Jahre modifiziert und optimiert wurde, um die mechanischen/chemischen Eigenschaften der Hochofenschlacken zu verbessern und damit deren Einsatz in der Zementindustrie zu fördern [17]. Zieht man eine Parallele zu Verbrennungsanlagen, so sind Aschelöschung, Verbrennungsparameter und Brennstoff-/Abfallkonditionierung Aspekte, die langfristig untersucht werden sollten und die sich positiv auf die Qualität der entstehenden Schlacken auswirken können.

## 6. Quellen

- [1] Abis, M.: A novel approach for the optimisation of material recovery from Municipal Solid Waste Incineration bottom ash. Verlag Abfall aktuell, 2021
- [2] Astrup, T. et al.: Treatment and Reuse of Incineration Bottom Ash. *Environmental Materials and Waste: Resource Recovery and Pollution Prevention*, 2016, S. 607 – 645. doi: 10.1016/B978-0-12-803837-6.00024-X
- [3] Bunge, R.: Recovery of Metals from Waste Incineration Bottom Ash. In: Holm, O.; Thomé-Kozmiensky E. (eds): *Removal, Treatment and Utilisation of Waste Incineration Bottom Ash*. Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, Neuruppin, 2021, S. 63 – 143
- [4] Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.) DIN EN 197-1:2011-11 Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement; Deutsche Fassung EN 197-1:2011
- [5] Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.) DIN EN 196-3:2017-03 Prüfverfahren für Zement - Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit; Deutsche Fassung EN 196-3:2016
- [6] Ehbrecht, A. et al.: Entwicklung eines kombinierten Kristallisationsverfahrens zur Gewinnung von Phosphatdünger aus dem Abwasserreinigungsprozess mit vollständiger Verwertung der Restphasen in der Zementindustrie, 2016
- [7] Emele, L. et al.: Decomposition analysis of CO<sub>2</sub> emissions in the European cement sector - Identifying drivers of emission trends between 2005 and 2018. Berlin, 2022
- [8] European Commission: A European Green Deal, 2019, [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en) [Zugriff am: 24.02.2023]
- [9] European Environmental Agency: EU Emissions Trading System (ETS) data viewer. Activity code 29 Production of cement clinker, 2022. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/emissions-trading-viewer-1> [Zugriff am: 24.02.2023]
- [10] Fzka, W. B. et al. (Umweltbundesamt): Heavy metals in cement and concrete resulting from the co-incineration of wastes in cement kilns with regard to the legitimacy of waste utilisation, 2003. doi: 10.5445/IR/270055717
- [11] Heidelberg Cement Deutschland: 1.6.2 Erstarren. In: *Betontechnische Daten*, 2007. <https://www.betontechnische-daten.de/de/zement/zementeigenschaften/erstarren> [Zugriff am: 13.01.2023]
- [12] Heidemann Recycling GmbH: HMVA Zusammensetzung, eigene Daten, 2022
- [13] Heidemann Recycling GmbH: S-CEM®, eigene Analysen, 2022
- [14] ITAD – Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V., IGAM – Interessengemeinschaft der Aufbereiter und Verwerter von Müllverbrennungsschlacken: Aufbereitung von HMV-Schlacken (Rostfeuerungsanlagen MVA und EBS-Kraftwerke) – Umfrage, 2022
- [15] Marmier A.; European Commission; Joint Research Centre: Decarbonisation options for the cement industry. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023
- [16] Neuwahl F. et al.: Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration, 2019
- [17] Panesar D. K.: Supplementary cementing materials. *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete*, 2019, S. 55 – 85. doi: 10.1016/B978-0-08-102616-8.00003-4
- [18] Presse- und Informationsamt der Bundesregierung: Kohleausstieg und Strukturwandel | Bundesregierung, 2023. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/kohleausstieg-1664496> [Zugriff am: 24.02.2023]
- [19] Spohn, C.: ITAD Jahresbericht 2020, 2021
- [20] Statistisches Bundesamt (Destatis): Abfallentsorgung: Deutschland, Jahre, Abfallarten: Rost- und Kesselaschen sowie Schlacken (oh.190111). In: *Tabelle 32111-0002*, 2022. <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online> [Zugriff am 13.01.2023]

- [21] Unsel, J. O.: Untersuchung der inneren Kornverteilung von (Multi)-Kompositzementen, 2020. doi: 10.21268/20200214-0
- [22] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Zement-Taschenbuch 51. Ausgabe, 2008
- [23] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Dauerhaftigkeitseigenschaften von Betonen mit hüttensand- und flugaschereichen Zementen, 2017. <https://www.vdz-online.de/wissensportal/forschungsprojekte/dauerhaftigkeitseigenschaften-von-betonen-mit-huettensand-und-flugaschereichen-zementen> [Zugriff am: 24.02.2023]
- [24] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Hrsg.: Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2020; Stand Juli 2021. Düsseldorf, 2021
- [25] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Hrsg.: Zementindustrie im Überblick 2021/2022; Stand August 2021. Berlin, 2022
- [26] Verein Deutscher Zementwerke e.V. Hrsg.: Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2021. Düsseldorf, 2022
- [27] Verein Deutscher Zementwerke Hrsg.: Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien. Düsseldorf, 2020
- [28] Vogl, V.; Åhman, M; Nilsson, L. J.: Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. J Clean Prod 203, 2018, S. 736 – 745. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.08.279
- [29] Wirtschaftsverband Mineralische Nebenprodukte e.V.: Produkte aus Steinkohlekraftwerken – Produktinformation, 2016
- [30] Wirtschaftsverband Mineralische Nebenprodukte e.V. (WIN): Produktinformation Steinkohleflugasche; 2016. <https://www.win-ev.org/fileadmin/win-ev.org/Produkte/Produktinformation-Steinkohlenflugasche-2016-09.pdf> [Zugriff am: 13.01.2023]

## Ansprechpartner



**Dr.-Ing. Marco Abis**  
Heidemann Recycling GmbH  
Leiter Forschung und Entwicklung  
Beim Industriehafen 39  
28237 Bremen, Deutschland  
[m.abis@heidemann-recycling.de](mailto:m.abis@heidemann-recycling.de)

**Dr. rer. nat. Georg Bachmann**  
Selbständiger Berater  
Alte Landstraße 20  
25588 Oldendorf, Deutschland  
[bachmann8@aol.com](mailto:bachmann8@aol.com)

**Dipl.-Ing. Michael Larisch**

EEW Energy from Waste GmbH

Leiter HSQ und Cybersecurity

Schöninger Straße 2 – 3

38350 Helmstedt, Deutschland

michael.larisch@eew-energyfromwaste.com



**Dipl.-Ing, Dipl.-Wirtsch.-Ing. Jörn Richter**

Heidemann Recycling GmbH

Geschäftsführer

Beim Industriehafen 39

28237 Bremen, Deutschland

j.richter@heidemann-recycling.de

# Verwertung von Klärschlamm

2018: **Verwertung von Klärschlamm**

ISBN: 978-3-944310-43-5

Preis: **55,00 EUR**

2019: **Verwertung von Klärschlamm 2**

ISBN: 978-3-944310-49-7

Preis: **55,00 EUR**

2020: **Verwertung von Klärschlamm 3**

ISBN: 978-3-944310-55-8

Preis: **60,00 EUR**

2021: **Verwertung von Klärschlamm 4**

ISBN: 978-3-944310-56-5

Preis: **75,00 EUR**

2022: **Verwertung von Klärschlamm 5**

ISBN: 978-3-94431066-4

Preis: **75,00 EUR**



Mit dem Inkrafttreten der Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung vom 3. Oktober 2017 werden weitreichende Veränderungen in der Aufbereitung und Behandlung von Klärschlämmen erforderlich. Zum einen schränkt die Verordnung zukünftig die herkömmliche Verwertung in der Landwirtschaft deutlich ein. Zum anderen wird dem bundespolitischen Ziel einer weitergehenden Kreislaufwirtschaft Rechnung getragen. Der Fokus liegt hierbei folgerichtig auf dem enthaltenen Phosphor, welches seitens der Europäischen Kommission seit 2014 als *kritischer Rohstoff* eingestuft wird. Diverse Verfahrensansätze zur Phosphorrückgewinnung direkt aus Klärschlämmen oder indirekt aus den Rückständen einer thermischen Behandlung befinden sich in unterschiedlichsten Entwicklungsstadien. Vor dem Hintergrund einer hinsichtlich Spezifikation (Größe, Ausbaustufen) und Umfeld (urban, ländlich, lokale Verwertungsmöglichkeiten) der Kläranlagen äußerst heterogenen Branche stellt sich für viele Betreiber die Frage nach sinnvollen technischen Lösungen und wirtschaftlich passenden Konzepten. Das im Rahmen der Berliner Klärschlamm-Konferenz im Herbst 2021 veröffentlichte Fachbuch bietet eine Übersicht zur veränderten Rechtslage sowie zu aktuellen Verfahrensansätzen und Praxiserfahrungen.

## Paketpreis

225,00 EUR  
statt 310,00 EUR

Bestellen Sie direkt beim TK Verlag oder unter [books.vivis.de](https://books.vivis.de)

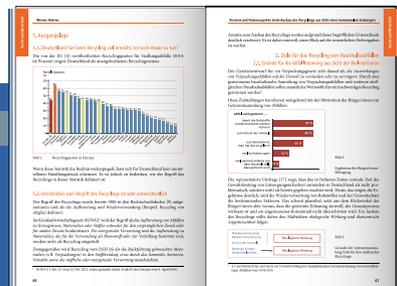
Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Dorfstraße 51

16816 Nietwerder-Neuruppin

Tel. +49 3391-45 45-0

E-Mail: [order@vivis.de](mailto:order@vivis.de)



## Ash2Salt – Industrial Scale Resource Recovery from Waste2energy Ashes

Christian Kabbe and Giovanna Chiara

If we are serious about creating a sustainable society, we have to start using the materials we already have as long and as often as possible.

The Ash2Salt technology extracts commercial salts from fly ash, mainly the hazardous by-product from incineration. Valuable raw materials in the ash, such as the agricultural nutrient potassium, can be circulated and used again. This cuts the CO<sub>2</sub> footprint of the salts by around 90 % compared to traditional, virgin salt production.

Ragn-Sells, a Swedish waste and resource management company has inaugurated the World's first industrial scale plant based in EasyMining's patented technology Ash2Salt. The plant has been built by Hitachi Zosen Inova and provides a capacity for processing 130,000 t fly ash per year.

The Ash2Salt process washes the fly ash, and three commercial grade salts are extracted from the liquid: potassium chloride, sodium chloride, and calcium chloride.

The salts sodium chloride (table salt), potassium chloride, and calcium chloride are used to produce plastics, glass, paper, soap, paints, fertilisers, and medicines. Salts can also be added to improve food, animal feed, fabrics, and construction materials or used for de-icing and dust-binding. The entire amount of salt obtained in this way is sold with market prices.

At the same time, the volume of waste is reduced and, depending on the composition of the fly ash and the applicable legal norms, disposal cost can be lowered, or it can be even valorized as such.

## Ash2Salt – Ressourcenrückgewinnung aus Waste2Energy-Aschen im Industriemaßstab

Christian Kabbe und Giovanna Chiara

1.	Hintergrund .....	184
2.	Die Ash2Salt-Anlage in Högbytorp, Schweden .....	187
3.	Ash2Salt – der Prozess .....	188
4.	Reduktion gefährlichen Abfalls bei gleichzeitiger Extraktion kommerzieller Salze ...	191
5.	Ausblick .....	192

Wenn wir es mit der Transformation in eine nachhaltige Gesellschaft ernst meinen, müssen wir beginnen, die Materialien, die wir bereits haben, so lange und so oft wie möglich zu nutzen.

Die Ash2Salt-Technologie extrahiert kommerzielle Salze aus Flugasche, dem oftmals gefährlichen Nebenprodukt der Müllverbrennung. Wertvolle Rohstoffe in der Asche, wie zum Beispiel der essentielle Makronährstoff Kalium, können im Kreislauf geführt und wiederverwendet werden. Dadurch kann ebenfalls der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Salze im Vergleich zur herkömmlichen, reinen Salzproduktion um etwa 90 % reduziert werden.

Ragn-Sells, ein schwedisches Abfall- und Ressourcenmanagementunternehmen, hat im April 2023 die weltweit erste Anlage im industriellen Maßstab offiziell eingeweiht, die auf der patentierten Technologie Ash2Salt von EasyMining, einem Tochterunternehmen innerhalb der Ragn-Sells Gruppe, basiert. Die Anlage wurde von Hitachi Zosen Inova gebaut und bietet eine Kapazität zur Verarbeitung von 130.000 t Flugasche pro Jahr. Beim Ash2Salt-Verfahren wird die Flugasche gewaschen. Aus der Waschlösung werden die folgenden drei Chloridsalze in handelsüblicher Qualität extrahiert: Kaliumchlorid, Natriumchlorid und Calciumchlorid.

Die Salze Natriumchlorid (Speisesalz), Kaliumchlorid und Calciumchlorid werden zur Herstellung von Kunststoffen, Glas, Papier, Seife, Farben, Düngemitteln und Medikamenten verwendet. Salze können auch zur Verbesserung von Lebensmitteln, Futtermitteln, Stoffen und Baumaterialien zugesetzt oder zur Enteisierung und Staubbindung eingesetzt werden.

Die gesamte so gewonnenen Salzmenge wird zu jeweils handelsüblichen Preisen vermarktet.

Gleichzeitig wird das Abfallvolumen reduziert und je nach Zusammensetzung der Flugaschen und geltenden Rechtsnormen die Entsorgung günstiger bzw. die Verwertbarkeit als solche ermöglicht.

## 1. Hintergrund

In Schweden fallen jährlich etwa 300.000 t Flugaschen aus Waste2Energy-Anlagen an, die bislang als gefährlicher Abfall entsorgt werden mussten. Sich abzeichnende Limitierungen bei den Beseitigungskapazitäten, sowie generell steigende Kosten für diese, als auch steigende Nachhaltigkeitsbestrebungen führten dazu, attraktive Rahmenbedingungen für die Ressourcenrückgewinnung zu schaffen. Ohnehin wird man auch im globalen Kontext angesichts des Bevölkerungswachstums nicht umhinkommen, die vorhandenen Ressourcen effizienter zu nutzen, so dass Rückgewinnung und Recycling aus bislang vernachlässigten Abfallströmen an Bedeutung gewinnen werden.

Das Jahr 2022 hat die fatalen globalen Abhängigkeiten rohstoffarmer Länder wie Deutschland für uns alle greifbar gemacht. Der Wettbewerb um essentielle Ressourcen wird sich mit dem globalen Bevölkerungswachstum unvermeidbar verschärfen, und zwar unabhängig vom Wohlstand. Letzterer wird eher eine Rolle bei Überkonsum und bei den Luxusressourcen wie z.B. Technologiemetallen spielen. Leider ist Essentialität *noch* nicht eines der Kriterien zur Bewertung der Kritikalität von Ressourcen für die europäische Wirtschaft. Zwar ist z.B. der essentielle Nährstoff Phosphor in der Critical Raw Materials List seit 2014 enthalten, doch noch nicht auf der Strategic Raw Materials List, der nochmals eine höhere Bedeutung beigemessen wird. Lithium mag zwar die mentale Stimmung aufhellen, doch satt macht es noch lange nicht. Es dürfte interessant werden, wo Wirtschaft, Politik und Gesellschaft jeweils Prioritäten setzen, obwohl sie eigentlich eine Einheit darstellen sollten.

Egal wie kurz- oder langfristig politische Weichen gestellt werden, an einem Mehr an Rückgewinnung und Recycling führt kein Weg vorbei. Verschwendung ist vermeidbar, doch die generelle Ressourceneffizienzsteigerung ist es nicht.

In den sogenannten Industrieländern werden Abfälle zum Großteil thermisch verwertet. Seit Implementierung von Emissionsbeschränkungen fallen Flugaschen an, in denen sich neben einigen Wertstoffen gemäß der Aufgabe der Emissionskontrolle auch zahlreiche Schadstoffe konzentrieren.

Um Rückgewinnung und Recycling nachhaltig nennen zu dürfen ist die Separation der Wertstoffe von den Schadstoffen erforderlich. Saubere Rezyklate lassen sich nur erzeugen, wenn diese aus der Abfallmatrix (Flugasche) extrahiert werden und in ein klar definierbares Produkt überführt werden.

In den hier behandelten Flugaschen machen Chloride etwa 20 % der Aschematrix aus. Extrahiert man diese und separiert sie anschließend in die jeweiligen individuellen Salze gewinnt man nicht nur Produkte, sondern reduziert und stabilisiert gleichzeitig auch die Restmatrix. Das wiederum reduziert das Abfallvolumen und kann u.U. auch dazu führen, dass die Klassifizierung, sprich Zusammensetzung so weit verbessert wird, dass aus gefährlichem Abfall ein ungefährlicher Abfall wird bzw. gar die stoffliche Verwertbarkeit der Restmatrix ermöglicht wird.

# Wir klären das für Sie - aber flockig!

# SEPAR CHEMIE



**SEPAR CHEMIE GmbH** entwickelt und vertreibt individuell angepasste Flockungsmittel und biologisch abbaubare Entschäumer zur Behandlung nass gewaschener Schlacken, Aschen und Stäube.

**Wir bieten ebenfalls ein breites Sortiment  
an Abwasserchemikalien an:**

- maßgeschneiderte **Mischprodukte**
- gebrauchsfertige **Lösungen**
- **Adoptionsmittel**
- **Flockungsmittel**
- **Flotationshilfsmittel** u.v.m.

**Wir beraten Sie gerne persönlich und kostenlos.**



# Sofort zu verwerten

## Müll und Abfall

Fachzeitschrift für Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft

- ▶ Fachbeiträge zu technischen, ökologischen, wirtschaftlichen, rechtlichen Aspekten
- ▶ Nachrichten und Kurzberichte
- ▶ Aktuelle Stellungnahmen der Verbände und Organisationen
- ▶ Produktvorstellungen aus der Industrie
- ▶ Veranstaltungskalender für Tagungen und Messen, Aus- und Weiterbildungen

Herausgegeben vom Erich Schmidt Verlag, Berlin

Geschäftsstelle der Redaktion:

**Dipl.-Biol. Birte Turk und Dipl.-Ing. Thomas Turk**

Engelberg 2, 37130 Gleichen (bei Göttingen)

Telefon (05592) 9 27 95 97

E-Mail: [Redaktion.Muell+Abfall@ESVmedien.de](mailto:Redaktion.Muell+Abfall@ESVmedien.de)

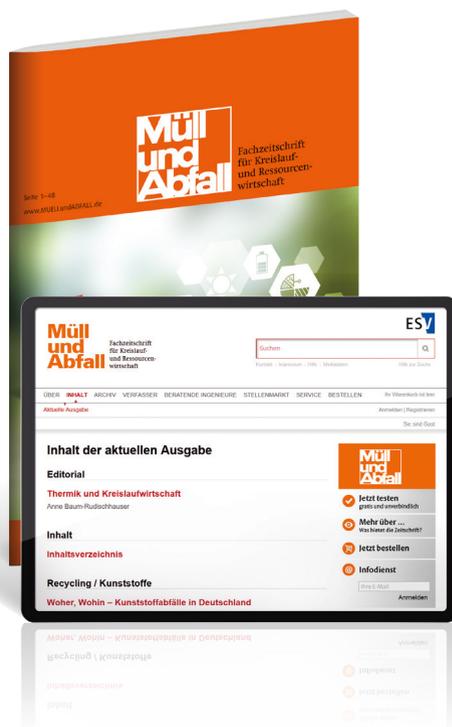
Verantwortlicher Redakteur:

**Prof. Dr.-Ing. Klaus Fricke**, Braunschweig

55. Jahrgang 2023, 12 Ausgaben jährlich,

ca. 60 Seiten pro Heft

eJournal (inkl. Infodienst zu neuen Beiträgen mit jeder Ausgabe) und Zeitschrift



Jetzt gratis testen:

[www.MUELLundABFALL.de/info](http://www.MUELLundABFALL.de/info)

Bestellungen bitte an den Buchhandel oder:

Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG

Genthiner Str. 30 G · 10785 Berlin · Tel. (030) 25 00 85-229

Fax (030) 25 00 85-275 · [ESV@ESVmedien.de](mailto:ESV@ESVmedien.de) · [www.ESV.info](http://www.ESV.info)

**ESV** ERICH  
SCHMIDT  
VERLAG

*Auf Wissen vertrauen*

## 2. Die Ash2Salt-Anlage in Högbytorp, Schweden

Sich seiner Vorreiterrolle in Sachen Transformation hin zu einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft bewusst, hat das schwedische Unternehmen Ragn-Sells den Bau der weltweit ersten Ash2Salt-Anlage beschlossen, ohne auch nur ein Gramm Flugasche zur Behandlung unter Vertrag zu haben. Das Interesse der Flugascheerzeuger wuchs schnell und umso schneller, je weiter sich die Bauphase ihrem Abschluss näherte. Bereits vor Ende der Bauarbeiten war die Kapazität der Anlage schon überzeichnet, so dass bereits ein weiterer Standort für eine zweite Anlage in Schweden exploriert wird. Ferner ist davon auszugehen, dass nun mit dem Betrieb der Referenzanlage das internationale Roll-out Fahrt aufnehmen wird.

Im Mai 2020 erfolgte der erste Spatenstich. Die Verfahrenstechnik wurde vom Anlagenbauunternehmen Hitachi Zosen Inova (HZI) geplant und gebaut. Noch während der Bauphase wurde im Jahr 2021 ein Lizenzabkommen zwischen EasyMining und HZI geschlossen, welches es dem global agierenden Anlagenbauer ermöglicht, diese patentierte Technologie in zwölf Ländern außerhalb Skandinaviens zu vermarkten.

Während die Erstinbetriebnahme im Herbst 2022 erfolgte, wurde die Anlage schlussendlich im April 2023 offiziell im Beisein der schwedischen Umweltministerin und Vertreter:innen zahlreicher Unternehmen in Betrieb genommen.

Fortan werden jährlich 130.000 t Flugasche (gefährlicher Abfall), aus 17 Waste2Energy-Anlagen kommend prozessiert.

Daraus lassen sich jährlich etwa 6.000 t KCl, 10.000 bis 12.000 t NaCl jeweils als Feststoffe und etwa 25.000 t  $\text{CaCl}_2$  als 36 %-ige Lösung jeweils in marktgängigen Qualitäten gewinnen. Der gewaschene Ascherest wird als Filterkuchen mit etwa 60 % Trockenmasse als ungefährlicher Abfall abgelagert. Gleichzeitig fungiert die Anlage auch als Abwasserbehandlungsanlage für das lokal anfallende Deponiesickerwasser sowie lokal anfallende Prozesswässer. Schwermetalle werden in Form von Sulfiden abgeschieden und Stickstoff in Form einer 40 %-igen Ammoniumsulfatlösung gewonnen, welche der nebenan betriebenen Waste2Energy-Anlage der e.on für die Rauchgasbehandlung zur Verfügung gestellt wird. Diese wiederum liefert ausreichend Wärmeenergie, um die Ash2Salt-Anlage zu versorgen.



Bild 1:

Prozessgebäude und Flugaschesilos der Ash2Salt-Anlage in Högbytorp, Schweden

### 3. Ash2Salt – der Prozess

Flugaschen aus der benachbarten e.on Waste2Energy-Anlage sowie 16 weiteren Anlagen im Einzugsgebiet werden in Silos gelagert und von dort in den Prozess gespeist. Im ersten Schritt wird die Flugasche mit dem Waschwasser vermischt und gewaschen. Als Waschwasser kann, je nach lokalen Gegebenheiten, Prozesswasser aus anderen Anlagen, Deponiesickerwasser, Regenwasser usw. eingesetzt werden. Der Wäsche, bei der v.a. die Chloride in Lösung gebracht und ausgewaschen werden folgt eine Filtration zur Fest-Flüssigtrennung. Die gewaschene Asche fällt als Filterkuchen mit etwa 60 % TM an, während in der wässrigen Phase die Chloride und ein gewisser Anteil an ausgewaschenen Schwermetallen in den nächsten Prozessschritt überführt werden. Aus dieser wässrigen Lösung werden nun die enthaltenen Schwermetalle per Sulfidfällung und einer weiteren Fest-Flüssigtrennung separiert. Die resultierende Salzlösung enthält die Chloride des Kaliums, Natriums und Calciums.

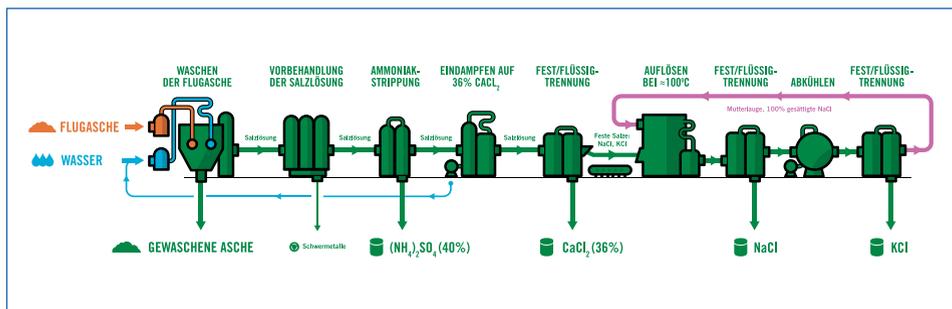


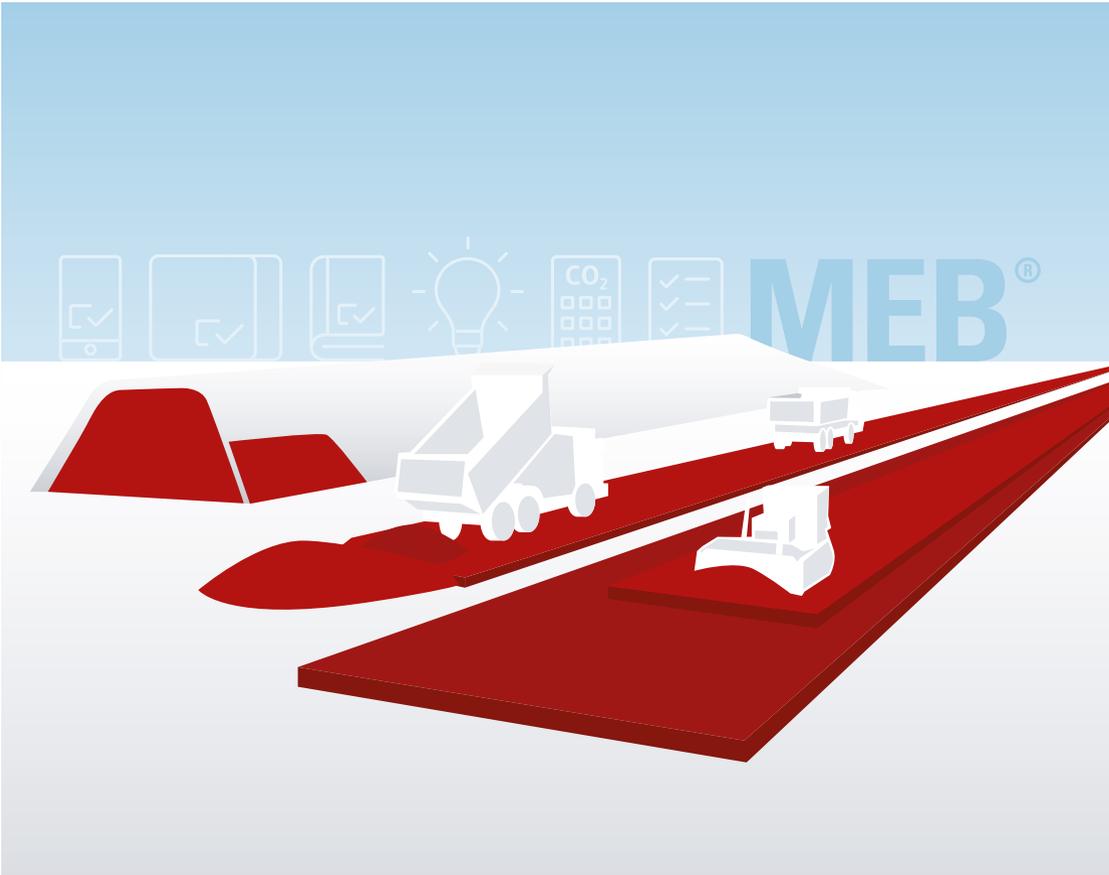
Bild 2: Schematische Abfolge der wesentlichen Ash2Salt-Prozessschritte

Diese wird nun soweit konzentriert, bis eine Konzentration des  $\text{CaCl}_2$  von 36 % erreicht ist. Dabei fallen sowohl das  $\text{KCl}$ , als auch  $\text{NaCl}$  als Misch-Prezipitat aus und können in einer weiteren Fest-Flüssigtrennung von der  $\text{CaCl}_2$ -Lösung separiert werden. Diese wird dann in einen Vorratstank zur weiteren Vermarktung überführt.

Zur Separation des  $\text{KCl}$  vom  $\text{NaCl}$  wird das Salzgemisch bei etwa 100 °C wiederum in Lösung gebracht und durch ihre unterschiedlichen Löslichkeitsgleichgewichte bei unterschiedlichen Temperaturniveaus sauber voneinander getrennt. Sowohl  $\text{NaCl}$ , als auch  $\text{KCl}$  fallen dann als Produkte in fester Form an und werden in die jeweiligen Produktlager überführt.

Vor der Evaporation wird ebenfalls  $\text{NH}_3$  ausgetrieben, der dann mit Schwefelsäure zu einer Ammoniumsulfatlösung reagiert. Diese wird als 40 %-ige Lösung ausgeschleust und kann entweder als Nährstofflieferant in Düngemitteln verwendet oder zur Rauchgasbehandlung in einer benachbarten Verbrennungsanlage genutzt werden. Diese Synergie wird z.B. im vorliegenden Beispiel in Högbypörp genutzt.

Da die Ash2Salt-Anlage als *Zero-Liquid-Discharge*-Anlage konzipiert ist, also abwasserfrei betrieben wird, kann die Standortwahl unabhängig von der Verfügbarkeit einer lokalen Kläranlage oder eines Vorfluters getroffen werden.



## Das Leitmedium zur Ersatzbaustoffverordnung

Seit dem 1. August 2023 ist die Ersatzbaustoffverordnung (EBV) maßgebend für die Nutzung von Ersatzbaustoffen. Sie hat die bis dahin geltenden Ländervorgaben abgelöst. Alles, was Sie über die EBV wissen müssen, finden Sie auf unserer MEB® Themenseite – von den Grundlagen über praktische Arbeitshilfen bis zu umfangreichen Schulungsangeboten. Erfahren Sie mehr auf [meb-services.de](https://meb-services.de)

# ReSource

## Abfall • Rohstoff • Energie

Jahresabonnement (4 Ausgaben): 62 Euro (incl. MwSt. und Versand)

36. Jahrgang 2023



Für Wirtschaft und Politik ist ein nachhaltiger Umgang mit Abfall, Rohstoffen und Energie eine Frage der Zukunftssicherung. Umwelttechnisches Know-how und Informationen über grundlegende Entwicklungen sind für den Erfolg entscheidend. Mit der Fachzeitschrift **“ReSource – Abfall, Rohstoff, Energie”** sind Sie bestens über nachhaltiges Wirtschaften informiert.

Neben Forschungsergebnissen stellt die Fachzeitschrift praxisrelevante Konzepte und Verfahren zur Vermeidung und Verringerung von Umweltbelastungen vor. Verfahren der Abfallbehandlung werden auf ihre Ressourceneffektivität und Umsetzbarkeit geprüft. Experten aus dem In- und Ausland diskutieren Erfordernisse und Beispiele für eine zeitgemäße Rohstoffwirtschaft.

RHOMBOS-VERLAG, Postfach 67 02 17, D-10207 Berlin, Tel. 030.261 94 61, Internet: [www.rhombos.de](http://www.rhombos.de), eMail: [verlag@rhombos.de](mailto:verlag@rhombos.de)

## 4. Reduktion gefährlichen Abfalls bei gleichzeitiger Extraktion kommerzieller Salze

Wie bereits erläutert enthalten Waste2Energy-Flugaschen etwa 20 % Chloride, die die Verwertbarkeit der Flugaschen be- bzw. verhindern und die Deponierung verteuern.

Durch Extraktion der Chloride lassen sich mehrere Fliegen mit einer Klappe schlagen, welche sich kostensenkend bzw. wertschöpfend auswirken:

- Substanzielle Abfallmengenreduktion,
- Verbesserung der Aschequalität und damit einhergehend auch der Deponieklasse je nach den jeweiligen Anforderungen bzw. sogar Eröffnung von Verwertungsoptionen,
- Erzeugung kommerzieller Produkte.

Daneben können auch folgende Aspekte positiv bewertet werden:

- Reduktion der Importabhängigkeit für z.B. Kalium (je nach Land),
- Reduktion des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks im Vergleich zur herkömmlichen Produktion von Salzen,
- Synergistische Abwasserbehandlungsoption für den jeweiligen Standort.

Zu den kommerziellen Produkten gehören:

### Kaliumchlorid

Kalium ist einer der Schlüsselnährstoffe in Düngemitteln und für die Landwirtschaft von entscheidender Bedeutung, damit sie die von uns benötigten Nahrungsmittel erzeugen kann. Heutzutage wird KCl abgebaut, was große Klimaemissionen verursacht, und die Produktion konzentriert sich weitgehend auf wenige Länder. Kaliumchlorid aus dem Ash2Salt-Prozess hat einen um 93 % geringeren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck als das Äquivalent aus dem bergbaulichen Abbau.

### Calciumchlorid

Die übliche Produktion von Calciumchlorid erfordert den Abbau und die Erhitzung von Kalkstein, ein weiterer klimaintensiver Prozess. Es wird hauptsächlich zum Enteisen bzw. als Staubbinder verwendet und sorgt bei der Herstellung mit dem Ash2Salt-Verfahren für einen um 92 % geringeren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck.

### Natriumchlorid

NaCl ist den meisten Menschen als gewöhnliches Speisesalz bekannt, ist eine der am häufigsten verwendeten chemischen Verbindungen auf dem Planeten. Viele industrielle Prozesse sind auf große Mengen Natriumchlorid angewiesen. Da der Großteil davon aus dem Bergbau oder der Verdunstung von Meerwasser stammt, kann die Ash2Salt-Technologie die Klimaemissionen der Produktion um bis zu 88 % senken.

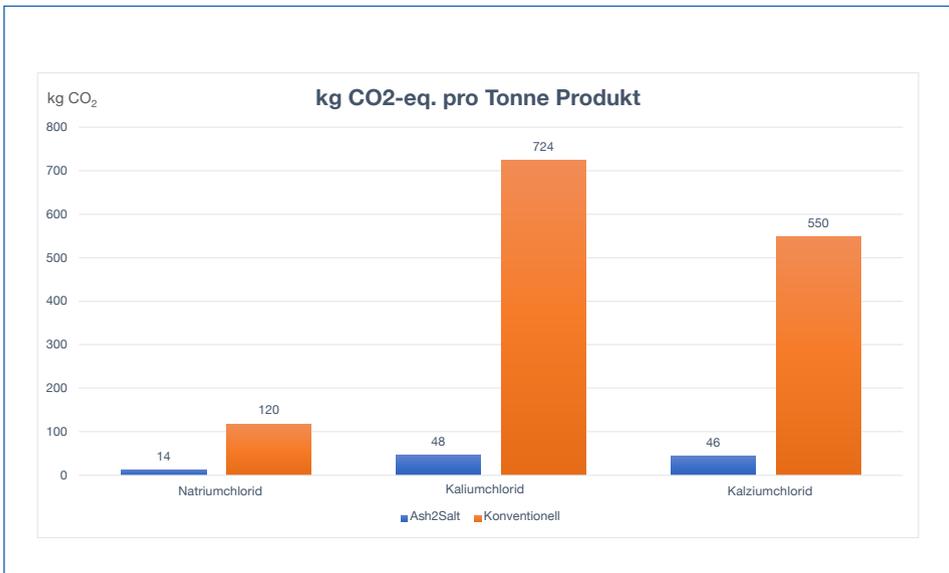


Bild 3: Darstellung der CO<sub>2</sub>-Minderungspotentiale berechnet von GC Rieber

## 5. Ausblick

Nachdem nun die weltweit erste Ash2Salt-Anlage erfolgreich in Betrieb gegangen ist und bereits eine zweite in Schweden vorgesehen ist, gilt es nun über Ländergrenzen hinwegzuschauen und mit dem globalen Roll-out zu beginnen. Gemeinsam mit dem Lizenznehmer Hitachi Zosen Inova als starkem Partner und global agierendem Anlagenbauer soll dies gelingen.

Es ist davon auszugehen, dass es Länder oder Regionen mit guten Rahmenbedingungen gibt und andere, in denen die Rahmenbedingungen weniger vorzüglich sind. Es steht allerdings außer Zweifel, dass mit wachsender Bevölkerung sowie steigender Industrialisierung auch die Kapazitäten der energetischen Abfallverwertung steigen werden. Offensichtlich gibt es auch einen direkten Zusammenhang zwischen Wohlstand, Überkonsum und daran gekoppeltem Abfallanfall. Auch wenn viel über Abfallvermeidung geredet wird und sich Abfallvermeidungsstrategien zumindest auf dem Papier die Klinke in die Hand geben, ist von all dem im realen Leben noch wenig bis nichts zu spüren. Es ist also davon auszugehen, dass Abfallverwertung, Ressourcenrückgewinnung und Recycling auch in den kommenden Jahrzehnten Teil der Wirtschaft sein werden. Die Transformation von der linearen in eine mehr und mehr zirkulare Wirtschaft wird nicht nur, sondern muss sogar voranschreiten, um die essentiellen, als auch die eher als Luxus zu bezeichnenden Bedürfnisse einer wachsenden und vielleicht auch prosperierenden Erdbevölkerung befriedigen zu können. Bis auf den Parameter Solarenergie ist der Planet Erde als geschlossenes System zu betrachten, welches Ressourcen nur begrenzt zur Verfügung stellt. Es ist *noch* an uns zu entscheiden, was wir damit anstellen.

Des Menschen Ressourceneffizienz wird wahrscheinlich erst dann ihr Optimum erreichen, wenn jedem Menschen das gleiche Ressourcenbudget als unantastbares Geburtsrecht anerkannt wird, welches weder verhandelbar noch handelbar ist, also auch nicht durch Zukauf oder Handel aufgestockt werden kann. Ob genügend Zeit bleibt, diese Stufe zu erreichen wird sich zeigen.

Die technischen Lösungen von EasyMining können einen Beitrag leisten, Ressourcen effizienter als bisher zu nutzen und uns allen somit auch mehr Zeit verschaffen.

## Ansprechpartner



### **Dr. Christian Kabbe**

EMG EasyMining Germany GmbH

Geschäftsführer

Am Goldmannpark 12

12587 Berlin, Deutschland

+49 30 6164794 3

Christian.Kabbe@easymining.com

### **Giovanna Chiara**

Hitachi Zosen Inova

Senior Sales Manager

Hardturmstrasse 127

8005 Zürich, Schweiz

+41 79 812370 5

Giovanna.Chiara@hz-inova.com

# Aschen • Schlacken • Stäube Mineralische Nebenprodukte und Abfälle



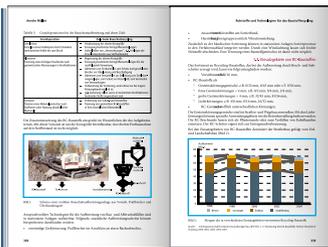
Herausgeber: Thomé-Kozmiensky (et.al.)

2013: <b>Aschen • Schlacken • Stäube</b> – aus Abfallverbrennung und Metallurgie –	ISBN: 978-3-935317-99-3	<b>25,00 EUR</b>
2014: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-11-4	<b>25,00 EUR</b>
2015: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 2</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-21-3	<b>25,00 EUR</b>
2016: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 3</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-28-2	<b>35,00 EUR</b>
2017: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 4</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-35-0	<b>35,00 EUR</b>
2018: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 5</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-41-1	<b>50,00 EUR</b>
2019: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 6</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-47-3	<b>50,00 EUR</b>
2020: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 7</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-53-4	<b>60,00 EUR</b>
2021: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 8</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-54-1	<b>75,00 EUR</b>
2022: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 9</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-58-9	<b>75,00 EUR</b>

Bestellen Sie direkt beim TK Verlag  
oder unter [books.vivis.de](http://books.vivis.de)

## Paketpreis

**225,00 EUR**  
statt 310,00 EUR



Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Dorfstraße 51  
16816 Nietwerder-Neuruppin  
Tel. +49 3391-45 45-0  
E-Mail: [order@vivis.de](mailto:order@vivis.de)

**TK Verlag**

# **Eisen- und Stahlindustrie – Stoffstromverschiebungen durch Umrüstung**

## Transformation of Iron and Steel Industry and Resulting Challenges

Dieter Georg Senk and Felix Firsbach

Abstract: The production of raw steel is accompanied by CO<sub>2</sub> emissions which are to be avoided in future. The use of coal and coke in blast furnaces for the reduction of iron ore to metallic iron (hot metal) shall be replaced by the use of hydrogen in direct reduction facilities to produce direct reduced iron. The fossil energy shall be replaced by power from renewable energy sources. Different optional routes are introduced and compared to the recent technology. The demands of natural gas, hydrogen and electrical power are estimated. There are open questions concerning those requirements since renewable energy sources and the distribution networks are recently in planning status or even under construction but the velocity of that development seems to be lower as demanded. Governmental projects include hydrogen production in foreign countries to import the reduction gas or even directly reduced iron; criticality due to geopolitical changes has to be fought to make sure the steady delivery of energy and material to Europe. A new steel plant in Scandinavia is under construction, European steel makers order new plants or aggregates for technology change and search for specialists to do both, run further production and fulfill the transformation plans. The market of steel good producers claims already intensively the requirement for *green* steel, produced with low or even without CO<sub>2</sub> emission.

# Umstellungen in der Eisen- und Stahlindustrie sowie resultierende Herausforderungen

Dieter Georg Senk und Felix Firsbach

1.	Stahlherstellung im Wandel.....	197
1.1.	Entwicklung der Primärstahlerzeugung .....	197
1.2.	Die Situation in Deutschland .....	200
2.	Herausforderungen durch geplante Umstellungen .....	202
2.1.	Verfahrensrouten .....	203
2.2.	Logistik.....	204
2.3.	Betrachtungen für die Stoffströme Kohle und Schlacke .....	205
3.	Schlussfolgerungen für die Herausforderungen einer Transformation .....	206
4.	Zusammenfassung.....	208
5.	Quellen.....	209

## 1. Stahlherstellung im Wandel

Derzeit sind die Herstellungsverfahren einer tiefgreifenden Transformation ausgesetzt, um den Ausstoß von Kohlendioxid künftig nahezu vollständig zu vermeiden.

### 1.1. Entwicklung der Primärstahlerzeugung

Seit Ende des 18. Jahrhunderts geht die Stahlerzeugung den Weg der Industrialisierung, sodass der Werkstoff Stahl der Gesellschaft für Infrastruktur und persönlichen Gebrauch zur Verfügung steht. Waren es im Jahr 1900 bereits etwa 130 kg Stahl Verbrauch pro Kopf im europäischen Raum, stieg er bis Mitte des 20. Jahrhunderts auf etwa 500 kg pro Einwohner. Für Europa ist seitdem eine Sättigung eingetreten, während sich seit Mitte des 20. Jahrhunderts die Weltstahlerzeugung in nur 50 Jahren verdreifachte [20]. Eine weitere Erhöhung ist wegen der Zunahme der Weltbevölkerung, des global steigenden Lebensstandards und dem steigenden Bedarf an Elektrizität in allen Sektoren zu erwarten.

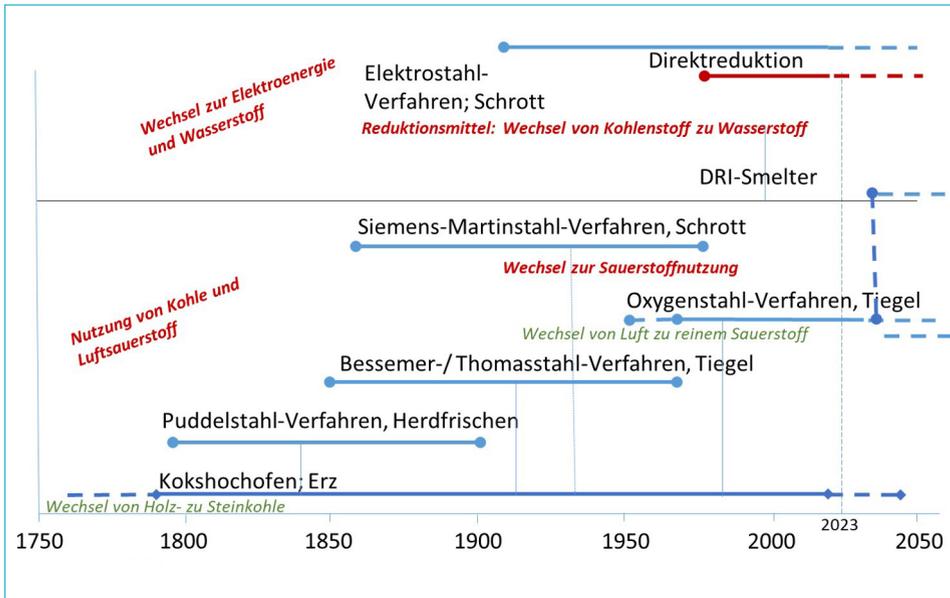


Bild 1: Industrielle Stahlerstellungsrouten im Wandel der Zeit

Quelle: Senk, D.: 150 years development of RWTH Aachen University from a steel researcher's view point, USTB University of Science and Technology Beijing, 70th Anniversary Conf., May 14, 2022, online contribution

Da Stahlschrott in merklichen Mengen noch nicht anfiel, war das Eisenerz die einzige Rohstoffbasis; das Eisen für die Stahlerzeugung wurde in Hochöfen erzeugt, die Kokskohle als Energiequelle nutzen – im 19. Jahrhundert vereinzelt noch Holzkohle. Einen großen Produktivitätssprung stellte um 1860 die Einführung des Bessemer-/Thomasverfahren dar, da es in der Lage war, in kurzer Zeit aus flüssigem Roheisen mit dem Durchblasen von Luft zur Entkohlung flüssigen Rohstahl für die Legierung in Hinblick auf unterschiedliche Stahlwerkstoffe sowie für das formgebende Gießen herzustellen. Dieses neue Konverterverfahren mit der Weiterentwicklung zur Verwendung von reinem Sauerstoff statt Luft ist bis heute Stand der Technik; anzumerken ist, dass der Sauerstoff in einem vorgeschalteten Verfahrensschritt aus der Luft nach dem Lindeverfahren mit elektrischem Energieeinsatz von etwa  $1,2 \text{ kWh/Nm}^3$  gewonnen wird. Der aufkommenden Menge an Schrott wurde mit der Erfindung des Siemens-Martin-Verfahrens begegnet, einem fremdbeheizten Herdschmelzverfahren, das als Energiequelle Brenngas aus Kohle verwendete. Seit etwa 1960 wurde diese Methode zunehmend durch Elektrolichtbogenöfen (LBO oder ELO) ersetzt.

Wie alle energieintensiven Wirtschaftszweige unterliegt auch die Stahlindustrie dem Zwang, den Ausstoß von sogenannten Treibhausgasen, zu denen neben Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) auch Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) gehören, da sie in der Erdatmosphäre die Erderwärmung fördern, möglichst zu unterbinden. Kohlendioxid entsteht bei der Umsetzung von Kohlenstoff mit Sauerstoff, wobei Wärmeenergie freigesetzt wird, etwa beim Hochofenverfahren, bei dem chargierter Steinkohlenkoks unter Energiefreisetzung

zunächst zum Kohlenmonoxid vergast wird, anschließend durch Aufnahme des Sauerstoffes zum  $\text{CO}_2$  oxidiert, wobei es den Sauerstoff aus dem Eisenerz übernimmt und weiterhin zu metallischen Eisen schmilzt (Bild 2).

Neben dem Hauptprodukt Roheisen fallen große Mengen an Schlacke aus Koksasche, Kalk- oder Dolomitstein und Erzgangart an, die in der Zementindustrie als Sekundärrohstoff eingesetzt werden, sowie Stäube als Kreislaufstoffe. Weiterhin entsteht das Gichtgas, dessen Kohlenmonoxidanteil gemeinsam mit dem Kohlenmonoxid aus dem nachgeschalteten Konverterprozess genügend chemische Energie enthält, um das gesamte integrierte Hüttenwerk mit u.a. Wasserdampf oder Strom zu versorgen.

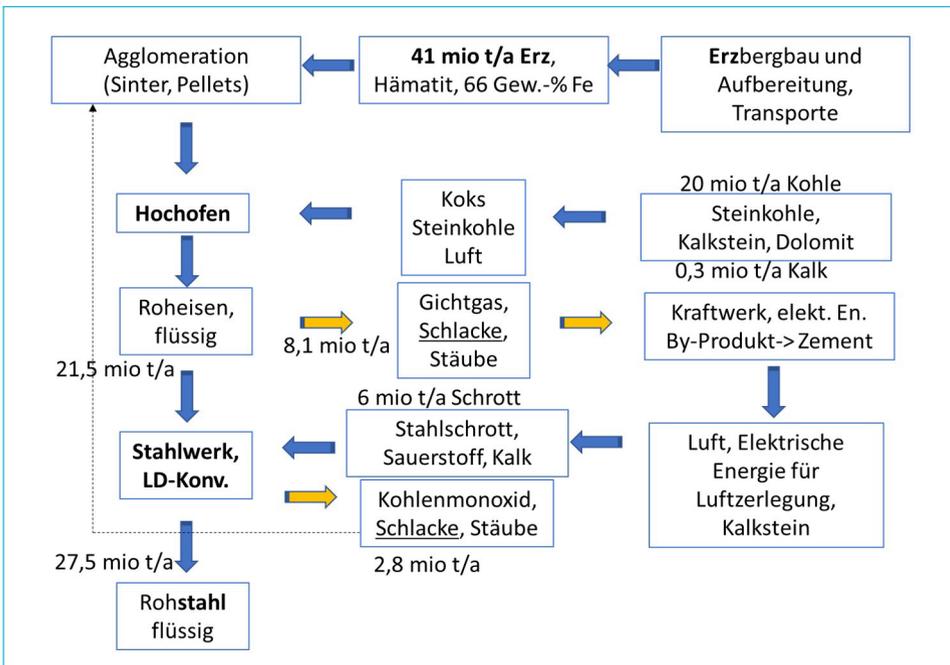


Bild 2: Derzeitige Stoffströme der Hochofen-Konverter-Route für die Flachstahlherstellung in Deutschland

Die sogenannten Direktreduktionsverfahren zur Erz-Eisen-Umwandlung wurden seit Jahrtausenden vor Beginn des Hochofenverfahrens genutzt, sind aber prinzipiell seit Ende des 19. Jahrhundert wissenschaftlich beschrieben [15]; sie begannen erst wieder um 1970 in die industrielle Welt Einzug zu halten; vorzugsweise geschah dies in Regionen, die über reichliche Erdgasvorkommen verfügen. 1974 führte Willy Korf das Midrex-Verfahren in Europa am Standort Hamburg ein [3, 9]. In Europa sollte zunächst Kernenergie die chemische Reduktionsreaktion unterstützen. In der Zeit zwischen 1980 bis 2000 wurden solche Verfahren dann vorzugsweise für das Recycling eisenhaltiger Rest- und Kreislaufstoffe weiterentwickelt, um Umweltschutzmaßnahmen technisch zu flankieren. Das Reduktionsgas für die vorherrschende Schachtofenprozesse (Bild 3)

stammt aus Erdgas, das unter Energiezufuhr zu den Reduktionsgasen Kohlenmonoxid und Wasserstoff reformiert wird, z.B. mit Luftsauerstoff  $\text{CH}_4 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2 \text{H}_2$ , mit  $\text{CO}_2$  aus dem Abgas  $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightarrow 2 \text{CO} + 2 \text{H}_2$  oder mit Wasserdampf  $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{CO} + 2 \text{H}_2$ .

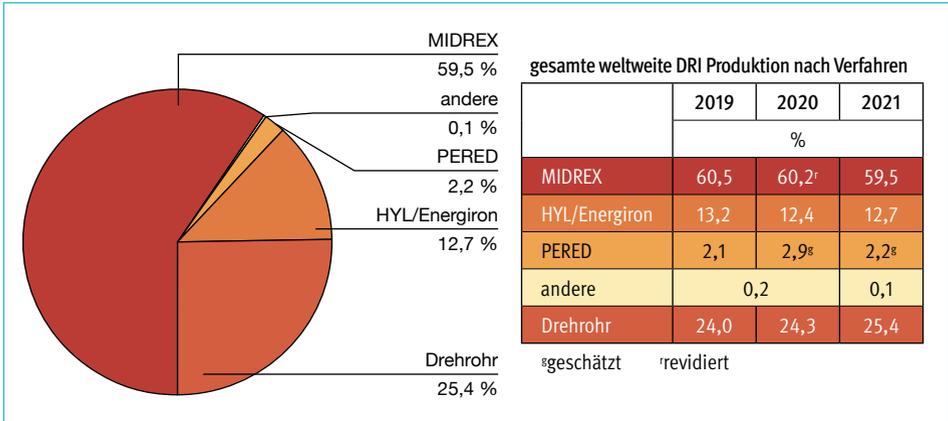


Bild 3: Weltweite DRI-Produktion, Aufteilung nach Verfahren

Quelle: Midrex World Direct Reduction Statistics 2021, <https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MidrexSTATSBook2021.pdf> (Zugriff am 21.04.2023), audited by WSD World Steel Dynamics, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, Sept. 2022

## 1.2. Die Situation in Deutschland

In Deutschland wurden im Jahr 2022 etwa 40 Mio. t Rohstahl erzeugt. Nach Auswertungen des Verbandes VDEh für das Jahr 2020 liegen die Methoden der Stahlerzeugung etwa zu 65 % auf der Basis der Hochofen-Konverter-Route unter Zusatz von etwa 20 % Stahlschrott in integrierten Hüttenwerken zur Herstellung von unlegierten oder niedriglegierten Flachprodukten wie Fein- und Grobbleche sowie Röhren, und 35 % auf der Basis von Stahlschrott zur Herstellung von niedrig und höher legierten Werkstoffen für Langprodukte wie Stabstahl, Draht, Profil- und Baustahl. Diese Aufteilung folgt derzeit den geforderten chemischen Zusammensetzungen der Stahlwerkstoffe und deren Anwendung, da gesammelte Stahlschrotte und Roheisen sich aufgrund der chemischen Zusammensetzungen deutlich voneinander unterscheiden.

Dazu werden etwa 33,5 Mio. t Eisenerz, dessen Qualität je nach Lagerstätte stark schwanken kann, importiert, auch Koks Kohle und anteiliger Stahlschrott müssen eingeführt werden. Die Handelsware Stahlschrott ist nach Qualitätssorten vorsortiert; Europa verarbeitet etwa 97 Mio. t Schrott, meist Eigenschrott, und exportiert etwa 22 Mio. t, zu 56 % in die Türkei; laut BDSV weist die Statistik eine nahezu ausgeglichene Bilanz für hochlegierte Edelstähle auf, da ähnlich große Mengen in den Export fließen wie importiert werden (Bild 4); Exporte gehen dabei zu 85 % in EU-27-Länder und zu 15 % in Drittländer. Die Spannweite der Schrottgüten reicht von Müllverbrennungsschrott über Shredderschrott bis zu Gusseisen- und Stückschrott, hochlegierte chrom- und nickelhaltige Schrotte werden getrennt gesammelt ebenso wie verzinkter Blechschrrott aus der Produktfertigung [16]. Da die Schrotte unterschiedliche chemische

Zusammensetzungen besitzen, müssen sie sorgfältig vor dem Einschmelzen gemischt werden, um Konzentrationsvorgaben für einzelne Elemente nicht zu überschreiten, beispielsweise für Kupfer. Das Einschmelzen der Stahlschrotte erfolgt weitestgehend im Elektrolichtbogenofen-Prozess (Bild 5). Auch hierbei entstehen Schlacken und Stäube.

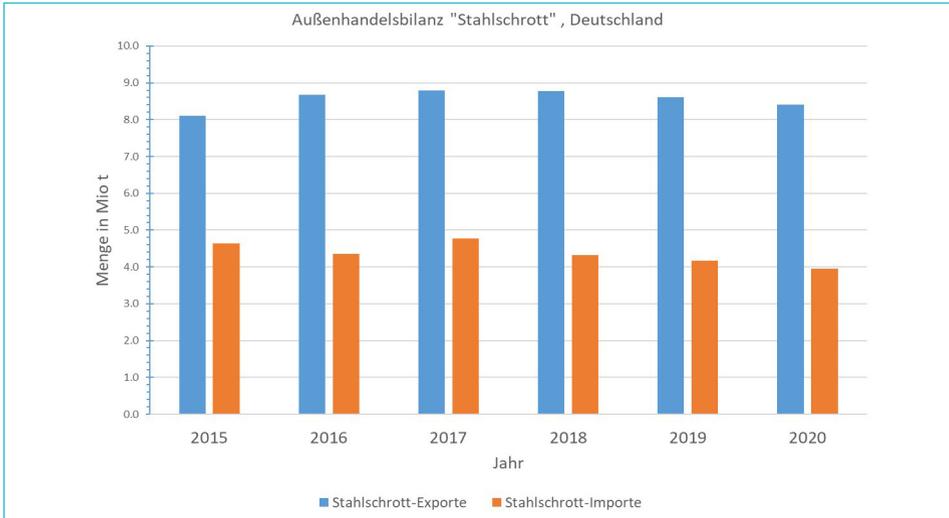


Bild 4: Import-Exportbilanzentwicklung von Schrottmengen aus hochlegierten Werkstoffen in der Europäischen Union 2018

Quelle: Wirtschaftsvereinigung Stahl, Stahlschrottaußenhandel – Statistischer Bericht, Berlin, 2021

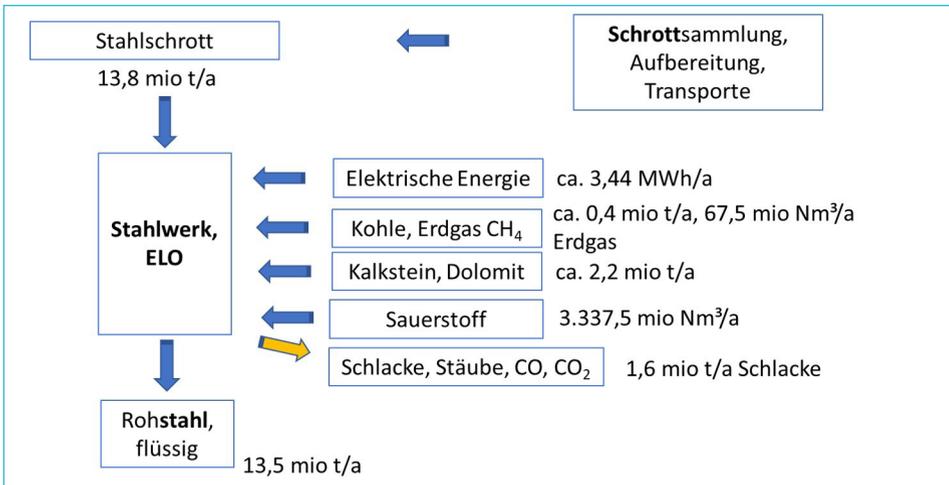


Bild 5: Stoffströme der Schrott-Elektrolichtbogenofen-Route in Deutschland

Im Hochofen-Konverter-Prozess werden etwa 1,9 t CO<sub>2</sub>/tRohstahl durch Einsatz von Koks und Kohle freigesetzt. Auch im Schrotteinschmelzprozess wird Kohlenstoff dem Schrott zugesetzt, um die Schmelztemperatur des Stahles zu senken und

Eisenverluste in die Schlacke zu vermindern. Zusätzlich kommen fossile Energieträger wie Erdgas neben der elektrischen Energie zum Einsatz. Dies gilt auch für das Einschmelzen von festem, direkt reduziertem Eisen im Elektrolichtbogenofen. Eine Gegenüberstellung von potenziellen Verfahrensrouten findet sich zum Stand 2020 in einer Studie des Unternehmens IREES GmbH [7], allerdings ohne weiteren Einsatz von metallurgischem Kohlenstoff. Das direkt reduzierte Eisen (DRI, direct reduced iron) ist wie die Roheisenschmelze des Hochofenverfahrens ein Produkt des Erzeinsatzes für die Stahlerzeugung, unterscheidet sich jedoch wesentlich davon (Tabelle 1).

Tabelle 1: Eigenschaften von flüssigem Roheisen und festem DRI als Vormaterial zur Stahlherstellung

Eigenschaft	Einheit	Roheisen		DRI		Schrott
		Aggregatzustand				
		flüssig		fest		
Temperatur des Einsatzes	°C	etwa	1.500	etwa	700	etwa 11
Schmelztemperatur			1.150		1.530	
Kohlenstoffgehalt	Ma.-%	etwa	4,5	0 – 4,0		0,8
Schwefelgehalt			0,04	etwa 0,004*)		0,015
Phosphorgehalt			je nach Erzsorte 0,02 – 0,1	0,015		
Dichte, typ.	kg/m <sup>3</sup>		6.900	3.500 – 5.000		800 – 4.000
Schüttdichte, etwa	t/m <sup>3</sup>		flüssig, 6,8	0,4		1,5
Eisengehalt	kg/t		940	900 – 950		985
davon metallisch				830 – 900		
Eisengehalt	kg/m <sup>3</sup>		6.500	etwa 3.600		780 – 3.600
Oxidische Bestandteile (Gangart und FeO)	Ma.-%		0	5 – 17		1
Rückoxidation/ <i>Rosten</i>			keine	an feuchter Luft empfindlich		Rostbildung

\*) [S] bis zu 0,03 Gew.-%

Daten nach: Babich, A., Senk, D.; Gudenau, H. W.: Textbook Ironmaking, Verlag Stahleisen, 2016, Düsseldorf

## 2. Herausforderungen durch geplante Umstellungen

Die Transformation der Stahlindustrie betrifft zunächst im Wesentlichen die Route Hochofen-Konverter für Flachprodukte; diese Verfahrensrouten sollen durch Reduktion mit Wasserstoff und auf der Basis von erneuerbaren Energien ersetzt werden. Für eine Übergangszeit wird der Hochofenprozess weiter in Bezug auf sinkenden spezifischen CO<sub>2</sub>-Ausstoß entwickelt, beispielsweise unter dem Begriff *EasyMelt* [19]. Im Bereich der Langprodukte wird hauptsächlich Schrott für Rohstahl eingeschmolzen, aber auch hier stehen starke Herausforderungen bezüglich des Energieeinsatzes, der Schrotterfügbarkeit und der DRI-, HBI- und sogar Roheisen (pig iron)-Verfügbarkeit bei der Flachstahlproduktion an.

## 2.1. Verfahrensrouten

Die großen Stoffströme an hochwertigem Eisenerz für das Hochofenverfahren müssen durch noch höherwertige Erze für die Direktreduktion und in hochqualitative Schrottmengen ersetzt werden; dies wird im Folgenden diskutiert. Da der Hochofen als Schmelzaggregat auf Basis von Kokskohle wegfallen wird, soll elektrische Energie auf Basis erneuerbarer Energiequellen zum Schmelzen von DRI und Schrott genutzt werden. Die Prozesskette soll umgestellt werden, wie in Bild 6 dargestellt ist; hier kommt zunächst Erdgas als Reduktionsmittel zum Einsatz. In Bild 7 ist die Prozesskette für die Verwendung von Wasserstoff als Reduktionsgas dargestellt. Ein wesentlicher und entscheidender Unterschied in Bild 6 und Bild 7 wird der Kohlenstoffgehalt des DRI sein. Ohne weitere Kohlenstoffeintrag durch Kohle oder Erdgas wird in Bild 7 das DRI keinen Kohlenstoff enthalten und in der Anwendung im ELO wesentlich höhere Schmelzzeiten, höheren Energieverbrauchs und geringeres Eisenausbringen zur Folge haben.

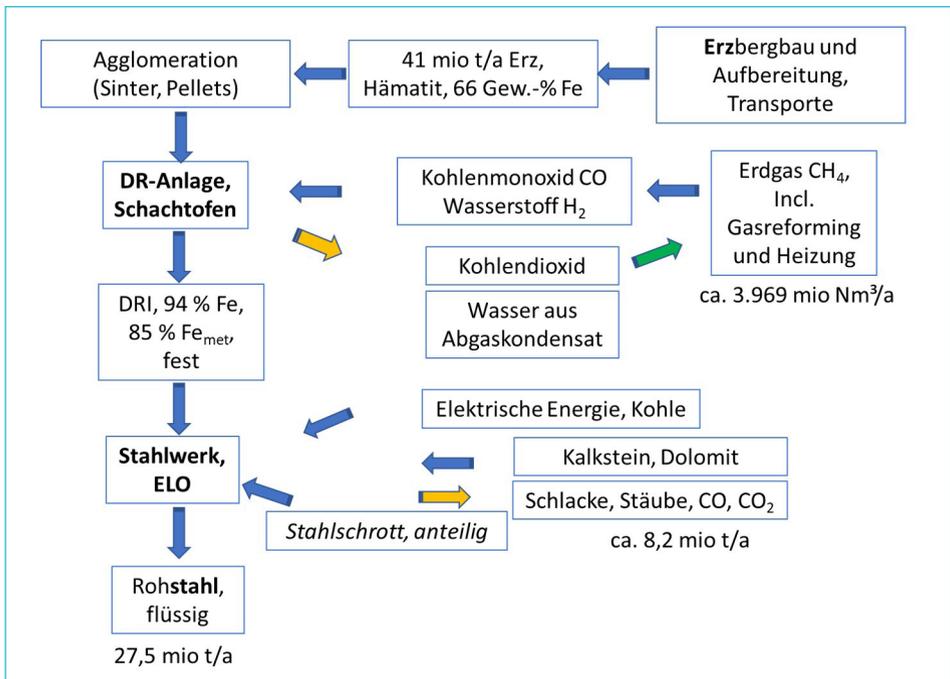


Bild 6: Geplante Rohstahlerzeugung aus Eisenerz mit Hilfe von Erdgas; zu erwartende Stoffströme über DR-LBO-Route

Direktreduziertes Eisen lässt sich derzeit mit bewährten Schachtofenverfahren wie Midrex oder HYL III/Energiron mit Hilfe der Reduktionsgase Kohlenmonoxid und Wasserstoff erzeugen; dies gilt auch für alle anderen Verfahren, die metallurgisch den Erzsauerstoff vom Eisen entfernen, z.B. Drehrohrprozesse, die das Kohlenmonoxid jedoch überwiegend aus chargierter Kohle erzeugen.

## 2.2. Logistik

Die Umstellungspläne existierender Stahlwerke beziehen sich ausschließlich auf den primären Teil der metallurgischen Prozesskette, also die Erzeugung des flüssigen Rohstahles. Die Logistik der Stahlwerke beinhaltet ein ausbalanciertes Zeit- und Mengengerüst, in dem das Abstichgewicht des Rohstahlaggregats und damit die Kapazität der Stahltransportpfannen der Batch-Prozesse sowie die Produktivität der installierten Stranggießanlagen den Takt vorgeben; erst die Stranggießanlagen arbeiten im Sequenzguss kontinuierlich. In Deutschland liegen die Pfannkapazitäten für Konverterstahlwerke individuell zwischen 190 t und 400 t, die im 2-Konverterbetrieb im Takt von etwa 20 Minuten anfallen. Dadurch ergeben sich Restriktionen: Elektrolichtbogenöfen erreichen derzeit bereits 200 bis 300 t Abstichgewicht, in den meisten vorhandenen Installationen sind 100 t bis 200 t üblich, deutlich weniger verglichen mit Großkonvertern. Auch die Zeiten vom Chargieren bis zum Abstich liegen bei 40 bis 60 Minuten beim LBO, im Vergleich dazu braucht der Konverter nur etwa 35 Minuten für die Umwandlung von Roheisen zu Rohstahl, da 80 % des Materials bereits flüssig chargiert werden. Zusätzlich ergibt sich eine Verfahrensunterscheidung auch durch die Notwendigkeit, den aus dem Erz stammenden Phosphor durch Sauerstoffzugabe zu oxidieren und durch Kalkzugabe in die Schlacke zu überführen. Dies geschieht im üblichen bauchigen Sauerstoffaufblaskonverter während des Frischen des Kohlenstoffs; im LBO mit flachem Herd ergeben sich durch erhöhte Schlackenmengen im Vergleich zum Konverter wegen der Gangartbestandteile gegenüber reinem Stahlschrott sowie andere Strömungsbedingungen notwendige Zusatzmaßnahmen bei der Entphosphorung von verflüssigtem DRI.

Daher sieht eine andere Strategie der Transformation vor, das feste DRI-Material zunächst in einem speziellen Elektroofen ähnlich einem elektrischen Niederschacht-ofen oder einem Electric Arc Furnace der NE-Metallurgie (auch Smelter) mit geplanter höherer Kapazität als ein aktueller Elektrolichtbogenofen zusammen mit Kohlenstoff zu schmelzen und so ein *künstliches Roheisen* zu erzeugen, das dann wie bisher in den Großkonvertern mit vorhandener Logistik (Sekundärmetallurgie) weiter zu verarbeiten (Bild 8). Die Kohlenstoffzugabe ist zwingend notwendig, um den Konverterprozess mit der benötigten chemischen Energie zu versorgen. Die Schlacke des sogenannten Smelter-Verfahrens soll in Bezug auf die mineralische und chemische Zusammensetzung einer konventionellen Hochofenschlacke entsprechen und könnte so in die Verwendung als Zementzusatzstoff ohne weitere Behandlung eingesetzt werden; da im Vergleich zum Hochofenprozess jedoch der Anteil an Koksasche fehlt, wird die Schlackenmenge und dadurch die Menge des Hüttensandes als Zementzusatzstoff geringer ausfallen als bisher. Ein mögliches Problem könnte die erhöhten  $\text{FeO}_n$ -Gehalte der neuen ELO-Schlacke für die Verwendung in der Zementindustrie werden. Die Erzauswahl für die Route Erz-DRI-ELO wirkt sich über den  $\text{SiO}_2$ -Gehalt und den Phosphorgehalt stark auf die anfallende Schlackenmenge- und -qualität aus, da das Phosphoroxid nur durch erhöhten Branntkalksatz vom Metall in die Schlacke überführt werden kann; hochphosphor- und hochkalkhaltige Schlacken finden Verwendung als Düngemittel in der Landwirtschaft.

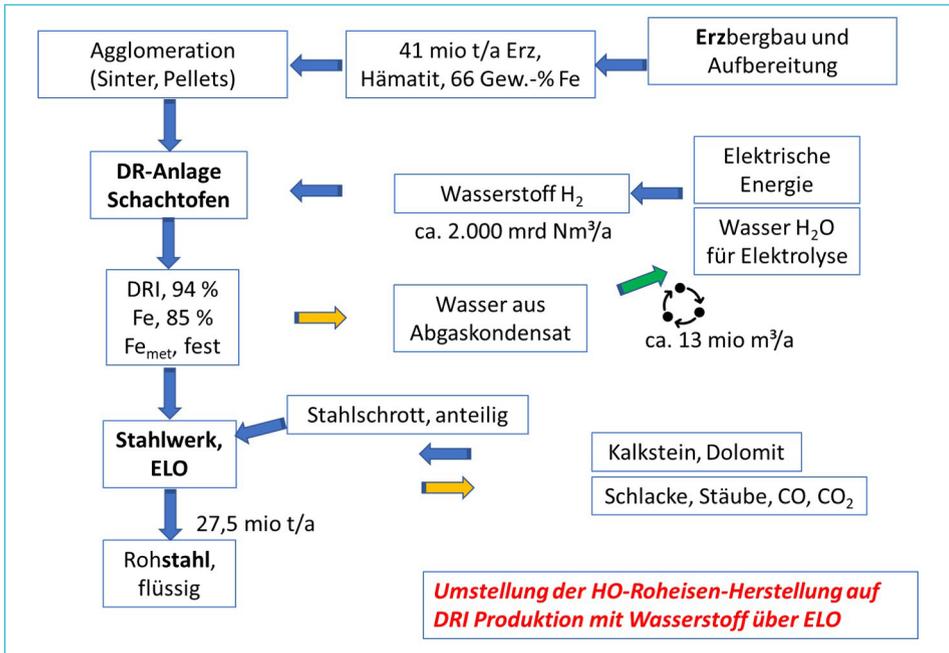


Bild 7: Geplante Rohstahlerzeugung aus Eisenerz mit Hilfe von Wasserstoff; zu erwartende Stoffströme über DR-ELO-Route

### 2.3. Betrachtungen für die Stoffströme Kohle und Schlacke

Koks wird aus Steinkohle hergestellt; etwa 30 % der Steinkohle (Kohlenwasserstoffe und Schwefel) werden bei Temperaturen von etwa 1.100 °C als Gase entfernt, sodass harter Koks mit etwa 90 Gew. % Kohlenstoffgehalt entsteht. Die chemische Energie der Gase auch wichtige Ressourcen dar und werden z.B. als Synthesegase im Hochofen für die Erzreduktion stellen genutzt. Im Hochofenverfahren werden zur Herstellung von 27 Mio. t Eisen jährlich etwa 300 kg/t<sub>RE</sub> Koks entsprechend 824 kg Steinkohle sowie etwa 200 kg/t<sub>RE</sub> Steinkohlenstaub eingesetzt; in Summe sind dies etwa 13,5 Mio. t Steinkohle jährlich. Koks und Kohle stammen hauptsächlich aus den USA, aus Australien und Osteuropa. Für die etwa 13 Mio. t Rohstahl, die aus Schrott mit Elektrolichtbogenöfen hergestellt werden, entfallen noch einmal etwa 0,7 Mio. t Steinkohle. Etwa 250 kg Schlacke/t<sub>RE</sub> entstehen durch Kohlen- und Koksaschen sowie durch die notwendigen mineralischen Zuschläge, die Schlacke wird als Sekundärressource in der Zementindustrie eingesetzt.

Die Umsetzung der Pläne läuft bereits: Die Salzgitter Flachstahl GmbH hat einen ersten Elektrolichtbogenofen bei Primetals Technology mit einer Kapazität von 220 t bestellt [10]. Die thyssenkrupp Steel Europe bestellte bei der sms group eine Direktreduktionsanlage mit einem DRI-Smelter [17]. Die österreichische voestalpine hat bereits im März 2022 den Bau von Elektrolichtbogenöfen für Linz und Donawitz beschlossen [14]. Die Saar Holding Stahl hat ebenso ein 3,5 Mrd. EUR-Programm mit Baubeginn in 2025 beschlossen [12].

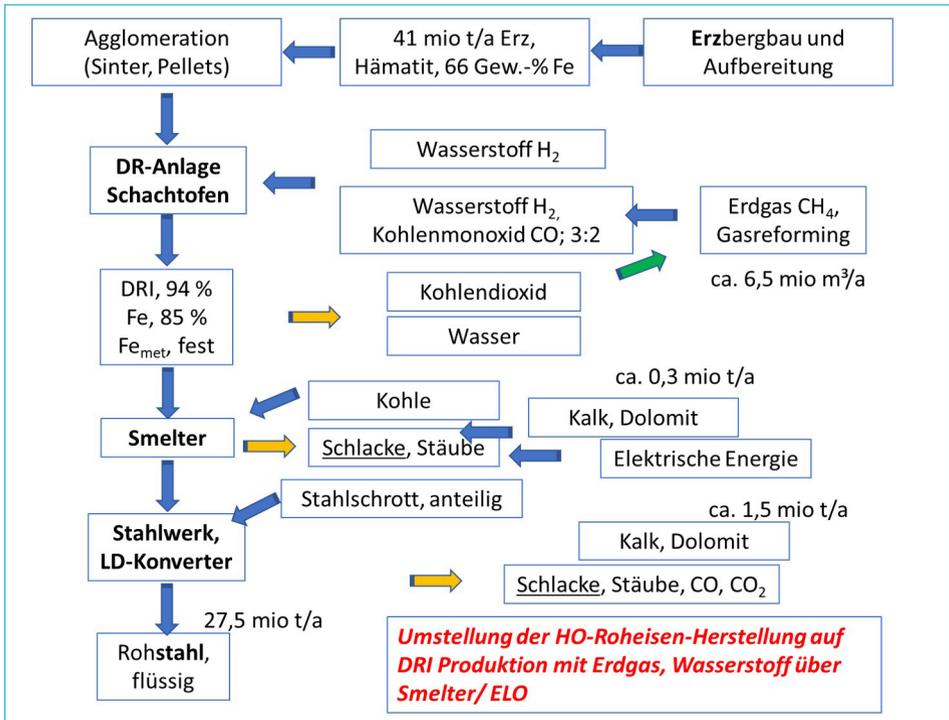


Bild 8: Alternativ geplante Rohstahlerzeugung aus Eisenerz; zu erwartende Stoffströme über DR-Smelter-Konverter-Route

Die weiterverarbeitenden Unternehmen der Branchen der Mobilität, des Maschinenbaus und der Infrastrukturentwicklung verlangen bereits intensiv sogenannten *grünen* Stahl, um in ihren Produkten den kumulierten CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu minimieren.

### 3. Schlussfolgerungen für die Herausforderungen einer Transformation

Durch Transformation der Kohle- und Erz-basierten Stahlindustrie zu einer Herstellweise auf Basis von erneuerbaren Energien muss der Weg vom Erz zum Stahl über das Reduktionsgas Wasserstoff erfolgen. Wasserstoff kann durch Elektrolyse mit flüssigem oder dampfförmigen Wasser mit elektrischer Energie erfolgen. Auch die Schmelzenergie kann elektrisch werden, Zusatzbrenner in metallurgischen Aggregaten lassen sich prinzipiell durch Wasserstoffbrenner ersetzen. Die Schlackenmengen und -qualitäten werden sich ändern, da Koksaschen wegfallen werden und sich voraussichtlich das Verhältnis von Schrott zu Stahlroheisen als Einsatzmaterial weiter vergrößert. Die Stoffströme von Stahlschrott und die Anforderungen an dessen definierte Zusammensetzungen werden steigen. Wasser als Grundlage der Wasserstofferzeugung muss sorgfältig als H<sub>2</sub>O-Kondensat gesammelt, aufbereitet und im Prozesskreislauf gehalten werden; die Wassermengen hierfür entsprechend der heutigen Stahlerzeugungsmengen liegen bei etwa 25 Mio. m<sup>3</sup> jährlich; wobei etwa 10 Mio. m<sup>3</sup> Löschwasser

für Kokereien entfielen. Kühlwasser wird auch weiterhin in geschlossenen Kreisläufen geführt. Da aus dem Elektrolyseprozess neben dem Wasserstoff dasselbe Volumen an Sauerstoff für metallurgische Verwertung entsteht, könnte auf die derzeit angewandte Luftzerlegung eigentlich weitgehend verzichtet werden, dadurch entfielen jedoch die in der Metallurgie benötigten Gase Stickstoff und Argon aus der Luft. Die Verwendung von Luft im Kokshochofen von etwa  $1.900 \text{ Nm}^3/\text{t}_{\text{RE}}$  wird wegfallen und durch gezielten Sauerstoffeinsatz im Lichtbogenofen als Zusatzenergie beim Schmelzen ersetzt werden.

Für die Transformation der Stahlproduktion kann der zusätzliche Bedarf an elektrischer Energie aus erneuerbaren Energiequellen auf 130 bis 200 TWh jährlich abgeschätzt werden. Zusätzlich sind Infrastrukturmaßnahmen für die Verteilung und die Speicherung der Elektrizität und des Wasserstoffs nötig, durch Neubau von  $\text{H}_2$ -Pipelines und durch Umrüstungen bestehender Erdgasleitungen [4]. Der Anlagenbau ist gefordert, neue Aggregate wie *Smelter* für den Einsatz in bestehenden Stahlwerken hochzuskalieren und zu liefern wie auch völlig neue Stahlwerke an neuen Standorten mit günstiger Energieversorgung zu erstellen. Für Bau und Betrieb der neuen Erzeugungsrouten braucht es zusätzlich dafür qualifiziertes Personal, zumal in der Übergangszeit die bestehenden Anlagen weiter zu betreiben sind und somit die Personaldecke auf den Produktions- und Instandhaltungsschichten wenigstens temporär zu erhöhen, um den Markt der weiterverarbeitenden Unternehmen zu beliefern. Der Betrieb von Kokereien wird entfallen, ebenso voraussichtlich der Betrieb von Sinteranlagen für Feinerz; stattdessen werden Anlagen für das Zerkleinern und Pelletieren von Feinerzen notwendig, in die auch aufbereitete Kreislaufstoffe einbracht werden sollten, da deren Deponierung aus ökonomischer und geografischer Sicht nicht in Frage kommt.

Eine Variante der Transformation befasst sich mit der Auslagerung einzelner Prozessschritte von den derzeitigen Standorten: Elektrische Energie aus erneuerbaren Quellen wie Wasserkraft führt zum Aufbau weiterer Stahlerzeugungskapazitäten in Skandinavien, zum Beispiel das Großprojekt H2GS in Boden bei Lulea in Nordschweden [11, 13] für 5 Mio. t Stahl jährlich. Energie aus Photovoltaik kann die Wasserstofferzeugung in sonnenreichen Ländern Nordafrikas oder im Nahen Osten antreiben [5], wobei der Wasserstoff nach Europa exportiert oder in Direktreduktionsanlagen vor Ort zur DRI-Herstellung mit Export von metallischem, brikettiertem Eisenschwamm nach Europa genutzt wird. Denkbar ist auch der Aufbau von Stahlwerken in Kooperation europäischer Stahlwerke mit Ländern der  $\text{H}_2$ -Erzeugung vor Ort mit dem Import von Stahlhalbzeugen oder Metaprodukten nach Deutschland und anderen Ländern mit starker verarbeitender Industrie. Diese Fragen unterliegen der wirtschaftlichen Betrachtung, um am Weltmarkt konkurrenzfähig zu sein, ebenso wie der jeweiligen geopolitischen Lage. Ehemalige Schwellenländer außerhalb von Europa nehmen die Stahlproduktion auf oder expandieren: Beispielsweise hat die Türkei innerhalb von zwei Jahrzehnten ihre Stahlproduktion verdoppelt und exportierte 2019 bereits 19,7 Mio. t Stahl [21].

Eine Abschätzung der Agora-Gesellschaft folgend verschieben sich die Kostenbestandteile der OPEX-Kosten vom Erz und Kohle über Erz und Erdgas in Richtung auf Wasserstoff und Elektrizität, wobei auch die begleitenden CAPEX-Kosten stark das Kostengefüge durch Neuanlagen beeinflussen (Bild 9).

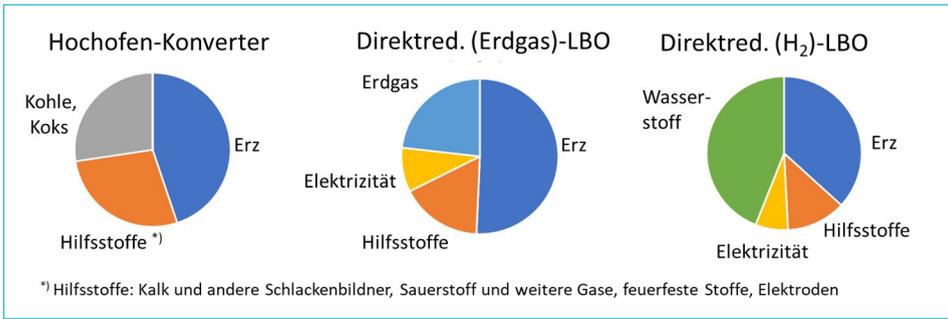


Bild 9 : Abgeschätzte relative Kostenveränderungen von drei relevanten Prozessrouten der Primärstahlerzeugung

Quelle: Agora Industrie, Future Camp, Wuppertal Institut: Klimaschutzverträge für die Industrietransformation: Rechner für die Abschätzung der Transformationskosten einer klimafreundlichen Primärstahlproduktion, Modellversion 2.1, Berlin, 19.09.2022

Abschließend ein Zitat des Bundesministeriums für Bildung und Forschung aus dem Februar 2023: *Noch ist unklar, wie hoch Deutschlands Bedarf an Grünem Wasserstoff 2045 genau sein wird. Fest steht allerdings: Deutschland wird auf Importe aus dem Ausland angewiesen sein. Denn der Energiebedarf der Bundesrepublik ist höher als die Energiemenge, die Deutschland selbst produzieren kann.* [6] Das Ministerium nennt Kooperationen mit Australien, Südafrika, Namibia, Westafrika und Neuseeland genannt, aktuell auch Kenia.

## 4. Zusammenfassung

Die Herstellungsmethoden von Stahlwerkstoffen richten sich nach der gewünschten chemischen Stahlzusammensetzung der Werkstoffe und der grundsätzlichen Form der Produkte, flach oder lang mit entsprechender Ausrüstung wie Walzwerken. Die Stahlerzeugung hat sich deshalb in integrierte Hüttenwerke, die etwa 80 % Eisenerz verwenden und meist Flachprodukte herstellen, und Mini-Mills, die mit Elektrolichtbogenöfen > 60 % Schrott einschmelzen und meist zu Langprodukten verarbeiten, aufgeteilt. Die Eisenerze werden mit Koks und Steinkohle in einem Hochofen zu flüssigem Roheisen und anschließend mit einem Sauerstoffkonverter zu Stahl verarbeitet; Stahlschrott wird elektrisch geschmolzen. Um den Ausstoß an Kohlendioxid drastisch zu senken, sollen die Hochöfen durch Direktreduktionsanlagen ersetzt werden, die im Endausbau mit Hilfe von Wasserstoff, aus erneuerbaren Energien hergestellt, das Eisenerz zu metallischem Eisen umwandeln, das anschließend mit elektrischer Energie aus erneuerbaren Energien geschmolzen wird. Ein Weg des Schmelzens ist der technisch bereits gut entwickelte Elektrolichtbogenofen, der allerdings aufgrund seiner derzeitigen Bauart noch an Kapazitätsgrenzen stößt und in integrierten Hüttenwerken heute nicht mehr und noch nicht wieder vorhanden ist. Ein anderer Weg ist der geplante und in seiner Bauart und Größe neuartige *Smelter*, der nur mit elektrischer Energie ein roheisenähnliches, kohlenstoffhaltiges flüssiges Zwischenprodukt aus direkt reduziertem Eisen erzeugt, das über den bestehenden Prozessweg der Stahlerzeugung wie Roheisen aus Hochöfen mit Sauerstoffkonvertern weiterverarbeitet werden kann.

Die notwendigen Stoffströme sind die Eisenerze (Herkunft Nord- und Südamerika, Australien, Skandinavien), die Steinkohle (Herkunft: Nordamerika, Australien, Südafrika, Osteuropa), die Stahlschrotte (globales Handelsgut) sowie die Ströme für die Energiebereitstellung (Braun- und Steinkohle, Erdgas, Kernkraft, erneuerbare Energien). Künftig sollen im Verlauf der Transformation der Stahlindustrie die fossilen Stoffströme verebben und die Energie weitestgehend aus erneuerbaren Energiequellen wie Wind-, Wasser- und Sonnenkraft stammen. Hierzu bedarf es eines deutlichen Ausbaus der Energiewandelanlagen (Windkraftanlagen, Solar-PV-Felder, Wasserkraftanlagen) und dem entsprechenden Verteilungsnetzwerk sowie Optimierung neuer Standorte der Eisen- und Stahlerzeugung. Technische Lösungen für die Transformation stellt der Anlagenbau zur Verfügung, da die meisten metallurgisch-verfahrenstechnischen Aggregate untersucht und erprobt sind, allerdings aus Kostengründen in Europa kaum zum Einsatz kamen.

Mehrere Großprojekte befassen sich mit dem Import von Wasserstoff aus sonnenreichen arabischen Ländern, oder dem Import von bereits mit Wasserstoff direkt reduziertem Eisen aus solchen Ländern. Die Erze für das DRI sollten einen besonders hohen Eisengehalt und damit eine geringe Gangartkonzentration von  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  besitzen, um die Schlackenbelastung der Schmelzaggregate durch Gangart und notwendige Zuschläge aus ökonomischen und ökologischen Gründen niedrig zu halten.

Als Zeithorizont der Transformation zur nahezu  $\text{CO}_2$ -freien Stahlerzeugung werden von deutschen Unternehmen Jahreszahlen zwischen 2030 und 2050 genannt, je nach Tiefe der Transformation. Die Kosten werden für Deutschland auf mehr als 30 Mrd. EUR geschätzt, der zusätzliche Strombedarf auf 130 bis 200 TWh pro Jahr; dabei ist derzeit aber noch unklar, wie dieser Bedarf über erneuerbare Energien gedeckt werden kann. Die Anpassung des Personalsektors sowie Standortfragen und die geopolitische Stabilität stellen weitere Herausforderungen dar.

## 5. Quellen

- [1] Agora Industrie, Future Camp, Wuppertal Institut: Klimaschutzverträge für die Industrietransformation: Rechner für die Abschätzung der Transformationskosten einer klimafreundlichen Primärstahlproduktion, Modellversion 2.1, Berlin, 19.09.2022
- [2] Babich, A.; Senk, D.; Gudenau, H. W.: Textbook Ironmaking, Verlag Stahleisen, 2016, Düsseldorf
- [3] Driesen, O.: Der Feuermacher - Willy Korf: Stahl-Rebell aus Leidenschaft, Hoffmann und Campe Verlag, Hamburg, 2005, Hrsg. J. Großmann
- [4] Gehling, A.; Graß, M.: Innovation und Fortschritt: Atlas der Wasserstoff-Netzwerke in Deutschland, Now-GmbH mit Förderung des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2. Auflage, 2021 <https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/12/2021-11-12-NOW-Atlas-H2-Inhalt-DIGITAL.pdf> (Zugriff am 28.04.2023)
- [5] Hesse, M.: Wie drei Deutsche den Wasserstoff-Boom im Oman befeuern, Spiegel-Wirtschaft, 21.2.2023
- [6] Kurzmeldung aus dem BMBF, 16.02.2023: Nationale Wasserstoffstrategie Grüner Wasserstoff: Welche internationalen Projekte fördert das BMBF? <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/kurzmeldungen/de/woher-soll-der-gruene-wasserstoff-kommen.html> (Zugriff am 29.04.2023)
- [7] Lösch, O.; Jochem, E.; Ashley-Belbin, N.; Zesch, G.: Bewertung der Direktreduktion von Eisenerz mittels Elektrolyse-Wasserstoff, im Auftrag des BM Wirtschaft u. Energie, Förderkennzeichen: 03ET1630A, Sept. 2020

- [8] Midrex World Direct Reduction Statistics 2021, <https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MidrexS-TATSBook2021.pdf> (Zugriff am 21.04.2023), audited by WSD World Steel Dynamics, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, Sept. 2022
- [9] Mr. Midrex kommt, Spiegel 3 (1976), 11.1.1976
- [10] N.N.: Großauftrag für einen Elektrolichtbogenofen erteilt, Home of Foundry, 31.8.2022
- [11] N.N.: H<sub>2</sub> Green Steel-Milliardenauftrag für sms: <https://www.stahleisen.de/2022/10/17/h2-green-steel-paul-wurth-und-midrex-liefern-dri-anlage/>, 17.10.2022
- [12] N.N.: Together for Green Steel, MPT Intern. (2022) Dec., S. 25
- [13] N.N.: Together for Green Steel, MPT Intern. (2022) Dez., S. 20 – 25
- [14] N.N.: voestalpine startet Bauarbeiten für eine klimafreundliche Stahlproduktion in Österreich, Home of Steel, 24.2.2022
- [15] Otto, C.: Directe Eisen- und Stahlerzeugung; Stahl und Eisen (1896) 15. Febr., S. 148 – 152
- [16] Pothen, F.; Growitsch, C.; Engelhard, J.; Reif, C.: Studie Schrottbonus-externe Kosten und fairer Wettbewerb in den globalen Wertschöpfungsketten der Stahlherstellung, Fraunhofer IMWS im Auftrag des BDSV, Halle an der Saale, 2019
- [17] Pressebericht der tks, 1.3.2023, tks-homepage
- [18] Senk, D.: 150 years development of RWTH Aachen University from a steel researcher's view point, USTB University of Science and Technology Beijing, 70th Anniversary Conf., May 14, 2022, online contribution
- [19] SMS proposes EasyMelt syngas furnaces for cleaner steel, <https://eurometal.net/sms-proposes-easymelt-syngas-furnaces-for-cleaner-steel/> Eurometal, (Zugriff am 07.05.2023)
- [20] Stahl-online.de: Welterzeugung 1970/2021 und Vergleich mit Aluminium, Magnesium, Kunststoffen und Carbonfaser-Kunststoff
- [21] Tezol, G.: Die türkische Stahl- und Eisenindustrie, PT-Magazin, 3.3.2021
- [22] Wirtschaftsvereinigung Stahl, Stahlschrottaußenhandel-Statistischer Bericht, Berlin, 2021

## Ansprechpartner



### Professor Dr.-Ing. Dr. h.c. Dieter Georg Senk

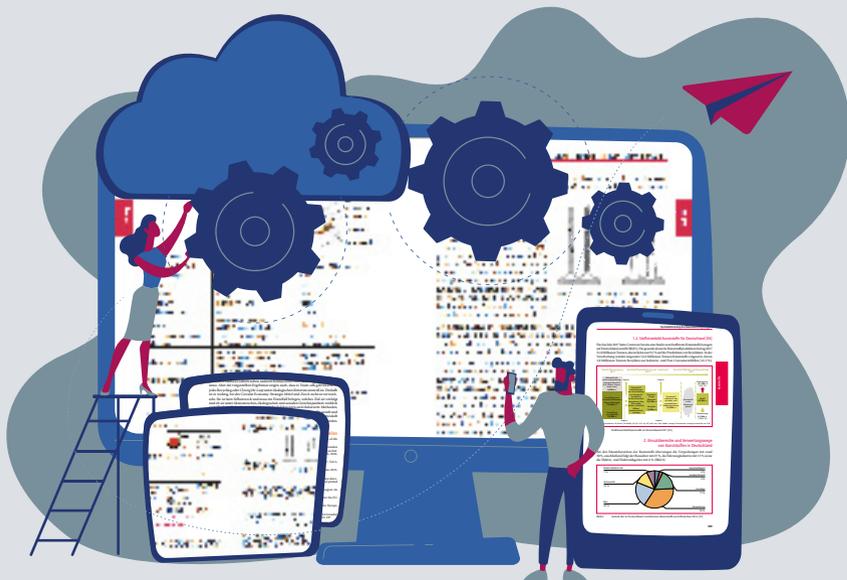
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen  
Lehrstuhl für Metallurgie von Eisen und Stahl  
Intzestraße 1  
52072 Aachen, Deutschland  
+49 241 80982 88  
[dieter.senk@iehk.rwth-aachen.de](mailto:dieter.senk@iehk.rwth-aachen.de)



### Dr. Felix Firsbach

Badische Stahl-Engineering GmbH  
Project Manager Consulting Steel Plant  
Robert-Koch-Straße 13  
77694 Kehl, Deutschland  
[felix.firsbach@bse-kehl.de](mailto:felix.firsbach@bse-kehl.de)

# Wissensplattform



Designed by vectorjuice / Freepik

Bislang sind bei uns etwa 2.000 digitale Fachbeiträge erschienen, die in ihrer Gesamtheit einen guten Überblick über technische, wirtschaftliche, rechtliche und politische Entwicklungen geben. Mit unserer Wissensplattform, die im Laufe des Jahres an den Start geht, haben Sie Zugriff auf unsere Veröffentlichungen. Sie können zwischen drei Arten von Lizenzen wählen:

## Unser Angebot für Neugierige: Testlizenz für 0 EUR

Uneingeschränkter Zugriff auf eine kleine Vorauswahl an Beiträgen. Mit jedem neuen Konferenzbuch erscheinen zwei weitere Artikel in Ihrem Portfolio.

## Unser Angebot für Fokussierte: thematische Monats- oder Jahreslizenzen

(Preise variieren je nach Thema und Dauer der Lizenz)

Sie haben Zugriff auf alle Fachbeiträge zu einem Themengebiet.

## Unser Angebot für Generalisten: unlimitierte Jahreslizenz für 220 EUR pro Jahr

Sie haben Zugriff auf alle Fachbeiträge der Wissensplattform. Alle Neuveröffentlichungen des TK Verlags werden Ihnen zeitnah zur Verfügung gestellt.

[books.vivis.de](http://books.vivis.de)

Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

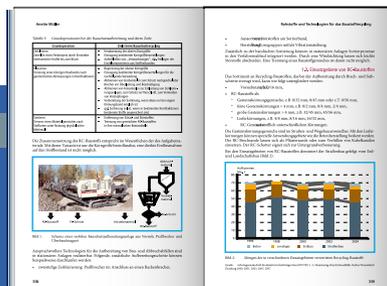
Dorfstraße 51

16816 Nietwerder-Neuruppin

Tel. +49 3391-45 45-0

E-Mail: [order@vivis.de](mailto:order@vivis.de)

**TK** Verlag



## Strategies for the Utilization of Slags in Future Hydrogen-Based Steel Production Routes – Production of Slag From Electric Hot Metal Production for the Cement Industry

David Algermissen, Andreas Ehrenberg, Dominik Ebert and Volkert Feldrappe

The transformation in the steel industry to green hydrogen-based steel production routes necessarily leads to new by-products. Nowadays, iron slags are the most important by-products in terms of volume, with a high utilization rate of over 95 %. Of these, over 55 % are used as granulated blast furnace slag in the cement industry. The two newly established process routes via direct reduction and the electric arc furnace, or direct reduction, submerged arc furnace / open slag bath furnace (SAF/OSBF) and the Basic oxygen furnace, are to replace the current blast furnace – converter – route. This will initially lead to a break in cross-industry cooperation between the steel and cement industries, as granulated blast furnace slag is no longer available for the cement industry in order to save CO<sub>2</sub> emissions and natural resources.

The aim of the national research project SAVE CO<sub>2</sub> presented here is therefore to investigate the new slag chemistry from the SAF and the influences, for example of gangue constituents of the iron ore and therefor the direct reduced iron, on its use in cement. As such a process for the production of electric hot metal is to be set up for the first time, there are still many unknowns. However, an ecological use for these slags must be found as soon as the furnaces go into operation and produce these materials. Due to the ambitious time schedules of the steel industry, this will already be the case in the next 5 years. To this end, several parameters have been defined within whose range of variation the future process will move, so that measures can already be developed today on the producer- and user side to be able to use the new slags ecologically and economically.

# Strategien für die Nutzung von Schlacken zukünftiger wasserstoff-basierter Stahlproduktionsrouten – Herstellung von Schlacken aus der Elektrohoheisen-Produktion für die Zementindustrie

David Algermissen, Andreas Ehrenberg, Dominik Ebert und Volkert Feldrappe

1.	Status Quo in der Stahlindustrie.....	213
2.	Nebenprodukte der Stahlerzeugung.....	214
3.	Optimierungen bestehender und Einführung neuer Prozesse .....	215
4.	Neue Prozesse, neue Schlacken .....	216
5.	Das Projekt <i>SAVE CO<sub>2</sub></i> .....	218
6.	Schmelzversuche an Eisenschwamm .....	218
7.	Synthetische Schlacke.....	219
8.	Nächste Schritte.....	219
9.	Zusammenfassung.....	220
10.	Quellen.....	220

## 1. Status Quo in der Stahlindustrie

In Deutschland erfolgt die heutige Stahlherstellung zu 70 % über die Erzeugungsrouten Hochofen/LD-Konverter (integrierte Route) und zu 30 % über den Elektrolichtbogenofen (Elektrostahlroute). In Europa (EU-27) liegen diese Anteile bei 56 % bzw. 44 % [15]. In den heutigen Elektrolichtbogenöfen in Europa wird nahezu ausschließlich Schrott als Einsatzmaterial zur Rohstahlerzeugung genutzt, wodurch sie nicht auf die Primärstoffe Eisenerz und Kohle/Koks angewiesen sind. Dadurch können sie, in Abhängigkeit vom bereitgestellten Strommix, gegenüber der integrierten Route bereits heute mit signifikant niedrigeren CO<sub>2</sub>-Emissionen wirtschaftlich produzieren (455 kg CO<sub>2</sub> je t Rohstahl statt 1.888 kg/t [12]).

Die Fortschritte in der Entwicklung haben den Hochofenprozess an die Grenze des thermodynamischen Optimums gebracht. Selbst theoretisch sind signifikante Fortschritte bis 2050 zur Erreichung einer klimaneutralen Produktion nicht realisierbar. Gleichzeitig

ist eine Erhöhung der Stahlproduktion im Elektrolichtbogenofen aufgrund begrenzter Schrottverfügbarkeit und notwendiger Qualitätsanforderungen nicht durchführbar. Aus diesen Gründen konzentriert sich die Stahlindustrie auf die Einführung neuer Technologien, welche CO<sub>2</sub>-Emissionen grundsätzlich vermeiden – auch bekannt als Carbon Direct Avoidance (CDA).

## 2. Nebenprodukte der Stahlerzeugung

Neben Stahl als Hauptprodukt werden in der Stahlindustrie beträchtliche Mengen an weiteren Materialien erzeugt, die für die metallurgische Prozessführung unerlässlich sind. Dazu gehören hauptsächlich verschiedene Schlacken, mit einem Anteil von jährlich etwa 13 Mio. Tonnen in Deutschland (Bild 1, [10]) und etwa 40 Mio. Tonnen in Europa [7]. In Deutschland beträgt die Nutzung von Schlacken seit Jahren konstant etwa 95 %, was durch systematische Entwicklungsarbeit und Einbindung in relevante Regelwerke schrittweise erreicht wurde.

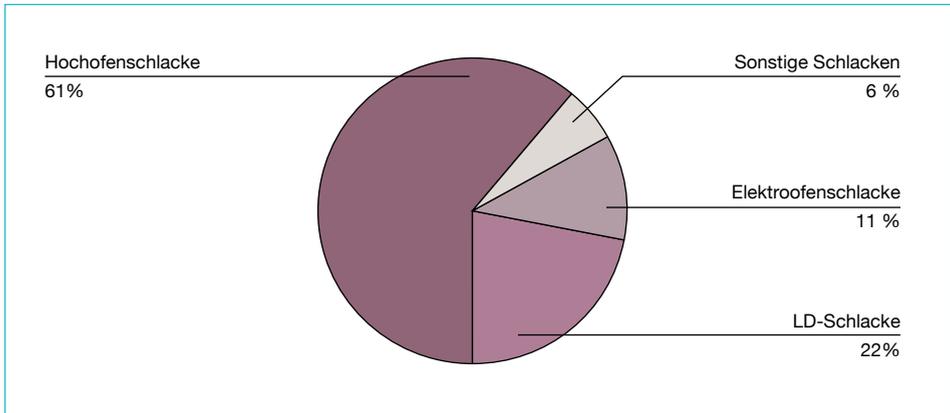


Bild 1: Erzeugte Schlacken in Deutschland 2021

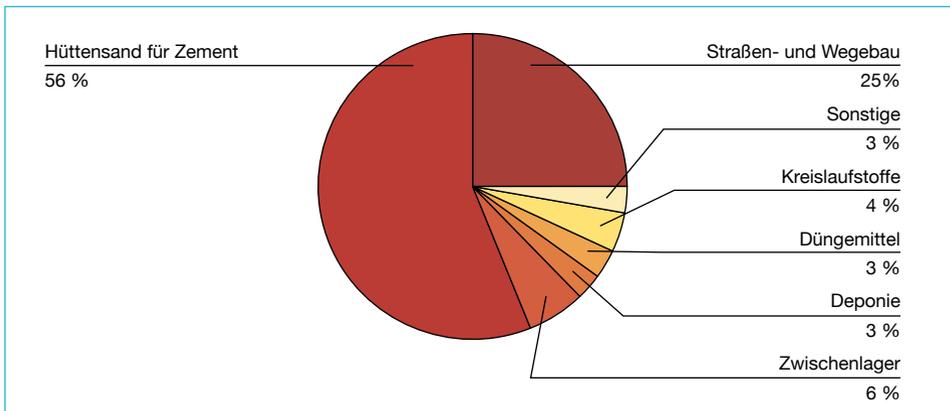


Bild 2: Verwendungsgebiete der in Deutschland erzeugten Eisenhüttenschlacken 2021

Die kristallin erstarrenden Schlacken aus dem Elektroofen, LD-Konverter und Hochofen (Bild 2) finden ihren wichtigsten Absatzmarkt im Straßen-, Wege- und Wasserbau. Der dominante Anteil der Hochofenschlacke, der glasige Hüttensand, wird hauptsächlich in der Zementindustrie eingesetzt. Aufgrund seiner latent hydraulischen Eigenschaft wird Hüttensand seit vielen Jahrzehnten als genormter Bestandteil von Zementen verwendet, wobei er den Portlandzementklinker substituiert. Bereits im Jahr 1909 wurde die erste deutsche Norm für einen hüttensandhaltigen Zement eingeführt.

Die Nutzung von Schlacken im Verkehrsbau und als Düngemittel schont in erster Linie natürliche Gesteinskörnungen und bietet somit ökologische Vorteile. Die Verwendung von Hüttensand als Ersatz für Portlandzementklinker bietet jedoch nicht nur Vorteile hinsichtlich der Schonung natürlicher Rohstoffe, sondern reduziert auch signifikant die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Zementherstellung. Bei der Herstellung einer Tonne Portlandzementklinker werden etwa 800 kg CO<sub>2</sub> emittiert, wovon mehr als die Hälfte rohstoffbedingt ist [9]. So können durch die Nutzung von Hüttensand in der Zementindustrie, allein in Deutschland, jährlich rund 4,5 Mio. t CO<sub>2</sub> und 10 Mio. t Primärrohstoffe eingespart werden, insbesondere Kalkstein. Dabei ist die verstärkte Herstellung von klinkerreduzierten Zementen ein zentraler Bestandteil der CO<sub>2</sub>-Roadmap, die Ende 2020 für die deutsche Zementindustrie vorgestellt wurde [13], und ist auch ein europaweites Ziel [5].

### 3. Optimierungen bestehender und Einführung neuer Prozesse

Als künftiger Ersatz für das Reduktionsmittel Kohlenstoff wird unternehmensübergreifend Wasserstoff angesehen, welcher ebenfalls in der Lage ist, Eisenoxide zu reduzieren, jedoch unter Erzeugung von H<sub>2</sub>O anstelle von CO<sub>2</sub>. Daher werden verschiedene Verfahren untersucht, um Wasserstoff großtechnisch in der Stahlindustrie einzusetzen und bis spätestens 2050 eine nahezu klimaneutrale Stahlproduktion zu erreichen [14]. Allerdings ist hierfür eine ausreichende Bereitstellung von regenerativ erzeugter elektrischer Energie zur Wasserstofferzeugung erforderlich, die derzeit noch nicht in ausreichendem Umfang vorhanden ist. Ein weiteres Hindernis ist der noch relativ niedrige Wirkungsgrad von etwa 70 bis 80 % bei der Elektrolyse zur Wasserstofferzeugung. Es gibt jedoch vielversprechende Entwicklungen in diesem Bereich, die perspektivisch höhere Wirkungsgrade ermöglichen könnten [4].

Um die Verwendung von Wasserstoff schrittweise zu erproben, nutzen Stahlproduzenten wie thyssenkrupp Steel oder voestalpine den Einsatz von Wasserstoff als Übergangstechnologie im Hochofen, um den Kohlenstoffverbrauch und somit die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren. Allerdings ergaben thermodynamische Berechnungen, dass die Wasserstoff-Substitutionsrate auf etwa 30 % begrenzt ist [16].

Eine zielführendere Alternative stellt die Direktreduktion dar. Hierbei werden Erze in Eisenschwamm mit einem Metallisierungsgrad von bis zu über 95 % überführt und dabei Gase als Reduktionsmittel genutzt. Die Direktreduktionsanlagen setzen üblicherweise Erdgas ein, welches bereits einen gewissen Wasserstoffanteil besitzt und somit eine Einsparung von CO<sub>2</sub>-Emissionen von 20 bis 40 % bezogen auf die Tonne Rohstahl ermöglicht [2].

Im Gegensatz zum Hochofenprozess entsteht bei der Direktreduktion keine Schlacke, sondern der feste Eisenschwamm sowie ein staubhaltiges Abgas. Der Eisenschwamm muss in einem nachfolgenden Prozessschritt aufgeschmolzen werden, um ihn im Anschluss als Rohstahl weiterverarbeiten zu können. Die noch vorhandenen Gangartbestandteile gehen dabei in die Schlacke über. Die Nutzung von Eisenschwamm kann zunächst über den Möller in den Hochofen erfolgen, um den Erzeinsatz, die damit verbundene Reduktionsarbeit und damit die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu verringern. Diese Brückentechnologie wird derzeit von der Voestalpine in Österreich in Betriebskampagnen bereits praktiziert. Aber auch sie wird aufgrund der thermodynamischen Limitierungen des Hochofenprozesses nicht genügen, um eine klimaneutrale Stahlproduktion zu erreichen.

Während der (limitierte) Einsatz von Eisenschwamm im Hochofen nur vergleichsweise wenig Einfluss auf die Eigenschaften der Hochofenschlacke hat, so werden beim Einsatz in Kombination mit Schrott und insbesondere bei den letztgenannten Ansätzen Schlacken entstehen, die sich hinsichtlich Menge und physikalischen, chemischen, mineralogischen und damit technischen Eigenschaften signifikant von den heutigen Hochofen- und Stahlwerksschlacken unterscheiden werden.

#### 4. Neue Prozesse, neue Schlacken

Aufgrund der genannten Gründe wird es zukünftig wesentlich schwieriger sein, die zuvor beschriebene crossindustrielle Symbiose zwischen der Stahl- und Zementindustrie fortzuführen. Wenn der Hüttensand, der in der Zementindustrie verwendet wird, in der neuen CO<sub>2</sub>-armen Stahlerzeugungstechnologie entfällt, wird dies zu einem deutlichen Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Zementindustrie führen, wodurch sich die Relevanz einer gesamtheitliche Sichtweise zeigt.

Das größte Potenzial zur Verringerung von CO<sub>2</sub>-Emissionen im Stahlsektor liegt, unabhängig von der Verwendung von Schrott, in der Kombination aus wasserstoffbasierter Direktreduktion und elektrischem Schmelzen. Stahlunternehmen verfolgen hierzu verschiedene Ansätze, wie beispielsweise die Kombination aus Direktreduktion und Einschmelzer (SAF oder OSBF) in Verbindung mit der bestehenden LD-Route oder die Kombination aus Direktreduktionsanlage und nachgeschaltetem Elektrolichtbogenofen (*SALCOS*, *HYBRIT*) [9].

Letzteres geschieht beispielsweise bei ArcelorMittal Hamburg oder auch in anderen Stahlwerken in der Welt. In Abhängigkeit von der zu produzierenden Stahlgüte können als Einsatzmaterialien Eisenschwamm und Schrott nahezu vollständig variiert werden.

Wenn die Stahl- und Schlackenerzeugung in Zukunft vom Hochofen/LD-Konverter zum Elektroofen verlagert wird, ist eine gesonderte chemische Behandlung sowie Modifikation des Abkühlprozesses der Schlacken notwendig, um ein Material zu erhalten, das für die Zementindustrie nützlich ist. Denn die Zusammensetzungen der Schlacken unterscheiden sich erheblich voneinander, wie in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Typische chemische Zusammensetzung von heutigen Hochofen- und Elektroofenschlacken

	Hochofenschlacke (erzbasiert)	Elektroofenschlacke (schrottbasiert)
	Ma.-%	
CaO	34 – 43	20 – 36
SiO <sub>2</sub>	35 – 40	10 – 18
MgO	7 – 16	3 – 7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8 – 12	4 – 9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1 – 1,0	29 – 48

Quelle: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Merkblatt über die Verwendung von Eisenhüttenschlacken im Straßenbau. Köln, 2013

rascher Abkühlung mittels der heute üblichen Wassergranulation nicht über eine latent hydraulische Eigenschaft, da die Abkühlraten nicht ausreichen werden, um bei der hohen Kristallisationsneigung ein glasiges Material zu erzeugen. Die dazu notwendigen Entwicklungsarbeiten werden in einem derzeit laufenden, nationalen Forschungsprojekt bearbeitet, welches ebenfalls in diesem Konferenzband vorgestellt wird [1].

Im Gegensatz zu dieser Verfahrensrouten wird bei der Nutzung eines Einschmelzers, direkt unter der Direktreduktionsanlage, neben einem Elektrohoheisen auch eine Schlacke erzeugt,

welche der Hochofenschlacke nicht unähnlich ist. Untersuchungen zu dieser Schlacke sind Gegenstand des laufenden BMBF-Forschungsvorhabens *SAVE CO<sub>2</sub>*, welches die Schaffung einer alternativen Verwendung einer auf DRI-Basis erzeugten Elektrohoheisen-schlacke für die Zementindustrie zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen zum Ziel hat [3].

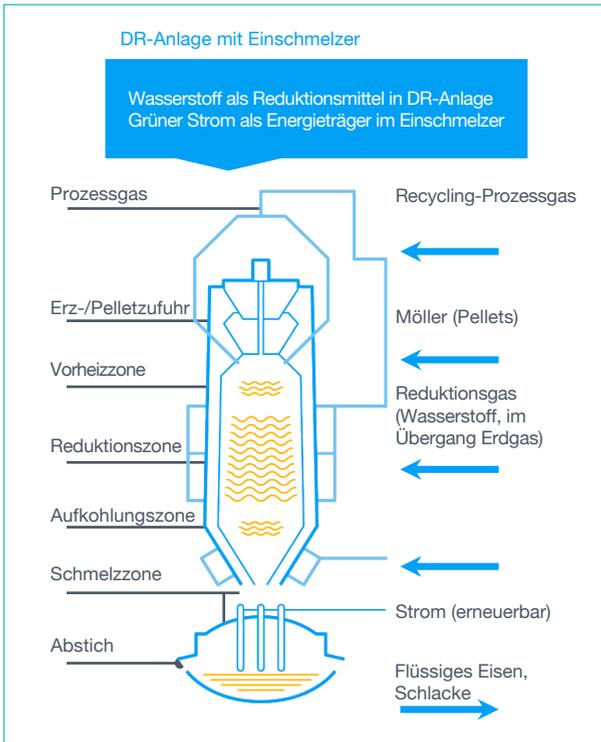


Bild 3:

Schematische Darstellung einer DR-Anlage mit Einschmelzer

Quelle: Schubert, D.: *SAVE CO<sub>2</sub>* – alternative use of DRI melting slag in the cement industry. Präsentation zur 11. Euroslag Konferenz, Köln, 2022

## 5. Das Projekt *SAVE CO<sub>2</sub>*

Das auf 48 Monate angelegte Forschungsprojekt hatte seinen Beginn im Mai 2021, kurz nachdem thyssenkrupp Steel Europe als erster europäischer Stahlhersteller sein Konzept *Hochofen 2.0* vorgestellt hat, mit einer Direktreduktionsanlage und darunter liegendem Einschmelzer (Bild 3).

Gemeinsam mit den anderen Projektpartnern aus der Zementindustrie (Heidelberg-Materials) und der Forschung (Institut für Technoligen der Metalle der Universität Duisburg-Essen und das Fraunhofer UMSICHT) konnte direkt mit den Arbeiten, basierend auf diesem Prozess, begonnen werden.

## 6. Schmelzversuche an Eisenschwamm

Nach Auswahl eines extern erzeugten Eisenschwamms konnten damit an der Universität Duisburg erste Schmelzversuche durchgeführt werden, um eine Schlacke, rein basierend auf der Gangart des Eisenschwamms, zu erzeugen. Die erzeugte spezifische Schlackenmenge lag bei etwa 90 kg/t Elektrohoheisen. Da der Einschmelzer unter reduzierenden Bedingungen arbeitet, wurden rechnerisch die Oxide, maßgeblich Eisen- und Mangan, aus der Schlackenzusammensetzung herausgerechnet und normiert, wodurch sich die Schlackenmenge auf etwa 50 kg/t<sub>RE</sub> verringerte. Die sehr niedrige C/S-Basizität von 0,22, bedingt durch die meist saure Gangart der Eisenerze, würde im Prozess zu einer sehr hohen Viskosität führen, sodass rechnerisch eine Zugabe von über 30 kg/t<sub>RE</sub> notwendig wäre, um übliche Basizitäten einer Hochofenschlacke einzustellen (Bild 4).

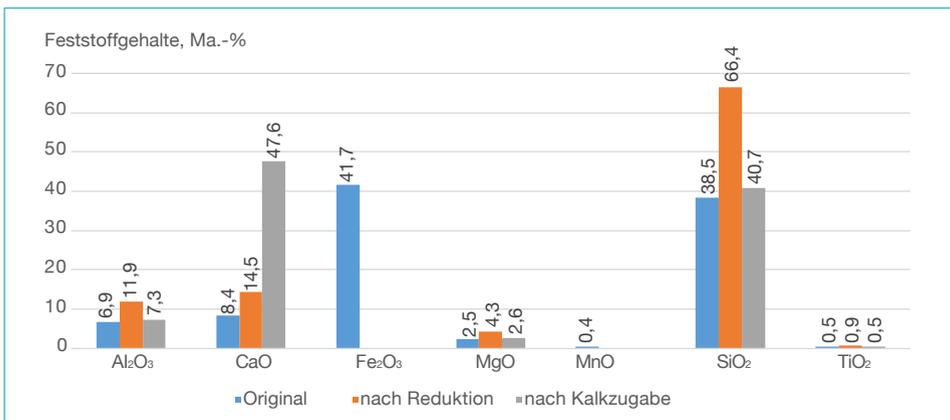


Bild 4: Chemische Zusammensetzung einer sich bildenden Schlacke beim Schmelzen von Eisenschwamm (neutral) und rechnerische Änderungen nach Reduktion und Kalkzugabe

Somit bestimmt die Gangart maßgeblich die spätere Schlackenzusammensetzung des Einschmelzers, welches auch Störstoffe in Hinblick auf den Hüttensand einschließt, wie beispielsweise Titandioxid (TiO<sub>2</sub>). Im Hüttensand ist TiO<sub>2</sub> dafür bekannt die

Frühfestigkeit im Zement herabzusetzen und sollte somit möglichst niedrig gehalten werden [6], wobei der Einfluss darauf im Einschmelzer sehr limitiert ist und bereits beim Erzeinkauf beginnt. Ähnliches gilt auch für weitere Gangartbestandteile, welche bisher im Hüttensand aufgrund geringer Konzentrationen irrelevant waren jedoch eventuell auch Einfluss auf die Festigkeitsbildung haben.

## 7. Synthetische Schlacke

Basierend auf diesen Ergebnissen konnte nun mit den Vorbereitungen für die statistische Versuchsplanung begonnen werden. Im Konsortium wurden nun zu variierende Einflussgrößen und Variationsbereichen festgelegt, welche als grundsätzlich realistisch für die Partner aus Stahl- und Zementindustrie angesehen wurden. Dies beinhaltete die Parameter Temperatur, C/S-Basizität, Aluminiumoxidgehalt und den Magnesiumoxidgehalt. Mit Erstellung eines vollfaktoriellen, dreistufigen Versuchsplans konnte die notwendige Anzahl der Schmelzversuche mit 20 auf einem niedrigen Niveau gehalten werden, trotz Abbildung einer komplexen Auswertung, welche alle Variationen innerhalb der festgelegten Systemgrenzen abdeckt. Aus den am FEhS-Institut erzeugten und wassergranulierten Schlacken wurden Mörtelprismen produziert, welche jeweils nach 2, 7 und 28 Tagen auf ihre Druck- und Biegezugfestigkeit hin untersucht wurden. Eine beispielhafte grafische Auswertung dazu ist in Bild 5 dargestellt.

Neben diesen Erkenntnissen wurde auch die Viskosität qualitativ ermittelt und die Auswirkung auf den Glasgehalt.

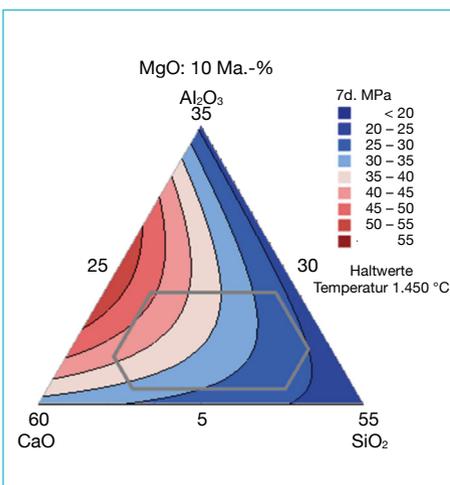


Bild 5: Auswertung der statistischen Versuchsplanung für die Parameter  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und Temperatur in Hinblick auf die Mörteldruckfestigkeit nach 7 Tagen

## 8. Nächste Schritte

In den kommenden Monaten sollen die Einflüsse mehrerer Gangartbestandteile mit in die Betrachtung aufgenommen werden, um entsprechende Auswirkungen auf den Hüttensand beurteilen zu können. Zudem werden weitere Eisenschwamm-Qualitäten untersucht, welche analog zu der Darstellung Bild 4, aufgeschmolzen und die weiteren Zusammensetzungen rechnerisch ermittelt werden.

Basierend auf diesen Ergebnissen sollen Versuche in größerem Maßstab durchgeführt werden, um ausreichend Probenmaterial zu erzeugen, um neben Mörtel- auch Betonuntersuchungen durchzuführen.

## 9. Zusammenfassung

Die Transformation der Stahlindustrie zur Erreichung signifikanter CO<sub>2</sub>-Emissionsverminderungen bis 2030 bzw. 2050 erfordert von den stahlerzeugenden Unternehmen zahlreiche Maßnahmen. Hierbei müssen nicht nur technische, wirtschaftliche und politische Rahmenbedingungen zeitnah angepasst werden, sondern auch die ausreichende, stabile und bezahlbare Verfügbarkeit von *grüner* elektrischer Energie und Wasserstoff gewährleistet werden.

Wenn diese Herausforderungen gemeistert werden, könnten die Hochöfen schrittweise verschwinden, was auch signifikante Auswirkungen auf die Schlackenproduktion und ihre Anwendungsfelder hat. Die Transformation der Stahlindustrie stellt im Bereich der Schlacken die größte Herausforderung dar seit den 1960er Jahren, als das Thomas-Verfahren durch das LD-Verfahren ersetzt wurde.

In Zukunft werden primär neue Elektroofenschlacken (Elektorroheisenschlacke oder Elektrolichtbogenofenschlacken) erzeugt werden, die sich von den heutigen Hochofen- und Stahlwerksschlacken unterscheiden. Es wird Aufgabe der Stahlindustrie sein, beispielsweise innerhalb des vorgestellten Projekts SAVE CO<sub>2</sub>, sich mit diesen Schlacken und ihren potenziellen Nutzungsmöglichkeiten auseinanderzusetzen, um die CO<sub>2</sub>-Optimierung nicht zur teuren Deponierung von Millionen Tonnen Nebenprodukten oder erhöhten Emissionen und Verbrauch natürlicher Ressourcen in anderen Industrien zu führen. Diese Nutzungsmöglichkeiten können sowohl in bekannten als auch neuen Anwendungsgebieten, wie z.B. im Verkehrswegebau liegen, aber auch als Zementbestandteil. Dazu bedarf es die Unterstützung der Anwenderindustrien, welche, wie am Beispiel von SAVE CO<sub>2</sub> gezeigt, ebenfalls ein großes Interesse an den neuen Materialien haben und auch selbst Möglichkeiten eruieren, welche Aufwendungen ihrerseits notwendig sind.

Die Arbeiten zum Projekt SAVE CO<sub>2</sub> werden durch das BMBF unter dem Förderkennzeichen 01LJ2004 und durch die Europäische Union gefördert.



## 10. Quellen

- [1] Adam, C.; Schneider, J.; Schraut, K.; Algermissen, D.; Ebert, D.; Ehrenberg, A.: Strategien für die Nutzung von Schlacken zukünftiger wasserstoffbasierter Stahlproduktionsrouten – Herstellung von Stahlwerksschlacke basierten Ausgangsstoffen für die Zementindustrie. Tagungsband zur Berliner Konferenz Mineralische Nebenprodukte und Abfälle (2023)
- [2] Arens, M. et al.: Pathways to a low-carbon iron and steel industry in the medium-term - the case of Germany. Journal of Cleaner Production 163 (2017) 84 – 98
- [3] BMBF-Forschungsvorhaben *SAVE CO<sub>2</sub> - Schaffung einer alternativen Verwendung einer auf DRI-Basis erzeugten Elektroofenschlacke für die Zementindustrie zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen*, 2021 – 2025

- [4] Brinner, A. et al.: Technologiebericht 4.1 Power-to-gas (Wasserstoff). In: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken, 2018
- [5] Cembureau: The role of cement in the 2050 low carbon economy. Brüssel, 2013
- [6] Ehrenberg, A.: Hüttensand – Ein leistungsfähiger Baustoff mit Tradition und Zukunft. Beton-Informationen 5 (2006), S. 67 – 95
- [7] Euroslag: Statistics 2021 based on World Steel Data of EU-27
- [8] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Merkblatt über die Verwendung von Eisenhüttenschlacken im Straßenbau. Köln, 2013
- [9] Grün, R.: Der Hochofenzement und seine Verwendung. 4. Auflage, Berlin, 1928
- [10] Merkel, T.: Daten zur Erzeugung und Nutzung von Eisenhüttenschlacken 2021. Report des FEhS-Instituts 27 (2020) 1, 29 – 30
- [11] Schubert, D.: SAVE CO<sub>2</sub> – alternative use of DRI melting slag in the cement industry. Präsentation zur 11. Euroslag Konferenz, Köln, 2022
- [12] The Boston Consulting Group: Steel's contribution to a low carbon Europe 2050. Boston, 2013
- [13] Verein Deutscher Zementwerke: Dekarbonisierung von Zement und Beton - Minderungspfade und Handlungsstrategien. Düsseldorf, 2020
- [14] Vorträge auf dem Freiburger Stahltag 2021. Freiberg, 10.06.2021
- [15] Worldsteel: World steel in figures 2022. Brüssel, 2022
- [16] Yilmaz, C.: Maßnahmen zur Dekarbonisierung des Hochofenprozesses durch Einsatz von Wasserstoff. In: Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen, Band 54. Göttingen, 2018

### Ansprechpartner



#### **David Algermissen, M.Sc.**

FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e.V.

Abteilungsleiter

Sekundärrohstoffe / Schlackenmetallurgie

Bliersheimer Straße 62

47229 Duisburg, Deutschland

+49 2065 9945 12

d.algermissen@fehs.de

## Strategies for the Utilization of Slags in Future Hydrogen-Based Steel Production Routes – Production of Raw Materials for the Cement Industry Based on Steel Making Slags

Christian Adam, Joachim Schneider, Katharina Schraut, David Algermissen, Dominik Ebert, Andreas Ehrenberg, Lars Gronen and Volkert Feldrappe

The European Union's objective to become the first climate-neutral continent by 2050 strongly affects the two CO<sub>2</sub>-intensive sectors steel and cement industry. Both industry associations developed roadmaps to face arising challenges and undergo profound transformations in their value chains and production routes. Decommissioning of blast furnaces leads e.g. to the loss of the by-product granulated blast furnace slag (GBFS) which is used in the cement industry as clinker substitute and considerably saves CO<sub>2</sub> emissions, raw materials and primary energy. New steel production routes, such as hydrogen-based direct reduction plants with subsequent electrical melting processes will be established instead. The research on those new types of slags helps to overcome the industry transformation challenges.

The SlagCEM project investigates the recovery of crude iron from basic oxygen furnace slag (BOFS) while producing a mineral product with good cementitious properties at the same time. It is known that oxide-bound iron can be recovered from BOFS by reducing it to metallic iron in the molten slag in a high-temperature process >1,700 °C. By reducing the iron content in the BOFS, its chemical and mineralogical composition is transformed to that of Portland cement clinker. Since the high treatment temperatures are challenging on an industrial scale, modification of the BOFS composition is investigated to bring the viscosity into a technically suitable range at lower temperatures of ~1,600 °C. It turns out that this is best achieved by leaving a certain minimum amount of iron oxide in the BOFS after reduction acting as a flux. First tests with partially reduced BOFS show a low but detectable hydraulic response of the material. However, the hydraulic reaction of the reduced BOFS is significantly enhanced by the addition of Ca-sulfate. After optimization of the recipes, sufficient quantities of the modified slag will be produced in a demonstration trial (20 tons) and the potential for substitution of OPC will be determined in detail in cement engineering studies.

The DRI-EOS project deals with the utilization of future increasing amounts of DRI-based EAF slag in the cement industry to generate a compensation for the vanishing GBFS. In order to achieve that, it is necessary to adjust the EAF slag's chemical composition and to create an amorphous structure with latent hydraulic characteristics. This is achieved by reduction of iron oxide and undesired heavy metal oxides such as Cr-, Mo- and V-oxides with subsequent recovery in a metal phase. Furthermore, the chemical composition is adjusted towards GBFS and by granulation of the tapped slag. Both steps will be performed in pilot scale which provides sufficient material for the following cement focused investigations. Optimized combinations of secondary raw materials shall serve as reductants and supplements to minimize CO<sub>2</sub> emissions and to strengthen the circular economy.

# Strategien für die Nutzung von Schlacken zukünftiger wasserstoff-basierter Stahlproduktionsrouten – Herstellung von Stahlwerksschlacke basierten Ausgangsstoffen für die Zementindustrie

Christian Adam, Joachim Schneider, Katharina Schraut, David Algermissen, Dominik Ebert, Andreas Ehrenberg, Lars Gronen und Volkert Feldrappe

1.	Einleitung .....	223
2.	SlagCEM: Herstellung eines hydraulischen Bindemittels aus LD-Schlacke.....	225
3.	DRI-EOS: Nutzung von auf DRI-Basis erzeugter EAF-Schlacke in der Zementindustrie .....	228
4.	Zusammenfassung .....	231
5.	Quellen.....	231

## 1. Einleitung

Die Europäische Kommission präsentierte am 11. Dezember 2019 den European Green Deal, ein Konzept mit dem Ziel, bis zum Jahr 2050 als erster Kontinent Klimaneutralität zu erreichen [13]. Die Stahlindustrie der Europäischen Union mit etwa 57 Mio. t Netto-reibhausgasemissionen im Jahr 2020<sup>1</sup> [14], bekennt sich zur erheblichen Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2030 und zum Erreichen der Klimaneutralität bis zum Jahr 2050 [35]. Als Schlüsselwege zur Verwirklichung dieser Zielstellung hat sie zum einen Smart Carbon Usage (SCU) und zum anderen Carbon Direct Avoidance (CDA) in einer Roadmap formuliert. SCU umfasst CO<sub>2</sub>-reduzierende Maßnahmen in bestehenden Eisen- und Stahlproduktionsprozessen, Carbon Capture and Storage- (CCS) sowie Carbon Capture and Usage-Technologien (CCU). Wohingegen bei CDA CO<sub>2</sub>-Emissionen durch erneuerbare elektrische Energie sowie wasserstoffbasierte Reduktion des Eisenerzes gar nicht erst entstehen sollen. Der CDA-Weg, der voraussichtlich beschritten werden muss, um eine klimaneutrale Stahlproduktion zu erreichen [25], geht mit einer kostenintensiven Transformation der Stahlproduktion einher, die bereits von vielen Unternehmen der Stahlindustrie eingeleitet wurde. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Hochofen-Konverter-Route, von denen der überwiegende Anteil auf den Hochofen fällt, liegen laut einer Studie aus 2015 bei 1.921 kg CO<sub>2</sub>/t Rohstahl inklusive der CO<sub>2</sub>-Last von Einsatzmaterialien und nachgelagerten Prozessen [24]. Im Hochofen wird das Eisenerz durch Kohlenstoff (C) bzw. Kohlenstoffmonoxid (CO) unter Entstehung von Roheisen und CO<sub>2</sub> reduziert. Das neben dem CO<sub>2</sub> im Prozessgas enthaltene CO wird zum Beispiel zur Energiegewinnung in peripheren Prozessen ebenfalls unter Bildung von CO<sub>2</sub> verbrannt.

<sup>1</sup> Rückgerechnet auf EU-27

Zusätzlich zur Reduktion fungiert der Koks als Stützgerüst und gewährleistet die Permeabilität im Hochofenprozess. Eine vollkommene Substitution des Kokses zur Vermeidung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Hochofen ist nicht realisierbar. Viele Strategien der Stahlunternehmen verfolgen daher den Wechsel von der Rohstahlproduktion aus der Hochofen-Konverter-Route hin zur Rohstahlproduktion im Elektrolichtbogenofen (EAF – Electric Arc Furnace) mit dem Einsatz von direkt reduziertem Eisen (DRI – Direct Reduced Iron) aus vorgelagerten Direktreduktionsanlagen, die mit Wasserstoff (H<sub>2</sub>) als Reduktionsmittel betrieben werden können. Dabei ist die Elektrostahlerzeugung kein neuer Prozess und nimmt in der europäischen Union bereits einen Anteil von etwa 44 % der Rohstahlproduktion [34] ein, jedoch überwiegend mit Schrott als Einsatzmaterial. Bei der Elektrostahlerzeugung mit Schrotteinsatz fallen laut der oben genannten Studie von Längen [24] für das Jahr 2015<sup>2</sup> 410 kg CO<sub>2</sub> pro Tonne Rohstahl an, von denen der Großteil auf die CO<sub>2</sub>-Last der fremd bezogenen elektrischen Energie zurückzuführen ist und daher nicht im Produktionsprozess selbst entsteht. Auch die Direktreduktion wird schon seit 1972 in der weltweit zweiten und bis heute in Westeuropa einzigen Direktreduktionsanlage in Hamburg betrieben [1]. Während hier noch auf der Basis von Erdgas reduziert wird, liegt eine aktuelle Kernherausforderung in der Bereitstellung der für die Stahlproduktion erforderlichen Mengen grünen Wasserstoffs. Wird zusätzlich der Strom für den EAF-Betrieb aus erneuerbaren Quellen gewonnen und als Brennstoff verwendete Kohle und Erdgas durch CO<sub>2</sub>-neutrale Brennstoffe ersetzt, sind sowohl für den Einsatz von H<sub>2</sub>-basiertem DRI als auch für den Einsatz von Schrott CO<sub>2</sub>-Emissionen von jeweils nur 60 kg CO<sub>2</sub>/t Rohstahl erreichbar (entspricht 97 % Reduktion der Emissionen ausgehend von der Hochofen-Konverter-Route und 85 % ausgehend von der Schrott-EAF-Route [25]).

Die Schrott und DRI basierte EAF-Route macht die an den Standorten vorhandenen Konverter sowie die Infrastruktur für Behandlung und Transport des Roheisens überflüssig. Die weitere Nutzung der bestehenden Anlagenstruktur dient daher unter anderem als Motivation für die Entwicklung einer zweiten Transformationsstrategie, die einen sogenannten Einschmelzer (SAF – Submerged Arc Furnace) als der Direktreduktionsanlage nachgelagerten Prozess vorsieht, in dem wiederum Roheisen erschmolzen wird, das anschließend im Konverter zu Rohstahl veredelt wird.

Die Transformation der Stahlindustrie beeinflusst mit der Zementindustrie einen weiteren CO<sub>2</sub>-intensiven Industriesektor, welcher mit etwa 4 % zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen der EU beiträgt [33]. Etwa zwei Drittel dieser Emissionen entfallen als Prozessemissionen auf die Entsäuerung des Rohstoffs Kalkstein (CaCO<sub>3</sub>) zu Branntkalk (CaO) als Zwischenstufe bei der Bildung der hydraulischen Phasen Tri- und Dicalciumsilikat [36]. Als eines der fünf von der europäischen Zementindustrie definierten klimarelevanten Themenfelder (5C-Ansatz: Clinker, Cement, Concrete, Construction, Carbonation), umfasst das Feld *Cement* zum größten Teil die Reduzierung des Klinker-Zement-Faktors. Im Jahr 2017 betrug er 77 %, das heißt, dass 23 % des Klinkers durch alternative Materialien ersetzt wurden. Bis zum Jahr 2030 wird ein Faktor von 74 % und bis zum Jahr 2050 von 65 % angestrebt. Den größten Anteil an den Klinkersubstituten hat mit 33 % der Hütten sand aus der Stahlindustrie [32], welcher bei der Roheisenproduktion im Hochofen als Nebenprodukt durch Granulation der Hochofenschlacke erzeugt wird (im Jahr 2021 6,90 Mio. t in Deutschland) [26].

<sup>2</sup> EU-28 im Jahr 2015

Dieser Hüttensand besitzt latent hydraulische Eigenschaften und wird daher seit mehr als 140 Jahren als Zementbestandteil eingesetzt, wodurch in Deutschland jährlich etwa 4,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart werden [15]. Alle Transformationsstrategien der Stahlindustrie beinhalten die Außerbetriebnahme der CO<sub>2</sub>-intensiven Hochöfen und damit das Ende der Bereitstellung von Hüttensand, wodurch die weitere Reduzierung des Klinker-Zement-Faktors erhebliche Zusatzmengen alternativer Materialien benötigen wird.

Der Fachbereich Thermochemische Reststoffbehandlung und Wertstoffrückgewinnung der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) und das Institut für Baustoffforschung FEHS forschen zusammen mit Industriepartnern und weiteren Forschungseinrichtungen im Rahmen zweier Projekte in den Kooperationsphären der Stahl- und Zementindustrie, die zur Bewältigung dieser Herausforderungen beitragen. Im Projekt SlagCEM wird die Produktion eines hydraulischen Zementbestandteils durch Reduktion von Konverter- bzw. Linz-Donawitz-Schlacke (LDS) untersucht. Die mit den zusätzlich aufgenommenen EAF-Kapazitäten steigenden Mengen an EAF-Schlacke werden im Projekt DRI-EOS behandelt, welches die Produktion eines latent hydraulischen Hüttensandsubstituts zum Ziel hat.

## 2. SlagCEM: Herstellung eines hydraulischen Bindemittels aus LD-Schlacke

Im Rahmen der ReMin-Förderinitiative beschäftigt sich das vom BMBF geförderte Projekt SlagCEM mit einem Verfahren zur Herstellung eines hydraulischen Zementbestandteils aus LDS zum Einsatz in der Zementindustrie [3].

Möglichkeiten der Verwendung von LDS als Zementbestandteil in unmodifizierter z.B. [19, 21] oder modifizierter Form z.B. [4, 40] wurden vielfach untersucht. Jedoch verhindern u.a. der hohe Eisenoxidgehalt von bis zu 30 Ma.-% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und der geringe Gehalt hydraulisch aktiver Phasen eine direkte Verwendung von LDS in der Zementherstellung [6, 27]. Darüber hinaus gefährdet ggf. eine mangelnde Volumenstabilität durch freies CaO den Einsatz in Beton z.B. [21].

Daher wurden zahlreiche Versuche unternommen LDS zu behandeln, um ihre Volumenstabilität z.B. [2, 18, 28] oder den Gehalt an hydraulischen oder latent hydraulischen Phasen zu erhöhen z.B. [5, 27, 37]. Ein vielversprechender Ansatz ist die Reduktion des überwiegend oxidisch gebundenen Eisens in der schmelzflüssigen Schlacke zu metallischem Eisen mit anschließender Dichtentrennung z.B. [10, 11, 9, 17, 20, 22, 23, 29, 30, 38, 39]. Dieses Verfahren ermöglicht zum einen die Rückgewinnung von Eisen aus der LDS, zum anderen führt die Reduktion des Eisengehaltes zu einer relativen Erhöhung des Ca- und Si-Anteils und zu einer Verschiebung der chemischen Zusammensetzung der reduzierten LDS in Richtung Portlandklinker. Durch die veränderte Chemie ändert sich auch der Phasenbestand in der reduzierten LDS und es wurde mehrfach die Bildung von Alit (Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub>), dem Hauptbestandteil von Portlandklinker, beobachtet [9, 17, 20, 23, 38].

Eine vollständige Reduktion der Eisenoxide zu metallischem Eisen in der schmelzflüssigen Schlacke ist technisch jedoch schwierig umzusetzen. Durch die Reduktion der Eisenoxide erhöht sich die Viskosität der mineralischen Schmelze stark, was Handling und Metallseparation erschwert und ohne weitere chemische Korrekturen eine Erhöhung der

Prozesstemperaturen auf etwa 1.800 °C erfordert. Dies macht das Verfahren großtechnisch unwirtschaftlich und bezüglich des Feuerfestmaterials problematisch. Ziel des Projektes SlagCEM ist es daher, die Chemie der flüssigen Schlacke derart anzupassen, dass die reduzierte LDS bei etwa 1.600 °C eine ausreichend niedrige Viskosität hat. Gleichzeitig soll möglichst viel Eisen aus der LDS zurückgewonnen werden und ein Produkt mit guten zementtechnischen Eigenschaften entstehen.

Durch die Reduktion des  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  der LDS auf 12 Ma.-% und eine leichte Erhöhung des  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Gehaltes konnte eine modifizierte Schlacke (KS5) erzeugt werden, die bei 1.670 °C eine ausreichend niedrige Viskosität und nach dem Erstarren einen hohen Gehalt der wichtigsten Zementphasen  $\text{C}_3\text{S}$  und  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  hatte (Tabelle 1 und Bild 1).

Parameter	Einheit	LDS-Jun21 ± 3STW (N=6)	Modifizierte LDS (KS5)
CaO	Ma.-%	47±2	59,30
SiO <sub>2</sub>		13,7±0,6	16,10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		2,7±0,2	5,69
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		27,2±0,9	12,00
MgO		3,3 ±0,2	3,3
SO <sub>3</sub>		0,14±0,01	0,27
TiO <sub>2</sub>		0,81±0,03	1,04
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		1,63±0,03	1,09
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		2,6±0,1	1,02
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		0,42±0,03	0,37
CaO/SiO <sub>2</sub>		-	3,4

Tabelle 1:

Chemische Zusammensetzung (RFA) der LDS-Juni'21 und der modifizierten LDS KS5. Alle Gehalte sind als Oxide angegeben, auch wenn dies nicht immer dem tatsächlichen Oxidationszustand der einzelnen Elemente in den Proben entspricht.

Die hydraulische Reaktion der modifizierten LDS wurde mittels Kalorimetrie an Mischungen aus 50 Ma.-% modifizierter LDS (KS5) und 50 Ma.-% CEM I 42,5 R untersucht. Zudem wurden zwei Messungen mit durch Anhydritzugabe erhöhten Sulfatgehalten (2,5 Ma.-%, 4,5 Ma.-%) durchgeführt. Die hydraulische Reaktion der modifizierten LDS (KS5) verlief ohne Sulfatzugabe trotz der mineralogischen Gemeinsamkeiten anders als die eines Portlandzements (Bild2). Dieses Phänomen wurde auch bereits an nicht modifizierter aber vollständig reduzierter LDS beobachtet und eingehend untersucht [31]. Hintergrund können stabilere Kristallstrukturen der Hauptzementphasen sein, die in diesem Fall aus einer Schmelze unter dem Einfluss von Verunreinigungen auskristallisieren und damit die Aktivität der Zementphasen herabsetzen [16, 41]. Die Mischungen der modifizierten LDS (KS5) zeigten ein hohes initiales Wärmeflussmaximum, das zweite Wärmeflussmaximum trat dagegen über 50 h später auf und war von geringerer Intensität als bei Portlandzement. Die Zugabe von SO<sub>3</sub> führte hingegen zu einer Annäherung der Reaktionsverläufe. Bei einer Zugabe bis zu einem Gesamtgehalt von 4,5 Ma.-% SO<sub>3</sub> trat das zweite Wärmeflussmaximum der Mischung etwa 48 h früher auf als ohne die Zugabe.

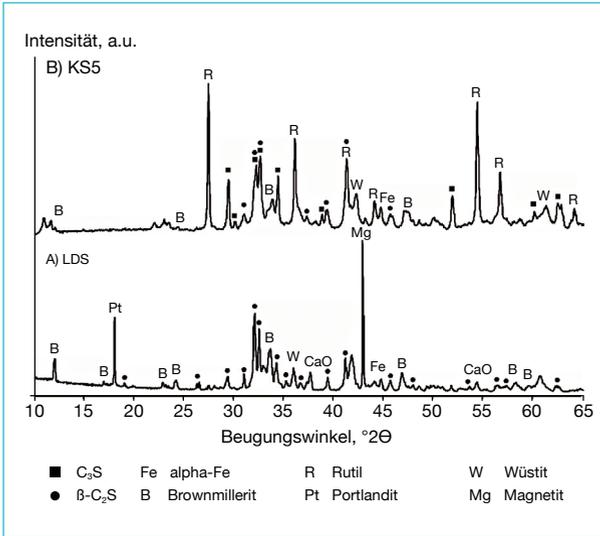


Bild 1:

Röntgendiffraktogramme der unmodifizierten LDS (A) und der modifizierten LDS (KS5) (B). Rutil wurde als interner Standard für die Messung von KS5 zugegeben.

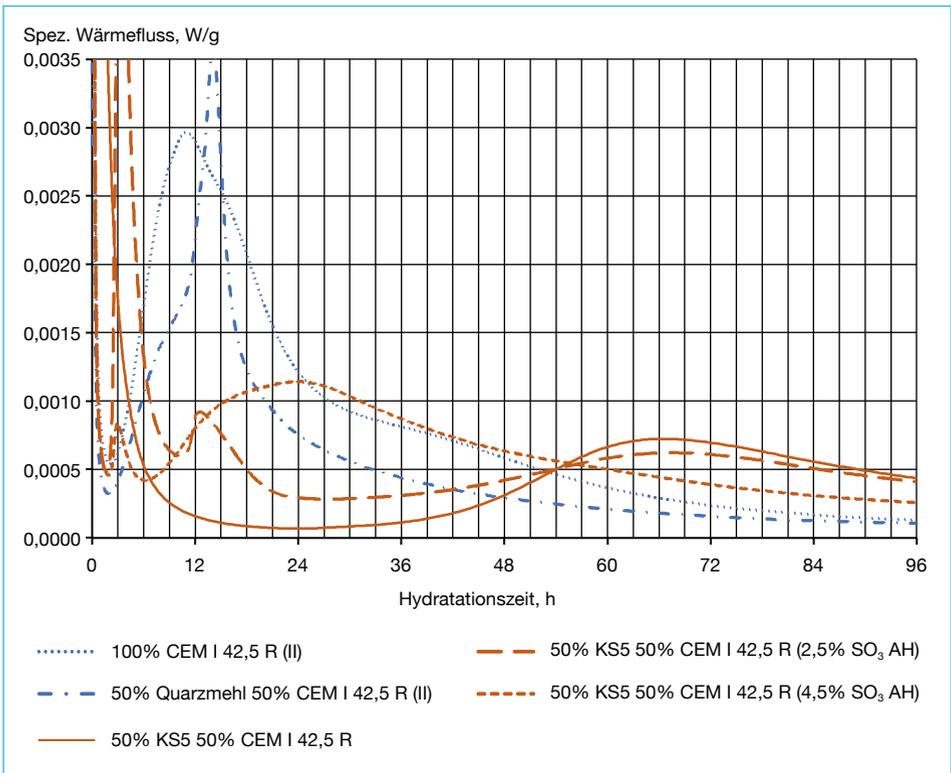


Bild 2: Spezifischer Wärmefluss von Mischungen aus 50 Ma.-% KS5 und 50 Ma.-% CEM I 42,5 R ohne Sulfatzusatz und mit Einstellung auf 2,5 Ma.-% und 4,5 Ma.-%  $SO_3$  durch Anhydritzugabe im Vergleich zu 100 Ma.-% CEM I 42,5 R und einer Mischung aus 50 Ma.-% CEM I 42,5 R und 50 Ma.-% Quarzsandmehl.

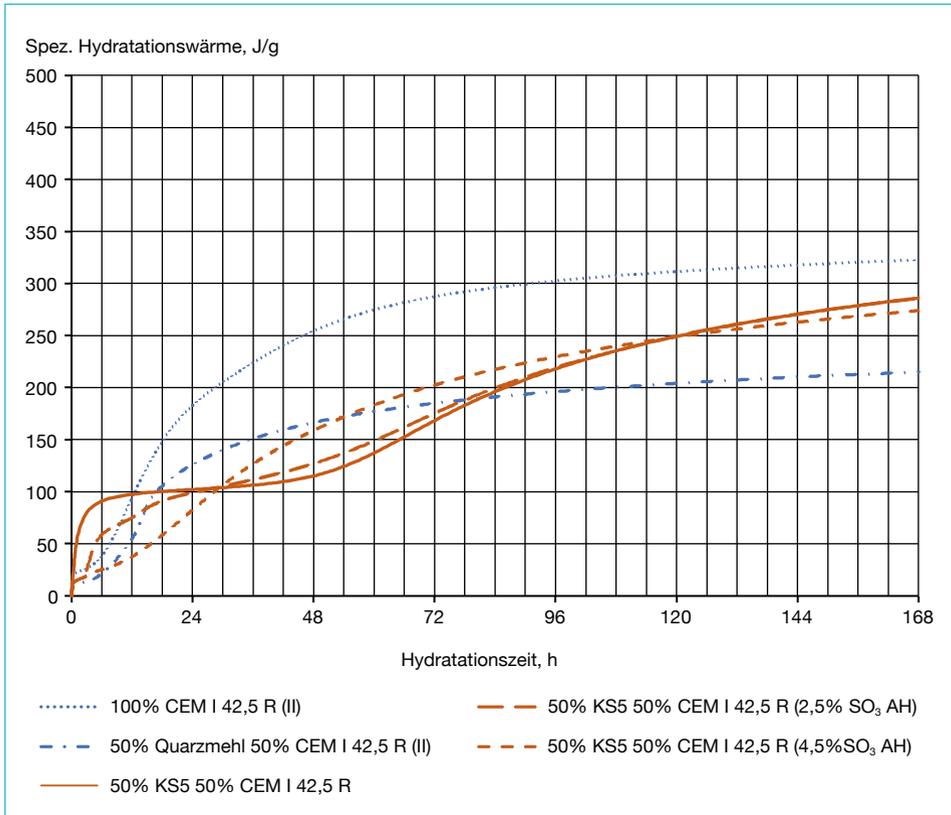


Bild 3: Spezifische Hydratationswärme aus 50 Ma.-% KS5 und 50 Ma.-% CEM I 42,5 R ohne Sulfatzusatz und mit Einstellung auf 2,5 Ma.-% und 4,5 Ma.-%  $\text{SO}_3$  durch Anhydritzugabe im Vergleich zu 100 Ma.-% CEM I 42,5 R und einer Mischung aus 50 Ma.-% CEM I 42,5 R und 50 Ma.-% Quarzsandmehl.

Die Gesamtwärmeentwicklung lag in allen Mischungen mit KS5 zwischen der von reinem Portlandzement und der einer Mischung aus 50 Ma.-% CEM I 42,5 R und 50 Ma.-% inertem Quarzsandmehl (Bild 3). Dies deutet darauf hin, dass KS5 zur Hydratationsreaktion beiträgt, jedoch in geringerem Maß als Portlandzementklinker. Nach Optimierung der Rezepturen werden ausreichende Mengen der modifizierten Schlacke in einem Demonstrationsversuch (20 Tonnen) erzeugt und das Potential der Substitution von OPC eingehend in zementtechnischen Untersuchungen ermittelt.

### 3. DRI-EOS: Nutzung von auf DRI-Basis erzeugter EAF-Schlacke in der Zementindustrie

Ziel des vom BMBF geförderten Projekts DRI-EOS ist die Erforschung von Nutzungsmöglichkeiten des neuen Typs EAF-Schlacke, welche beim Einsatz von direkt reduziertem Eisen in Kombination mit Schrott entsteht. Dabei steht die Nutzung in der Zementindustrie

im Fokus, da die Umstellung auf Direktreduktionsanlagen über den Wegfall des Hüttenandes für diesen Verwendungszweig am einschneidendsten sein wird. Durch die Sicherstellung zementtechnologischer nutzbarer Eigenschaften der EAF-Schlacke wird die lange bestehende Kooperation zwischen Stahl- und Zementindustrie zum gegenseitigen Vorteil weiter fortgeführt. Zum einen wird eine hochwertige Nutzung der zukünftig stark ansteigenden Menge an EAF-Schlacke sichergestellt und eine inakzeptable Deponierung vermieden, zum anderen steht der Zementindustrie weiterhin ein CO<sub>2</sub>-armes Klinkersubstitut zur Verfügung. Das Projekt ist in sechs Arbeitsziele gegliedert. Zunächst werden modifizierte EAF-Modellschlacken hergestellt (1), welche die zukünftig entstehenden EAF-Schlacken darstellen sollen. Die Modellschlacken werden anschließend (teil-) reduziert (2) und unter Zugabe von Zuschlagstoffen konditioniert (3).

In Tabelle 2 sind die chemischen Zusammensetzungen und der Glasgehalt der zukünftig angestrebten DRI-EAF-Schlacke und von heutigen Hüttenänden aus dem Monitoring des FEhS-Instituts sowie die in relevanten Normen definierten Kennwerte zusammengestellt.

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung und Glasgehalt der zukünftig angestrebten DRI-EAF-Schlacke, von Monitoring-Hüttenänden und die Vorgaben aus der Normung

Parameter	Einheit	DRI-EAF-Schlacke <sup>1</sup>	Hüttenand-Monitoring <sup>2</sup>	Normung	
CaO	Ma.-%	30,0 - 36,0	29,2 - 46,5	-	
SiO <sub>2</sub>		14,0 - 20,0	32,5 - 42,4	-	
FeO		30,0 - 40,0	0,10 - 2,00	-	
MgO		7,0 - 11,0	4,1 - 12,8	≤ 18 <sup>3</sup>	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		3,0 - 6,0	8,8 - 16,0	-	
MnO		0,5 - 5,0	0,05 - 2,96	-	
SO <sub>3</sub>		-	0,00 - 0,52	≤ 2,50 <sup>3</sup>	
S <sup>2-</sup>		-	0,07 - 1,97	≤ 2,00 <sup>3</sup>	
TiO <sub>2</sub>		-	0,34 - 3,07	-	
CaO + MgO + SiO <sub>2</sub>		-	52,0 - 65,0	76,5 - 88,3	≥ 66,6 <sup>4</sup>
CaO/SiO <sub>2</sub>		-	1,80 - 2,25	0,74 - 1,34	-
(CaO + MgO) / SiO <sub>2</sub>	-	2,20 - 2,89	0,97 - 1,53	> 1 <sup>3,4</sup>	
Glasgehalt	Ma.-%	> 90,0	85,3 - 100,0	≥ 66,6 <sup>3,4</sup>	

<sup>1</sup> Im Projekt angenommene Bereiche für zukünftig anfallende DRI-EAF Schlacken

<sup>2</sup> Interne Erhebungen des FEhS-Instituts 2008-2020

<sup>3</sup> DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 15167-1 [7]

<sup>4</sup> DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 197-1 [8]

Die Notwendigkeit des Herabsenkens des Eisenoxidgehalts, wie es im zweiten Arbeitsziel formuliert ist, ist offensichtlich. Zusätzlich behandelt dieses Arbeitsziel die Thematik, im künftigen *Hüttensand* unerwünschte Schwermetalloxide, wie Chrom-, Vanadium- oder Molybdänoxid, zu vermindern, was unter Berücksichtigung der thermodynamischen Grundsätze eine vollständige Reduktion des Eisenoxids bedingt. Zur Reduktion können einerseits Kohlenstoffträger und andererseits unedlere Metalle wie Aluminium und Silizium eingesetzt werden. Letzteres soll so gesteuert werden, dass unmittelbar positive Auswirkungen auf die Einstellung der Siliziumoxid- und Aluminiumoxidgehalte bei der Konditionierung entstehen. Weiterhin ist zu erkennen, dass die erwarteten hohen Werte sowohl für die einfache Basizität  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  als auch für die in DIN EN 197-1 und DIN EN 15167-1 definierte erweiterte Basizität  $(\text{CaO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2$  – insbesondere durch Erhöhung des  $\text{SiO}_2$ -Gehalts – verringert und der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Gehalt erhöht werden müssen. Die zunächst erwartete Basizität  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  in Höhe von 1,80 bis 2,25 ist erfahrungsgemäß zu hoch, um mit herkömmlichen Granulationsanlagen ein glasiges Material zu erzeugen. Für die Reduktion und Konditionierung werden aus ökonomischen wie ökologischen Gründen sekundäre Rohstoffe untersucht. Der Fokus liegt dabei auf Materialien, die bisher nur eingeschränkt oder qualitativ minderwertig genutzt oder gar nicht in den Wertstoffkreislauf zurückgeführt werden. Als Reduktionsmittel werden beispielsweise CFK- oder CFC-Bruch, FeSi oder SiC mit für metallurgische Zwecke ungeeigneter Zusammensetzung oder Korngröße oder auch Sekundäraluminium aus der Aufbereitung von Hausmüllverbrennungsgaschen untersucht. Bei den Konditionierungsmitteln sind z.B. Gießereialtsande mit organischen Binderanhaftungen, Recyclingstoffe aus der Bauindustrie, wie Mineralwolle, Porenbeton, Betonbrechsand und Mauerwerkbruch, oder auch Schleifmittelproduktionsreste bzw. -rezyklate von besonderem Interesse. Durch die Verwendung der genannten Stoffe werden größere  $\text{CO}_2$ -Emissionen aus fossilen Quellen vermieden und die Kreislaufwirtschaft gestärkt.

Neben der chemischen Zusammensetzung wirken sich insbesondere der Glasgehalt sowie die thermisch und granulationstechnisch bedingte Glasstruktur auf die Hüttensandreaktivität aus [12]. Daher mündet die Konditionierung der flüssigen Schlacke in eine kontrollierte beschleunigte Abkühlung, durch die eine glasige Schlackephase mit latent hydraulischen Eigenschaften erzeugt werden soll (4). Anschließend wird das neuartige Material für den Einsatz im Zement bzw. Beton sowohl zement- als auch umwelttechnologischen Untersuchungen unterzogen (5). Ergänzend wird auch eine Nutzung der kristallinen Gesteinskörnung, welche aufgrund von anlagenbedingtem Ausfall einer Granulationsanlage begrenzt auftreten wird, ebenfalls untersucht (6).

Die neuartigen Schlacken werden im Technikum der BAM in einem EAF mit einer Leistung von 450 kW und einem Abstichgewicht von 50 bis 100 kg erschmolzen. Der metallurgische Prozess einer Schlackenbehandlung kann so im Pilotmaßstab simuliert werden, wobei ausreichende Mengen an Material für die weiterführenden Untersuchungen bereitgestellt werden können. Des Weiteren werden die schmelzflüssigen Schlacken mit den Projektpartnern und dem von ihnen zur Verfügung gestellten Equipment direkt beim Abguss zur Erzeugung einer glasigen Struktur im Technikum nass und trocken granuliert.

## 4. Zusammenfassung

Das Ziel der Europäischen Union, bis 2050 der erste klimaneutrale Kontinent zu werden, wirkt sich auch auf die beiden CO<sub>2</sub>-intensiven Sektoren Stahlindustrie und Zementindustrie aus. Um sich den künftigen Herausforderungen zu stellen, haben beide Industriesektoren Maßnahmen ergriffen, die tiefgreifende Auswirkungen sowohl auf ihre Wertschöpfungsketten und Produktionsrouten als auch auf die Kooperation zwischen der Stahl- und der Zementindustrie haben. Insbesondere die Stilllegung von Hochöfen und der damit verbundene Verlust des Nebenprodukts Hüttensand, das in der Zementindustrie seit mehr als 140 Jahren als Klinkerersatz eingesetzt wird und in diesem Sektor erhebliche CO<sub>2</sub>-Emissionen vermeidet und natürliche Ressourcen einspart, stellt beide Industrien vor große Herausforderungen. Mit der Stilllegung von Hochöfen werden neue Wege der Stahlerzeugung beschritten, wie z.B. wasserstoffbasierte Direktreduktionsanlagen mit nachfolgenden Elektrolichtbogenöfen, bei denen große Mengen neuer Schlacken entstehen werden. Die Forschungsprojekte SlagCEM und DRI-EOS tragen dazu bei, die Herausforderungen des anstehenden industriellen Transformationsprozesses zu bewältigen.

Das Projekt SlagCEM wird durch das BMBF unter der Förderrichtlinie *Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Bauen und Mineralische Stoffkreisläufe (ReMin)*, Förderkennzeichen 033R254, gefördert. Das Verbundvorhaben DRI-EOS wird vom BMBF unter dem Förderkennzeichen 03SF0676 gefördert.

## 5. Quellen

- [1] ArcelorMittal Hamburg GmbH. (Hrsg.): Unsere Geschichte. In: <https://hamburg.arcelormittal.com/Ueber-uns/Geschichte/> [Zugriff am 03.04.2023]
- [2] Bodor, M.; Santos, R. M.; Cristea, G.; Salman, M.; Cizer, Ö.; Iacobescu, R. I.; Chiang, Y. W.; van Balen, K.; Vlad, M.; van Gerven, T. (2016). Laboratory investigation of carbonated BOF slag used as partial replacement of natural aggregate in cement mortars. In: *Cement and Concrete Composites* 65, 2006, S. 55-66.
- [3] Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) (Hrsg.): SlagCEM – Hochwertige Zemente und Roh-eisen aus Stahlwerksschlacken, 2021. In: <https://www.bam.de/Content/DE/Projekte/laufend/SlagCem/slagcem.html> [Zugriff am 22.03.2023].
- [4] Chen, W.; Huo, Z.; Yang, Z.: Study on the performance of green cement with large amount of steel slag addition. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 233 (2), 2019, 022015.
- [5] Chotoli, F. F.; Quarcioni, V. A.; Neto, J. B. F.; Santos, R. F. C.: Modified oxygen steelmaking slag to produce cements - Part 2: hydration and physical-mechanical characterization. In: *Conference Proceedings of the 14th International Congress on the Chemistry of Cement*. Peking, 2015, S. 2361-2367.
- [6] Das, B.; Prakash, S.; Reddy, P. S. R.; Misra, V. N.: An overview of utilization of slag and sludge from steel industries. In: *Resources, Conservation and Recycling* 50 (1), 2007, S. 40-57.
- [7] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN EN 15167-1 Hüttensandmehl zur Verwendung in Beton, Mörtel und Einpressmörtel – Teil 1: Definition, Anforderung und Konformitätskriterien. Berlin, 2006.
- [8] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN EN 197-1 Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement. Berlin, 2011.
- [9] Dziarmagowski, M.; Karbowniczek, M.; Pyzalski, M.; Okon, J.: Reduction of converter slag in electric arc furnace. In: *Ironmaking & steelmaking* 19 (1), 1992, S. 45-49.

- [10] Dziarmagowski, M.: Assessment of properties of non-metallic phase obtained during the converter slag reduction process. In: Archives of Metallurgy 48 (2), 2003, S. 201-207.
- [11] Dziarmagowski, M.; Suliga, I.: Research on opportunities of modification of chemical composition of the non-metallic phase obtained in the converter slag reduction process. In: Archives of Metallurgy and Materials 50 (4), 2005 S. 955.
- [12] Ehrenberg, A.; Bornhöft, H.: Faktoren der Glasbildung von Hüttensanden und deren Einfluss auf Glasstruktur und Reaktivität unter Berücksichtigung verschiedener Granulationsverfahren. In: Industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF) (Hrsg.): Schlussbericht zu IGF-Vorhaben Nr. 19416 N. Duisburg, 2020.
- [13] Europäische Kommission (Hrsg.): Europäischer Grüner Deal, 2019. In: [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_de](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de) [Zugriff am 28.03.2023]
- [14] European Environment Agency (Hrsg.): EEA greenhouse gases - data viewer, 2021. In: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer> [Zugriff am 28.03.2023]
- [15] FEhS – Institut für Baustoffforschung e.V.: Pressemitteilungen. Wirtschaftsministerin Neubaur besucht FEhS-Institut, 2022. In: <https://www.fehs.de/unser-service/presse/> [Zugriff am 01.03.2023]
- [16] Guo, Y.; Xie, J.; Zhao, J.; Zuo, K. (2019): Utilization of unprocessed steel slag as fine aggregate in normal-and high-strength concrete. Construction and Building Materials 204: 41-49
- [17] He, T.; Li, Z.; Zhao, S.; Zhao, Z.; Zhao, X.: Effect of reductive component-conditioning materials on the composition, structure, and properties of reconstructed BOF slag. In: Construction and Building Materials 255, 2020, 119269.
- [18] Huo, B.; Li, B.; Chen, C.; Zhang, Y.: Surface etching and early age hydration mechanisms of steel slag powder with formic acid. In: Construction and Building Materials 280, 2021, 122500.
- [19] Kourounis, S.; Tsvivilis, S.; Tsakiridis, P. E.; Papadimitriou, G. D.; Tsibouki, Z.: Properties and hydration of blended cements with steelmaking slag. In: Cement and Concrete Research 37 (6), 2007, S. 815-822.
- [20] Kubodera, S.; Koyama, T.; Ando, R.; Kondo, R.: An approach to the full utilization of LD slag. In: Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan 19 (7), 1979, S. 419-427.
- [21] Lin, W.-T.; Tsai, C.-J.; Chen, J.; Liu, W.: Feasibility and characterization mortar blended with high-amount basic oxygen furnace slag. In: Materials 12 (1), 2019, 6.
- [22] Liu, C.; Huang, S.; Wollants, P.; Blanpain, B.; Guo, M.: Valorization of BOF steel slag by reduction and phase modification: metal recovery and slag valorization. In: Metallurgical and Materials Transactions B 48, 2017, S. 1602-1612.
- [23] Ludwig, H.-M.; Wulfert, H.: Aufbereitete Stahlwerksschlacke als reaktiver Zementhauptbestandteil. In: 18. Internationale Baustofftagung ibausil. Weimar, 2012.
- [24] Längen, H. B.: Wege zur Minderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Eisen- und Stahlindustrie in Europa. Düsseldorf: Stahlinstitut VDEh, 2021.
- [25] Längen, H. B.; Schmöle, P.: Wege zu einer klimaneutralen Stahlerzeugung. Düsseldorf: VDEh Stahlinstitut, 2022.
- [26] Merkel, T.: Daten zur Produktion und Nutzung von Eisenhüttenschlacken im Jahr 2021. Report des FEhS-Instituts 29, 2022, S. 53-54.
- [27] Murphy, J. N.; Meadowcroft, T. R.; Barr, P. V.: Enhancement of the cementitious properties of steelmaking slag. In: Canadian Metallurgical Quarterly 36 (5), 1997, S. 315-331.
- [28] Neto, J. B. F.; Fredericci, C.; Faria, J. O. G.; Chotoli, F. F.; Ribeiro, T. R.; Malynowskyj, A.; Silva, A. L. N.; Quarcioni, V. A.; Lotto, A. A.: Modification of Basic Oxygen Furnace Slag for Cement Manufacturing. In: Journal of Sustainable Metallurgy 3, 2017, S. 720-728.
- [29] Piret, J.; Dralants, A.: Utilization of LD Process Slag for the Production of Portland Cement Clinker and Pig Iron. In: Stahl und Eisen 104 (16), 1984, S. 774-778.

- [30] Reddy, A. S.; Pradhan, R. K.; Chandra, S.: Utilization of basic oxygen furnace (BOF) slag in the production of a hydraulic cement binder. In: International Journal of Mineral Processing 79 (2), 2006, S. 98-105.
- [31] Schraut, K.; Adamczyk, B.; Adam, C.; Stephan, D.; Meng, B.; Simon, S.; von Werder, J.: Synthesis and characterisation of alites from reduced basic oxygen furnace slags. Cement and Concrete Research. 2021, 147, Artikelnr. 106518
- [32] The European Cement Association (CEMBUREAU) (Hrsg.): Cementing the European Green Deal. Brüssel, 2020.
- [33] The European Commission's science and knowledge center (Joint Research Center) (Hrsg.): Deep decarbonisation of industry: The cement sector. 2020.
- [34] The European Steel Association (EUROFER) (Hrsg.): EUROPEAN STEEL IN FIGURES 2022. DATA COVERING 2021. Brüssel, 2022.
- [35] The European Steel Association (EUROFER) (Hrsg.): EU proposals on Emissions Trading and Carbon Border Adjustment derail the green transition. In: <https://www.eurofer.eu/publications/position-papers/eu-proposals-on-emissions-trading-and-carbon-border-adjustment-derail-the-green-transition/> [Zugriff am 28.03.2023]
- [36] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ) (Hrsg.): Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien. Düsseldorf, 2020.
- [37] Wang, Q.; Yan, P.; Feng, J.: A discussion on improving hydration activity of steel slag by altering its mineral compositions. In: Journal of Hazardous Materials 186 (2-3), 2011, S. 1070-1075.
- [38] Wulfert, H.; Wimmer, G.; Ludwig, H.-M.: A new process for production of cement clinker from steelmaking slags. In: Cement International 15 (1), 2017, S. 46-51.
- [39] Wulfert, H.; Wimmer, G.; Fleischanderl, G., Möser, B.; Ludwig, H.-M.: Process for producing cement clinker based LD slags with simultaneous metal recovery; Part 1: Basic investigations into modification of the LD slags. In: Cement international 6, 2019, S. 38-53.
- [40] Zareei, S. A.; Ameri, F.; Bahrami, N.; Shoaee, P.; Moosaei, H. R.; & Salemi, N.: Performance of sustainable high strength concrete with basic oxygen steel-making (BOS) slag and nano-silica. In: Journal of Building Engineering 25, 2019, 100791.
- [41] Zhao J, Wang D, Yan P, Zhang D and Wang H (2016) Self-cementitious property of steel slag powder blended with gypsum. Construction and Building Materials 113: 835-842

### Ansprechpartner



#### **Dr.-Ing. Christian Adam**

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Fachbereichsleiter

Fachbereich 4.4 Thermochemische Reststoffbehandlung und Wertstoffrückgewinnung

Richard-Willstätter-Straße 11

12489 Berlin, Deutschland

+49 30 8104567 0

christian.adam@bam.de

## Recodust – from the Pilot Plant to an Industrial Plant?

Wolfgang Reiter, Johannes Rieger, Klaus Doschek-Held and Christoph Thaler

Dust is generated from iron and steel production due to the processes involved. The scrap used in the LD converter or electric arc furnace are partially galvanised for corrosion protection. The dust generated in these processes includes valuable metals, such as iron and zinc and other volatile components, such as lead and halogens. Specifically, the high zinc content in the dust prevents their use within the steel plant. Established methods of utilising these dusts are often expensive, or the materials used are subject to significant restrictions regarding zinc content. One process which has the potential to overcome these disadvantages is the RecoDust process. In this pyrometallurgical process, the input dust is introduced without pre-treatment into the central part (=Flash Reactor) and is slagged under reducing conditions through sub-stoichiometric combustion of natural gas and oxygen. Due to the reducing reactor atmosphere, the zinc oxide is reduced to metallic zinc and vaporised. The exhaust gas stream from the Flash Reactor is post-combusted, and gaseous zinc is converted to solid zinc oxide, which is separated as filter dust from the process gas. On the other hand, the non-volatile components of the input dust collect at the bottom of the Flash-Reactor as RecoDust slag (RDS) and are intermittently tapped. Due to its low zinc content, the RDS is comparable to low-grade iron ore and can be utilised as input material in the steel plant, such as feed material in the sinter plant. In terms of circular economy, this improves resource efficiency for iron in the steel plant, another advantage of the RecoDust process. In contrast, zinc-rich filter dust is a secondary raw material for zinc production. After successful melting campaigns in the pilot plant at the Chair of Thermal Processing Technology (Montanuniversitaet Leoben), a plant concept for a dust throughput of 1,000 kg/h is currently planned. By installing a pneumatic dust conveying system with natural gas as the conveying medium, a scalable dust charging/burner unit was tested at the pilot plant, and the results provided valuable insights for further upscaling. In summary, the process has the following advantages: no pre-treatment of the feedstock necessary, compact plant design, flexible zinc content in the feedstock and material recycling of the iron-rich RecoDust slag and the zinc-rich filter dust.

## RecoDust – von der Pilot- zur industriellen Anlage?

Wolfgang Reiter, Johannes Rieger, Klaus Doschek-Held und Christoph Thaler

1.	Der RecoDust Prozess .....	236
1.1.	Verfahrensbeschreibung.....	236
1.2.	Pilotanlage am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik .....	237
2.	Versuchsdurchführung und Ergebnisse .....	238
3.	UpScale und Optimierungen der Pilotanlage .....	240
4.	Zusammenfassung und Ausblick.....	242
5.	Quellen.....	242

152,6 Millionen Tonnen Stahl wurden im Jahr 2021 in der EU produziert, davon entfielen 56,1 % auf die Route Hochofen/Konverter und 43,9 % auf die Elektrolichtbogenofenroute. [8] Die Steigerung der Rohstoffeffizienz ist von essentieller Bedeutung für eine nachhaltige und ressourcenschonende Stahlerzeugung und ist schon seit jeher von großer Bedeutung. Die Eisenausbringung bei der Erzeugung von Walzstahl lag im Jahr 1960 noch bei 65 % und konnte auf 93 % im Jahr 2016 gesteigert werden. [7]

In integrierten Hüttenwerken wie auch in Stahlwerken mit Elektrolichtbogenofen hat sich ein intensives Netzwerk an Verwertungswegen für die anfallenden Nebenprodukte wie Schlacken und Stäube etabliert. Aufgrund von prozesstechnischen Grenzen ist eine Rückführung von eisenhaltigen Kreislaufstoffen in den Hochofen beispielsweise nur bei geringen Gehalten an Zink möglich, die prozesstechnische Grenze für die spezifische Zinkfracht liegt bei lediglich 0,15 kg pro Tonne erzeugtem Roheisen. [3]

Für die Eisenverluste mitverantwortlich sind Stäube aus dem LD-Konverterprozess sowie aus dem Elektrolichtbogenofen. Diese sind aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung oftmals nicht problemlos rückführbar. Im LD-Konverter fallen Stäube im Bereich von 18 kg pro Tonne erzeugtem flüssigen Rohstahl an. [4] Die durchschnittlichen Eisengehalte dieser Stäube liegen bei circa 50 %. [6] Wesentlich für den Zinkgehalt ist die Menge und Qualität an eingesetzten Schrotten, der Einsatz von verzinkten Schrottpaketen führt zu einer Erhöhung des Zinkgehaltes in der Staubfraktion. Zinkgehalte von 0 bis 10 % sind üblich [5], eine weitere Zinkanreicherung durch den Wiedereinsatz von brikettiertem Staub im LD-Prozess ermöglicht Zinkgehalte von bis zu 25 %. [4] Die

Stäube aus dem Elektrolichtbogenofen weisen aufgrund des nahezu 100-prozentigen Schrotteinsatz im Lichtbogenofen stark fluktuierenden Zusammensetzungen, je nach Qualität des eingesetzten Schrottes, auf. Durchschnittliche Anfallsmengen an Staub belaufen sich auf 15 bis 23 kg Staub pro Tonne erzeugtem Rohstahl mit Eisengehalten von 15 bis 30 % und Zinkgehalten von 15,0 bis 40,0 %. [1]

Eine Berechnung aus diesen Daten der in den Stäuben der europäischen Stahlproduzenten vorhandenen Eisenmengen, ergibt für Konverterstäube ein Potential von 0,77 Millionen Tonnen pro Jahr und für Stäube aus dem Elektrolichtbogenofen von 0,32 Millionen Tonnen pro Jahr. Dies entspricht etwas mehr als 0,71 % der erzeugten Menge an Stahl. Der am weitesten verbreitet Prozess für die pyrometallurgische Behandlung von Stahlwerksstäuben ist der Wälzprozess, bei dem das stoffliche Recycling ausschließlich von Zink erfolgt und strenge Restriktionen hinsichtlich des Zinkgehaltes im Einsatzstaub gelten.

Nachfolgend erfolgt die Beschreibung des RecoDust Prozesses, welcher in Form einer Pilotanlage mit einem Staubdurchsatz von bis zu 300 kg/h am Lehrstuhl für Thermo- prozesstechnik an der Montanuniversität Leoben umgesetzt wurde und gemeinsam mit dem metallurgischen Kompetenzzentrum K1-MET GmbH und der voestalpine Stahl GmbH betrieben wird. Nach erfolgreichen Schmelzkampagnen beginnen die Arbeiten für das UpScale der Pilotanlage. Wesentlich für das potentielle UpScale ist die Installation und Optimierung einer skalierbaren Staubchargier/Brennereinheit sowie die Potentiale zur optimalen Führung der Abgasstrecke.

## 1. Der RecoDust Prozess

Der RecoDust Prozess ist ein pyrometallurgischer Prozess zur Behandlung von zinkhaltigen Stahlwerksstäuben. Der RecoDust Prozess besteht dabei aus den Komponenten Staubdosier/Brennereinheit, Flash-Reaktor, Konverter und Abgasbehandlung (Bild 1).

### 1.1. Verfahrensbeschreibung

Das Verfahren beruht auf der selektiven Verflüchtigung von Zink. Der Einsatzstaub wird dabei in den Flash-Reaktor eingebracht, entzinkt und verschlackt. Der gegenständliche Flash-Reaktor wird mit einem Erdgas/Sauerstoffbrenner beheizt. Die Verbrennung wird dabei unterstöchiometrisch durchgeführt und stellt eine reduzierende Atmosphäre bereit. Bei der Einbringung in den Reaktor verflüssigt sich das Staubpartikel in Sekundenbruchteilen und das im flüssigen Tröpfchen vorhandene oxidisch vorliegende Zink wird zu metallischem Zink reduziert und verdampft bei den vorherrschenden Temperaturen von 1.500 – 1.900 °C. Die nicht-flüchtigen Bestandteile des Einsatzmaterials sammeln sich am Boden als oxidische Phase, der sogenannten RecoDust Schlacke (RDS = Produkt 1). Die flüchtigen Bestandteile des Einsatzstaubes, wie Zink, Blei oder Halogene verlassen mit dem Abgas den Flash-Reaktor und werden im darauffolgenden Konverter überstöchiometrisch nachverbrannt. Dabei werden die unverbrannten

Bestandteile CO und H<sub>2</sub> sowie das gasförmig vorliegende Zink im Konverter nachverbrennt, anschließend kann festes Zinkoxid abgeschieden werden. Dies erfolgt nach einer weiteren Kühlung des Abgases wobei der zinkhaltiger Filterstaub, bezeichnet als ungewaschenes Zinkoxid (CZO = Produkt 2), abgetrennt wird. Das Verfahrensfliessbild des RecoDust Prozesses ist in Bild 1 dargestellt.

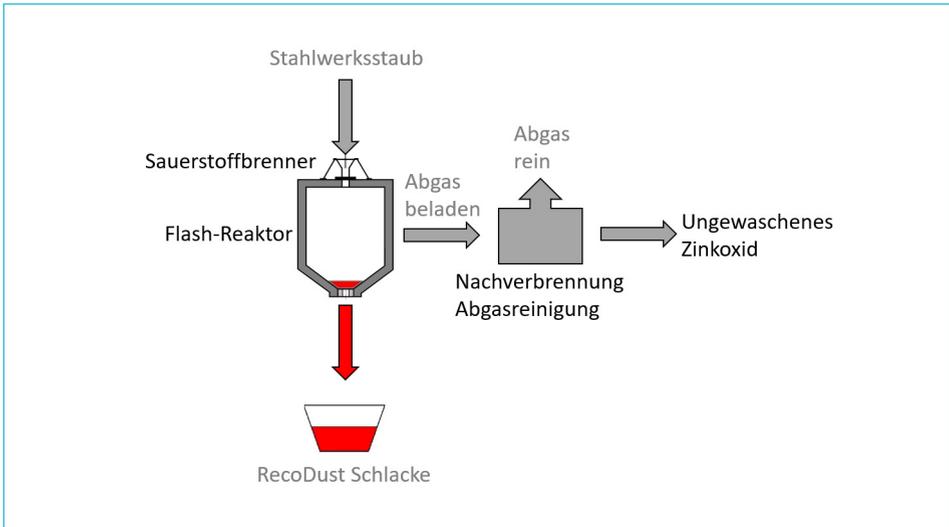


Bild 1: Verfahrensprinzip des RecoDust Prozesses

Quelle: Geier, B.; Raupenstrauch, H.; Reiter, W.; Pilz, K.: Verwertung zinkhaltiger Stäube der metallurgischen Industrie. Österr. Wasser- und Abfallw. 66 (2014), 11 – 12, 398 –402. DOI: 10.1007/s00506-014-0188-5, bearbeitet

## 1.2. Pilotanlage am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik

Die Pilotanlage, entwickelt am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik der Montanuniversität Leoben, ist in Bild 2 ersichtlich. Die Staubzufuhr erfolgt über eine pneumatische Fördereinrichtung, bei der Erdgas als Fördergas Verwendung findet. Dabei fungiert Erdgas gleichzeitig auch als Brenngas, wodurch der Einsatzstaub direkt in den Brenner gefördert wird. Die pneumatische Staubbeforderung mit dem entwickelten Brenner stellen eine skalierbare Einheit dar. Der Flash-Reaktor selbst ist ein feuerfest ausgekleideter Reaktor, in dem die unterstöchiometrische Entzinkung und Verschlackung des Einsatzstaubes stattfindet und mit einem nach unten angeordneten Abstichloch versehen ist. Aus platztechnischen Gründen ist die Anordnung des Konverters nach einer Umlenkung des Steigrohres horizontal angeordnet. Eine Dreistofflanze sorgt für die Eindüsung des für die Nachverbrennung benötigten Sauerstoffs und die gleichzeitige Eindüsung von Wasser zur Kühlung des Abgasstromes. Die weitere Kühlung durch die Einbringung von Luft und Wasser mittels sechs Zweistoffdüsen in der Quenche sorgt für die Einhaltung der maximal zulässigen Filtertemperatur, wo die Abtrennung des CZO vom Abgas erfolgt.

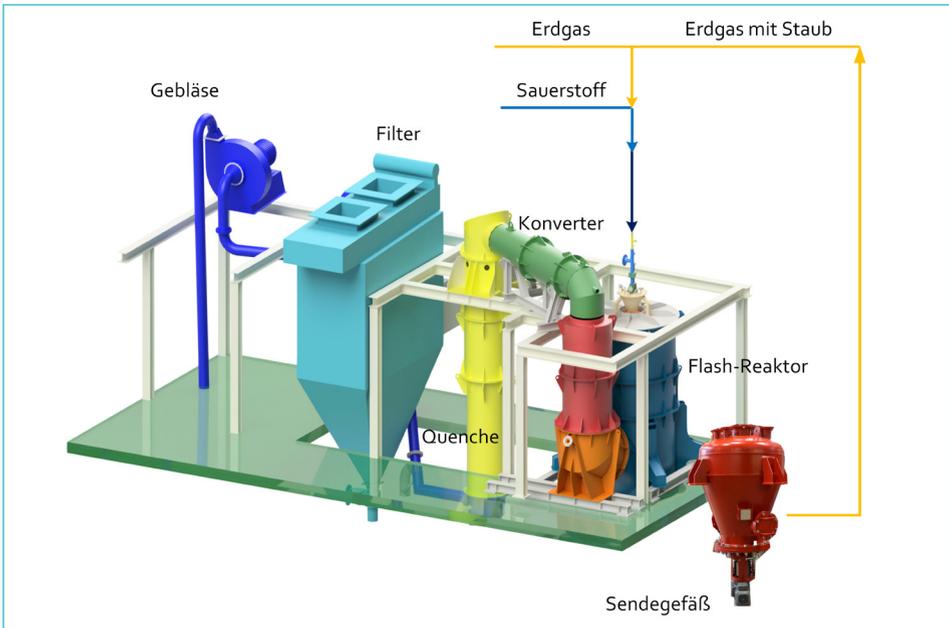


Bild 2: RecoDust Pilotanlage am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik

## 2. Versuchsdurchführung und Ergebnisse

In insgesamt 14 Schmelzkampagnen konnten verschiedenste Stäube mit Zinkgehalten von bis zu 20 % prozessiert werden, ab Schmelzkampagne 11, der Inbetriebnahme der pneumatischen Förderreinrichtung, ist die Pilotanlage mit der pneumatischen Staubfördereinheit versehen. Ziel dieser Versuche war es, die Entzinkungsraten mit der pneumatischen Beschickung und dem adaptierten Brenner zu ermitteln.

Eine Charge beläuft sich auf 250 kg Einsatzstaub, der Abstich der RDS erfolgt im Anschluss diskontinuierlich. Die Entleerung des CZO aus dem Filter findet danach statt, beide Produkte, RDS und CZO, werden anschließend beprobt und chemisch analysiert.

Tabelle 1 zeigt die chemische Zusammensetzung der Hauptmaterialflüsse in Eisen gesamt ( $Fe_{\text{tot}}$ ) und Zink. Eisen im Einsatzstaub liegt in verschiedenen Modifikationen vor, metallisch, II- und III wertig und hat einen Fetot. von etwa 50 % und einen Zinkgehalt von 14,60 %.

Der Eisengehalt des mengenmäßig größten Materialfluss, der RDS, liegt ähnlich wie beim Einsatzstaub bei fast 50 Ma.-%. Dass es bei der Entfernung der flüchtigen Bestandteile zu keiner Erhöhung des Eisengehaltes kommt, liegt am Verschleiß der feuerfesten Zustellung. Das wichtigste

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung vom Einsatzstaub, der RDS und dem CZO der RecoDust Pilotanlage

Element	Einsatzstaub	RDS	CZO
	Ma.-%		
Fe total	50,05	49,23	16,07
Zn	14,60	0,41	56,40

Qualitätsmerkmal der RDS ist der Zinkgehalt, der Gehalt an 0,41 Ma.-% weist auf eine beinahe vollständige Zinkentfernung hin. Die Anreicherung an Zink im CZO, dem Filterstaub, erfolgt in diesem Fall auf 56,4 Ma.-% was mehr als 70 Ma.-% ZnO entspricht. Die restlichen Bestandteile des CZO sind weitere flüchtige Elemente und Verbindungen wie Blei oder die Halogene Chlor und Fluor und nicht flüchtige Bestandteile wie z.B.: Eisen, CaO oder MgO. Diese nicht flüchtigen Bestandteile werden mit dem Abgasstrom aus dem Flash-Reaktor mit ausgetragen und zum Filter befördert und werden in weiterer Folge als *Carry-Over* bezeichnet. Der Eisengehalt ( $Fe_{tot.}$ ) des Filterstaubes liegt bei knapp über 16 %.

Von essenzieller Bedeutung für die Qualität des RecoDust Prozesses ist eine hohe Zinkentfernung um einerseits eine stoffliche Verwertung der RDS zu ermöglichen und andererseits möglichst das gesamte Zink im Filter als CZO aufzukonzentrieren. Ein genauer Aufschluss über die Zinkverteilung bei dem in Tabelle 1 behandelten Versuchs ergibt die Massenverteilung von Zink auf die Produkte des RecoDust Prozesses, welche in Bild 3 ersichtlich ist.

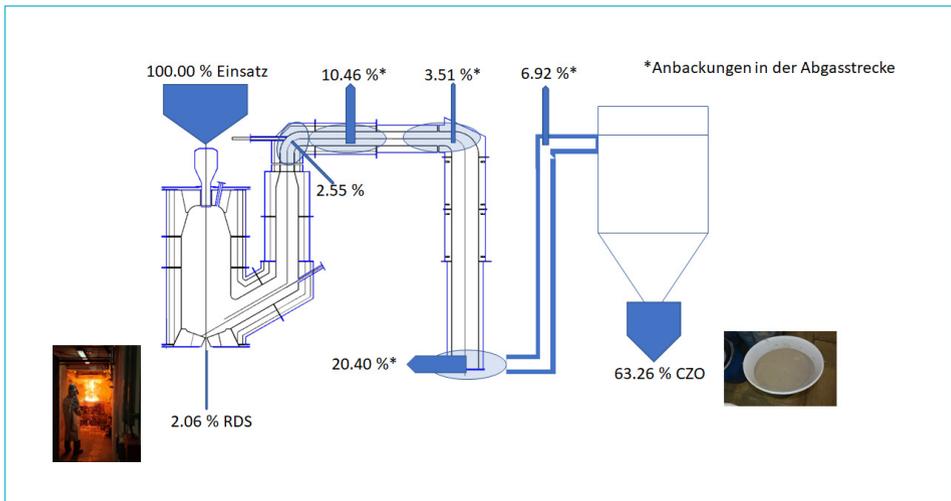


Bild 3: Zinkverteilung eines Versuchs der RecoDust Pilotanlage

Von den 100 % eingesetzten Zinks verbleiben im gegenständlichen Versuch 2,06 Ma.-% in der RDS, was einer Entzinkung von etwa 98 % entspricht. 63,26 % des Zinks befinden sich im CZO und 20,40 % vom eingesetzten Zink sind in Ablagerungen am Ende der Quenche. Alle diese Fraktionen werden bei jedem Versuch gewogen, das restliche Zink verteilt sich auf Anbackungen in der Abgasstrecke, die Wägung dieser erfolgt nach einer Schmelzkampagne und die Aufteilung auf jeden Versuch erfolgt aliquot nach der Dosiermenge. Die restlichen Anbackungen sind das Konverter-Knie mit 2,55 Ma.-%, der Konverter mit 10,46 Ma.-% und das Filter-Knie mit 6,92 Ma.-%.

Die Summe aus dieser Zink-Verteilung liegt über 100 % aufgrund von folgenden Fehlerquellen:

- Das Ausbringen von jedem Versuch liegt nicht bei 100 %, speziell im Flash-Reaktor verbliebene Restschlacke und im Filter verbliebener Staub,
- Fehler bei der aliquoten Aufteilung der Anbackungen der Abgasstrecke,
- Probenahme und Analysengenauigkeit,
- Abstichverluste (Schlackespritzer).

### 3. UpScale und Optimierungen der Pilotanlage

Eine wesentliche Anforderung an den RecoDust Prozess ist es, möglichst hohe Entzinkungsraten zu erreichen. Eine genaue Regelung aller Inputströme wie Erdgas, Sauerstoff und der Dosierrate des Einsatzstaubes sind dazu von Nöten. Die pneumatische Staubfördereinrichtung in Verbindung mit dem darauf abgestimmten Brenner stellt dabei ein skalierbares System dar.

Die Einstellung der Dosierrate bei der pneumatischen Förderung hängt von den gewählten Druckverhältnissen im Sendegefäß ab. In Bild 4 ist die Dosierrate, das Gewicht und der Druck über die Versuchszeit dargestellt. Bei den gewählten Versuchsbedingungen führt der Druckanstieg im Sendegefäß zu einer Erhöhung der Dosierrate von knapp über 150 kg/h zu einem Maximum von 280 kg/h. Mittels Öffnung und Schließung des Abluftventils konnte die weitere Förderrate und der Druck stabilisiert werden, die Förderrate bleibt bei etwa 270 kg/h konstant.

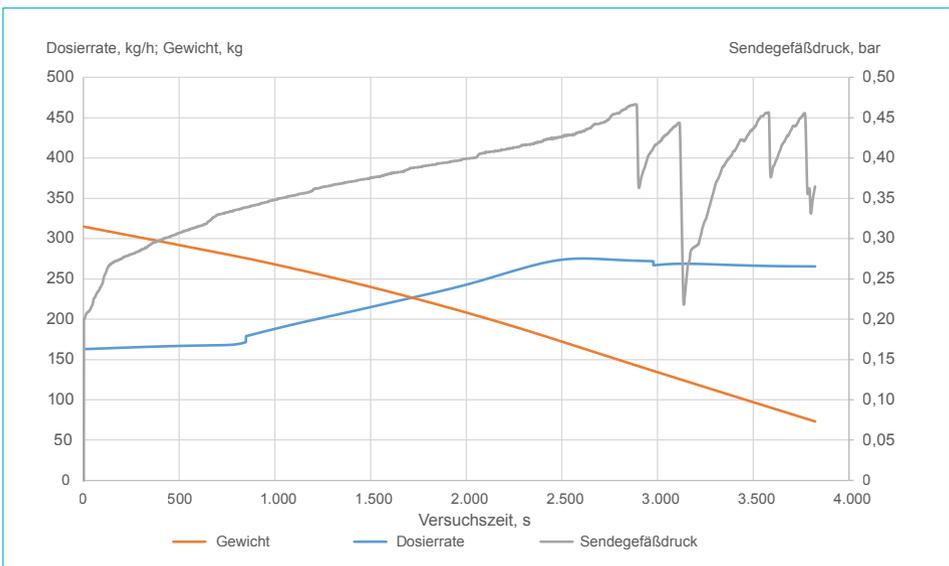


Bild 4: Verlauf der Dosierrate, des Gewichtes und der Druckverhältnisse im Sendegefäß ohne Abluftregelung

Eine Optimierung konnte durch den Einbau eines Regelventils in der Abluft erreicht werden und ist in Bild 5 dargestellt. Der Regeleingriff ist am Druckverlauf des Sendegefäßes erkennbar, dieser ähnelt einer gedämpften Schwingung. Nach der Ausregelzeit von etwa 1.000 s bleibt der Druck im Sendegefäß bei 0,29 bar konstant. Die korrespondierende Dosierrate liegt zu Beginn bei etwa 275 kg/h und sinkt über die Versuchsdauer auf etwa 235 kg/h ab. Ebenfalls ersichtlich ist die beinahe lineare Abnahme des Gewichtes über die Versuchszeit, das Bestimmtheitsmaß beträgt 0,99. Das Absinken der Förderrate bei gleichbleibenden Druckverhältnissen liegt wahrscheinlich am kleiner werdenden Schüttkegel im Sendegefäß.

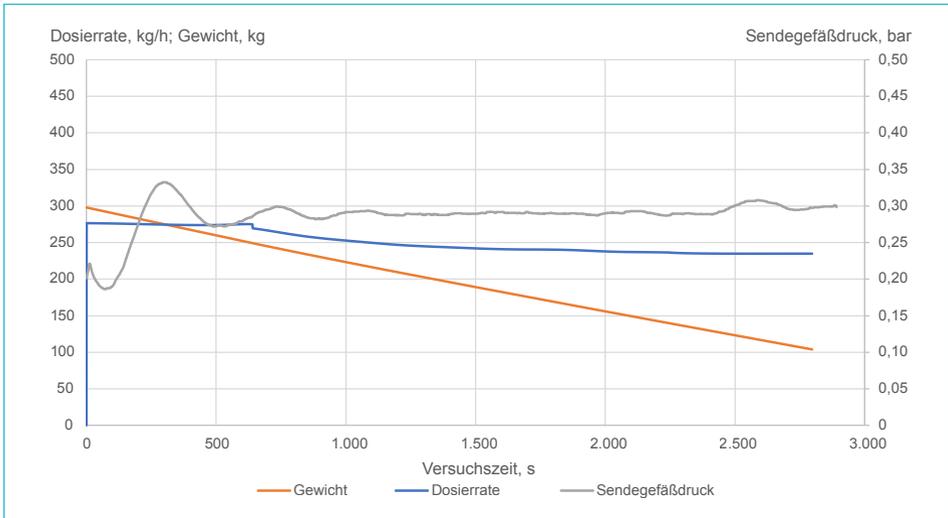


Bild 5: Verlauf der Dosierrate, des Gewichtes und der Druckverhältnisse im Sendegefäß mit Abluftregelung

Ein Problem der Pilotanlage ist die Abgasführung bzw. dessen Anordnung, welche aus platztechnischen Gründen nicht veränderbar ist. Die Umlenkung speziell vor dem Konverter, bei dem die mitgerissenen Carry-Over Partikel noch vollständig flüssig sind, führt zu Anbackungen und Ablagerungen von schmelzflüssigen Partikeln.

Um diesen Umstand in einer industriellen Großanlage zu verhindern, gilt es folgende bauliche Verbesserungen durchzuführen:

- Optimierung der Geometrie des Brenners und des Flash-Reaktors, um den Carry-Over zu minimieren.
- Vertikale Ausführung des Konverters von unten nach oben inklusive Abgaskühlung. Eine Abgasumlenkung sollte erst nach Unterschreitung der Abgastemperatur von etwa 1.000 °C stattfinden, um ein Anbacken noch flüssigen Partikeln zu vermeiden.

Des Weiteren weist der RecoDust Prozess noch Potential zur Abwärmenutzung auf, einerseits jene der flüssigen RDS und andererseits die Abwärme des Abgases. Eine Nutzung der Abwärme der RDS wäre beispielsweise durch eine trockene Schlackengranulation mit gleichzeitiger Abwärmenutzung möglich, der Einsatz eines Hochtemperaturfilters im Abgasstrom sollte die direkte Nutzung der Wärme des Abgases ermöglichen.

## 4. Zusammenfassung und Ausblick

Im Zuge der letzten Schmelzversuche mit der pneumatischen Dosiereinheit und der darauf zugeschnittenen Brenneinheit konnten Entzinkungsraten der RDS von etwa 98 Ma.-% erreicht werden. Die Eisengehalte von etwa 50 % der RDS und die niedrigen Zinkgehalte  $< 0,5$  % ermöglichen eine stoffliche Verwertung als *synthetisches* Eisenerz. Das zinkreiche ungewaschene Zinkoxid (CZO) kann als Sekundärrohstoff für die Zinkproduktion herangezogen werden. Die Optimierung der pneumatischen Fördereinheit und Überlegungen zur Gestaltung der Abgasstrecke liefern wertvolle Informationen für das weitere UpScale des RecoDust Prozesses.

Die wesentlichen Vorzüge des RecoDust Prozesses sind:

- keine Vorbehandlung des Einsatzmaterials notwendig,
- kompaktes Anlagendesign,
- flexibler Zinkgehalt im Einsatzmaterial,
- stoffliche Verwertung der eisenreichen RecoDust Schlacke und des zinkreichen ungewaschenen Filterstaub.

Weitere Forschungsaktivitäten werden im Rahmen des EU-Projektes ReMFra erfolgen und dienen einerseits der Reduzierung von Treibhausgasemissionen und andererseits der weiteren Optimierung des RecoDust Prozesses, um den Technologie-Reifegrad (TRL) zu erhöhen. Für die Reduktion der Treibhausgasemissionen ist die Verwendung eines Gemisches aus Erdgas und Wasserstoff in Planung, anstatt dem derzeitigem Einsatz von 100 % Erdgas. Smarte-Sensoren in der Abgasstrecke sollen Rückschluss auf die aktuelle Entzinkung liefern und gegebenenfalls die Prozessparameter beeinflussen, um bei optimaler Energieausbeute hohe Entzinkungsraten zu erreichen.

### Danksagung

The authors gratefully acknowledge the funding support of K1-MET GmbH, metallurgical competence center. The research programme of the K1-MET competence center is supported by Comet (Competence Center for Excellent Technologies), the Austrian programme for competence centers. Comet is funded by the Federal Ministry for Climate Action, Environment, Energy, Mobility, Innovation and Technology, the Federal Ministry for Labour and Economy, the Federal States of Upper Austria, Tyrol and Styria as well as the Styrian Business Promotion Agency (SFG) and the Standortagentur Tyrol. Furthermore, Upper Austrian Research GmbH continuously supports K1-MET. Beside the public funding from Comet, this research project is partially financed by the scientific partner Montanuniversitaet Leoben and the industrial partner voestalpine Stahl GmbH.

Das Projekt ReMFra wird gefördert durch die Europäische Union (Grant Agreement no. 101058362).

## 5. Quellen

- [1] Antrekowitsch, J.; Hanke, G.: Potenziale von Nebenprodukten der metallurgischen Industrie als sekundäre Rohstoffquelle, Berg Huettenmaenn Monatsh 165 (2020), 11, 572 – 577. DOI: 10.1007/s00501-020-01043-5.
- [2] Geier, B.; Raupenstrauch, H.; Reiter, W.; Pilz, K.: Verwertung zinkhaltiger Stäube der metallurgischen Industrie, Österr Wasser- und Abfallw 66 (2014), 11 – 12, 398 –402. DOI: 10.1007/s00506-014-0188-5.

- [3] Jiao, K. X.; Zhang, J. L.; Liu, Z. J.; Chen, C. L.; Liu, F.: Circulation and accumulation of harmful elements in blast furnace and their impact on the fuel consumption, *Ironmaking & Steelmaking* 44 (2017), 5, 344 – 350. DOI: 10.1080/03019233.2016.1210913.
- [4] Pilz, K.: Online-Analytik zur Prozesskontrolle in der voestalpine Stahl GmbH, *Berg Huettenmaenn Monatsh* 157 (2012), 6 – 7, 250 – 257. DOI: 10.1007/s00501-012-0015-x.
- [5] Stewart, D. J.; Barron, A. R.: Pyrometallurgical removal of zinc from basic oxygen steelmaking dust – A review of best available technology, *Resources, Conservation and Recycling* 157 (2020), 104746. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104746.
- [6] Vereš, J.; Šepelák, V.; Hredzák, S.: Chemical, mineralogical and morphological characterisation of basic oxygen furnace dust, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy* 124 (2015), 1, 1 – 8. DOI: 10.1179/1743285514Y.0000000069.
- [7] Wirtschaftsvereinigung Stahl, *Stahl und Nachhaltigkeit*, [https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/StahlNachhaltigkeit\\_2017\\_web\\_FINAL.pdf](https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/StahlNachhaltigkeit_2017_web_FINAL.pdf).
- [8] World Steel Association, *World-Steel-in-Figures-2022-1*.

## Ansprechpartner



### **Dipl.-Ing., B.Sc. Wolfgang Reiter**

K1-MET GmbH  
Doktorand  
Area 1  
Franz-Josef-Straße 18  
8700 Leoben, Österreich  
+43 384240258 24  
wolfgang.reiter@k1-met.com

### **DI Dr. mont. Johannes Rieger**

K1-MET GmbH  
Area Manager  
Area 1 und 2  
Franz-Josef-Straße 18  
8700 Leoben, Österreich  
+43 384240258 24  
johannes.rieger@k1-met.com

### **DI DI Dr. mont. Christoph Thaler**

voestalpine Stahl GmbH  
voestalpine-Straße 3  
4020 Linz, Österreich  
+43 50 30415733 16  
christoph.thaler@voestalpine.com



**DI Dr. mont. Klaus Doschek-Held**

Montanuniversität Leoben

Senior Scientist

Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik

Franz-Josef-Straße 18

8700 Leoben, Österreich

+43 384240258 31

[klaus.doschek-held@unileoben.ac.at](mailto:klaus.doschek-held@unileoben.ac.at)

# **Kohleausstieg – Stoffstromverschiebungen**

## Material Flow Shifts Due to the Shutdown of Coal-Fired Power Plants and Resulting Challenges

Andreas Hugot and Kilian von Bartenwerffer

As part of the enactment of the Coal-Fired Power Generation Phase-Out Act in 2020, the German Bundestag and Bundesrat pledged to phase out coal-fired power generation in Germany by 2038 at the latest. The reason for the decision to reduce the generation of electrical energy through the use of coal is to reduce the resulting emissions. Despite a steady reduction, the power industry continues to emit the highest proportion of carbon dioxide into the environment compared with the other industrial sectors.

However, the phased phase-out of coal-fired power generation also means that by-products from coal-fired power generation will no longer be available. Both hard coal and lignite-fired power plants produce fly ash and gypsum, among other things, when coal is burned. These are used in different areas, have a positive ecological impact and can conserve natural resources.

Fly ash from coal-fired power plants is used as a clinker substitute in cement or as a concrete additive with cement substitute in concrete. This improves the ecological footprint of the corresponding cement or concrete. In addition, fly ash improves the functional characteristics of the resulting product: the positive properties of fly ash are evident both in fresh concrete and in hardened concrete. Analogous to the fly ash quantities, a declining quantity development can also be observed for the so-called FGD gypsum, another by-product from coal-fired power generation.

The biggest challenge posed by the shutdown of coal-fired power plants is the sustainable change in the energy market. As a result of this development, there are material flow shifts.

If we look at coal-fired power generation worldwide, we see that it is not declining, but that coal-fired power generation is continuing to expand. As a result, the availability of the abovementioned by-products is not declining from a global perspective, but will continue to be available in large quantities.

The challenge for companies such as EP Power Minerals, which has been a partner to the concrete, cement and gypsum industries, among others, for many years, is to feed these important secondary raw materials into the reuse cycle. In addition, measures are being promoted to recover fly ash or gypsum that has already been deposited. As a further component, alternative materials such as natural pozzolans or imported additives are being investigated. Their extraction does not represent a negative intervention in ecosystems – their use simultaneously conserves scarce natural resources in order to secure the livelihoods of existing and future generations. Using the secondary materials mentioned above pays off one of the main goals of the Paris Climate Agreement, namely to reduce emissions.

## Stoffstromverschiebungen durch die Abschaltung der Kohlekraftwerke sowie resultierende Herausforderungen

Andreas Hugot und Kilian von Bartenwerffer

1.	Auswirkungen der Abschaltung der Kohlekraftwerke.....	248
2.	(Zwischen-)Resümee – Status Quo .....	252
3.	Zukünftige Entwicklung – Ausblick.....	253
4.	Quellen.....	254

Im Rahmen der Verabschiedung des Kohleverstromungsbeendigungsgesetzes im Jahr 2020, haben Bundestag und Bundesrat den Ausstieg aus der Kohleverstromung bis spätestens 2038 zugesichert. [5] Bis 2038 werden die verbliebenen Stein- und Braunkohlekraftwerke vom deutschen Stromnetz genommen. Dabei ist folgender schrittweiser Ausstieg vorgesehen:

1. im Kalenderjahr 2022: Reduzierung auf 15 Gigawatt Steinkohle und 15 Gigawatt Braunkohle Nennleistung,
2. im Kalenderjahr 2030: Reduzierung auf 8 Gigawatt Steinkohle und 9 Gigawatt Braunkohle Nennleistung,
3. spätestens bis zum Ablauf des Kalenderjahres 2038 auf Null Gigawatt Steinkohle und Null Gigawatt Braunkohle

Grund für die Entscheidung zur Reduktion der Erzeugung elektrischer Energie durch den Einsatz von Kohle, ist es eine Senkung der daraus resultierenden Emissionen zu erzielen. Die Energiewirtschaft ist im Vergleich der unterschiedlichen Sektoren jene, die trotz einer stetigen Reduzierung, weiterhin den höchsten Anteil an Kohlendioxid in die Umwelt emittiert. [10]

Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) ist ein Treibhausgas, welches in der Atmosphäre dafür sorgt, dass sich die Erde erwärmt. Die von der Sonnenstrahlung produzierte Wärmestrahlung verbleibt insbesondere durch das CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre. [11] Dieser Prozess wird auch als Treibhauseffekt bezeichnet. [6] Zwar wird CO<sub>2</sub> z.B. in Pflanzen und Bäumen gespeichert und mithilfe von Wasser und Licht in kohlenstoffhaltigen Zucker und Sauerstoff verwandelt, jedoch produzieren Mensch und Tier mehr als die Natur verarbeiten kann. [9] Dies führte dazu, dass die vergangenen sieben Jahre, die statistisch wärmsten Jahre seit Beginn der Wetteraufzeichnungen waren und Umweltveränderungen wie das Schmelzen der Gletscher, steigende Meeresspiegel und das Schwinden von Artenvielfalt verursachten. Langfristig wird durch den Klimawandel die Existenzgrundlage

der Menschen weltweit bedroht. [3] Aufgrund dieser Bedrohung konnte auf der Weltklimakonferenz in Paris am 12. Dezember 2015 ein Übereinkommen von 195 Staaten getroffen werden, in der sich alle verpflichtet haben, den Klimawandel einzudämmen und die Weltwirtschaft klimafreundlicher zu gestalten. [4] Der Herausforderung, CO<sub>2</sub> einzusparen, hat sich somit nicht allein Deutschland verschrieben, sondern die gesamte Welt. Deutschland und viele weitere Länder Europas begegnen dieser Herausforderung u.a. mit der Maßnahme die Energieerzeugung aus Kohlekraftwerken mittelfristig wie oben dargestellt zu beenden.

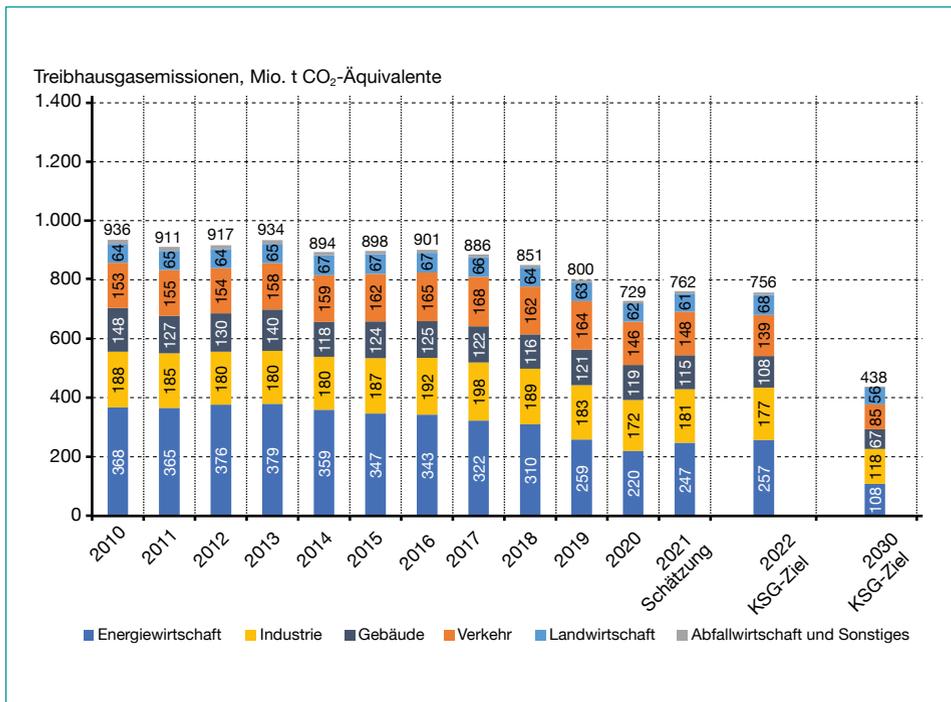


Bild 1: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland in der Abgrenzung der Sektoren

Quelle: Umweltbundesamt (Hrsg.): Treibhausgas-Emissionen nach Kategorien. In: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#treibhausgasemissionen-nach-kategorien>. [Zugriff am 05.04.2023].

## 1. Auswirkungen der Abschaltung der Kohlekraftwerke

Der phasenweise Ausstieg aus der Kohleverstromung hat allerdings auch zur Folge, dass keine Nebenprodukte aus der Kohleverstromung mehr zur Verfügung stehen werden. Sowohl in Stein- als auch Braunkohlenkraftwerken entsteht, bei der Verbrennung von Kohle, u. a. Flugasche und Gips, die in unterschiedlichen Bereichen zum Einsatz kommen und einen positiven ökologischen Einfluss haben und somit natürliche Ressourcen schonen können.

Flugasche wird dadurch gewonnen, dass die nicht brennbaren, mineralischen Bestandteile der Kohle im Elektrofilter aus dem entstehenden Rauchgas gefiltert und gesammelt werden. Braunkohleflugaschen werden fast ausschließlich zur Verfüllung von Tagebauflächen verwendet. Der hohe Sulfat- und Freikalk-Gehalt sowie die inhomogenen Qualitäten der Braunkohleflugaschen verhindern den Einsatz als Zuschlagstoff im Zement bzw. Beton. Die Flugasche aus Steinkohlekraftwerken hingegen wird als Klinkerersatz im Zement bzw. als Betonzusatzstoff mit Zementersatz im Beton eingesetzt. Die Nutzung führt zu einer Verbesserung des ökologischen Fußabdrucks des entsprechenden Zementes bzw. Betons [8] und ebenso hat die Flugasche einen positiven Einfluss auf die Eigenschaften des Produkts. Die positiven Eigenschaften der Flugasche zeigen sich sowohl im Frischbeton als auch im Festbeton. Im Frischbeton wird eine Verbesserung der Sieblinie und ein besseres Fließvermögen erreicht, im Festbeton wiederum bewirkt die Flugasche, aufgrund seiner puzzolanischen Eigenschaft, dass ein dichteres Gefüge entsteht, was u.a. zu einer besseren Nachhärtung und höheren End- und Druckfestigkeit des Betons führt. [12]

Im Zement kommt die Flugasche aus Steinkohlekraftwerken als Substitut von Klinker zum Einsatz. Der Herstellungsprozess von Klinker erfolgt in mehreren Produktionsschritten. Zunächst wird Kalkstein aus Steinbrüchen abgebaut. Dieser wird im Brecher zu Mergel zerkleinert und gemahlen. Gemischt mit Ton, Sand und Eisenerz wird das sogenannte Rohmehl im Drehrohfen bei bis zu 1.450 °C gebrannt, wodurch der Klinker entsteht. Der Brennprozess bewirkt, chemisch betrachtet, dass eine *Entsäuerung* des Kalks vollzogen wird. Aus dem Calciumcarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) entsteht Calciumoxid ( $\text{CaO}$ ) und Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ).

Der Anfall von Kohlenstoffdioxid ist nicht nur aus umwelttechnischer Perspektive relevant. Im Zuge des internationalen Klimaschutzabkommens von Kyoto im Jahre 2005 wurde der europäische Emissionshandel etabliert. Eine Obergrenze definiert, wie viele Treibhausgas-Emissionen von den emissionshandelspflichtigen Anlagen insgesamt ausgestoßen werden dürfen. Die Mitgliedstaaten (alle 27 EU-Staaten, Norwegen, Island, Liechtenstein) geben eine entsprechende Menge an Emissionsberechtigungen an die Anlagen aus – teilweise kostenlos, teilweise über Versteigerungen. Eine Berechtigung erlaubt den Ausstoß einer Tonne Kohlendioxid-Äquivalent ( $\text{CO}_2$ -Äq). Die Emissionsberechtigungen können auf dem Markt frei gehandelt werden. Durch diese Systematik bildet sich ein Preis für den Ausstoß von Treibhausgasen und setzt Anreize bei den beteiligten Unternehmen, ihre Treibhausgas-Emissionen zu reduzieren. [13]

Bild 2 zeigt, dass in den kommenden Jahren eine allgemeine Reduzierung der Emissionsberechtigungen zu erwarten ist – die Folge, weitere Preissteigerungen werden kommen.

Um Zement und damit Beton herstellen zu können, ist die Herstellung von Klinker notwendig, was eine Freisetzung von  $\text{CO}_2$  unumgänglich macht. Ein Teil des Klinkers lässt sich jedoch u.a. durch Flugasche substituieren. Aus den o. g. Gründen wird sowohl aus ökologischer als auch ökonomischer Sicht deutlich, dass die Substitution des Klinkers mit Ersatzstoffen sinnvoll ist. Somit überrascht es nicht, dass bereits heute eine nahezu 100 %ige Vermarktungsquote der Flugasche erreicht wird, insbesondere, da die Gesamtmenge rückläufig ist, wie Bild 3 zeigt.

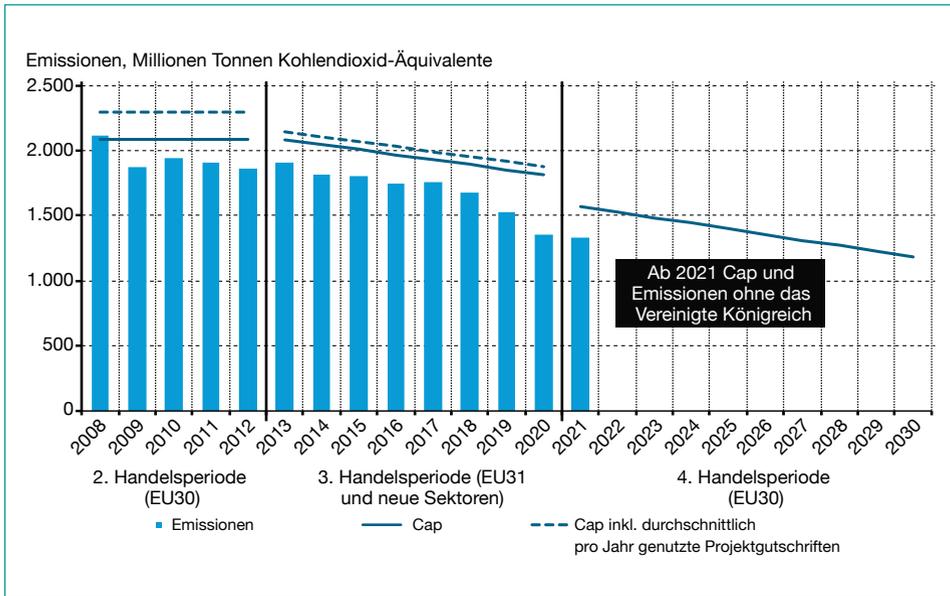


Bild 2: Emissionen im Europäischen Emissionshandel und Obergrenze gesamt

Quelle: Umweltbundesamt (Hrsg.): Der Europäische Emissionshandel. Teilnehmer, Prinzip und Umsetzung des Europäischen Emissionshandels. In: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/der-europaeischeemissionshandel#teilnehmer-prinzip-umsetzung-des-europaeischen-emissionshandels> [Zugriff am 05.04.2023]

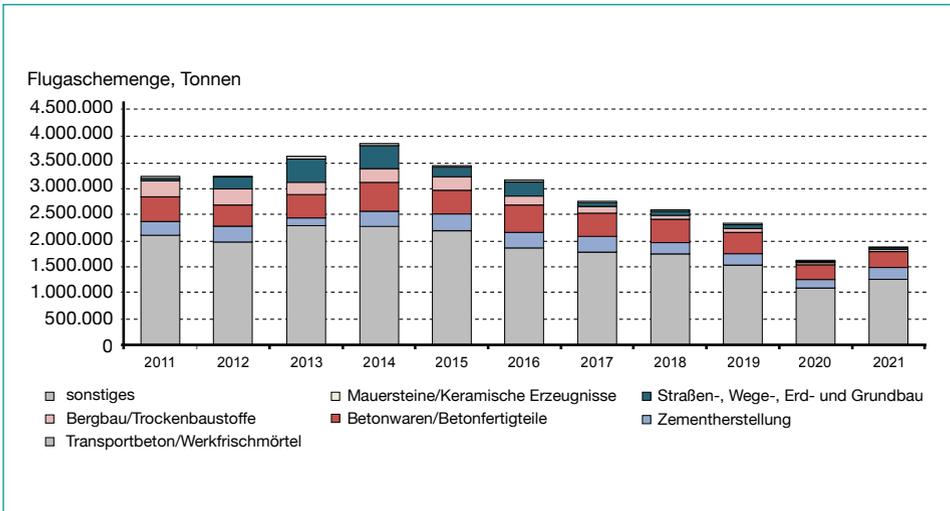


Bild 3: Vermarktung von Flugasche aus Kohlekraftwerken in Deutschland zwischen 2011 und 2021 nach Sektoren

Quelle: vgb energy e. V. (Hrsg.): Statistik zur Vermarktung von Baustoffen aus Kohlekraftwerken (KNP) in Deutschland 2011 – 2021

Durch den kontinuierlichen Rückgang von Flugasche aus Steinkohlekraftwerken in Deutschland und weiten Teilen Europas ist davon auszugehen, dass die Nachfrage das Angebot deutlich übersteigen wird.

Analog den Flugaschemengen ist ebenso beim REA-Gips, einem weiteren Nebenprodukt aus den Kohleverstromung, die rückläufige Mengenentwicklung zu verzeichnen:

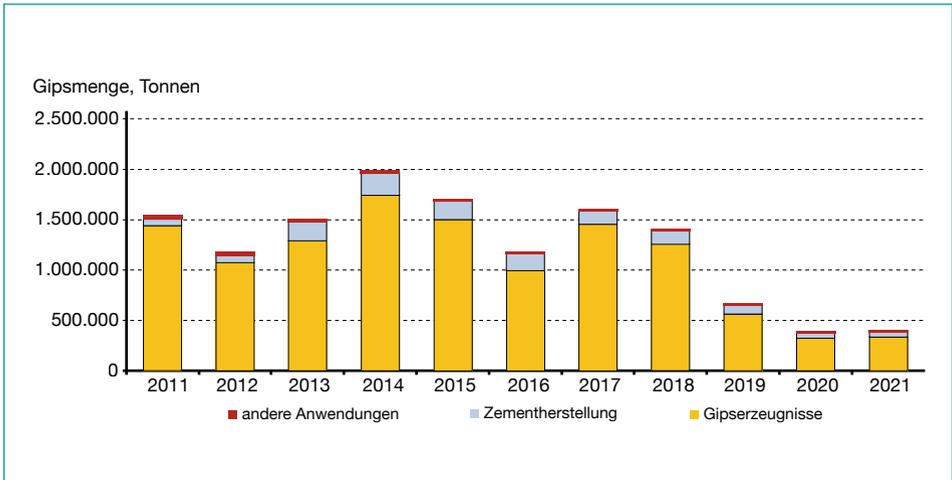


Bild 4: Vermarktung von Gips aus Kohlekraftwerken in Deutschland zwischen 2011 und 2021 nach Sektoren

Quelle: vgb energy e. V. (Hrsg.): Statistik zur Vermarktung von Baustoffen aus Kohlekraftwerken (KNP) in Deutschland 2011 – 2021

Das Akronym REA – Rauchgas-Entschwefelungs-Anlage – beschreibt den Produktionsprozess des Gipses innerhalb des Kraftwerks. In der REA wird das Rauchgas in einen Absorber geleitet und dort mittels einer wässrigen Waschsuspension, die Kalkstein enthält, besprüht. Das Schwefeldioxid des Abgases reagiert mit dem Kalk und durch Zugabe von Sauerstoff entsteht durch Oxidation letztlich Calciumsulfat, also Gips. [1] Der so erzeugte Gips ist qualitativ vergleichbar mit Gips, der aus natürlichem Gipsstein oder Anhydrit gewonnen wird, wobei der REA-Gips, im Vergleich zum Naturgips, eine erhöhte Menge an Schwermetallen – insbesondere Quecksilber – aufweisen kann. Die in Deutschland wird die verbleibende Menge dennoch gänzlich verwendet und kommt fast ausschließlich für Gipsprodukte oder als Zuschlagstoff im Zement zur Anwendung (Bild 4). [14]

Durch den Wegfall von REA-Gips aus der Entschwefelung von Kohlekraftwerken ist mit einer Versorgungslücke von bis zu 7 Mio. Tonnen pro Jahr zu rechnen. Gips-Recyclingkonzepte, welche bereits seit über zwanzig Jahren entwickelt werden, können nach aktuellem Stand etwa 1 Mio. Tonnen dieser Lücke schließen. Alternative Rohstoffe sind aktuell nicht entwickelt und führen ebenso zu verfahrenstechnischen Umbauten im Herstellungsprozess. Aus wirtschaftlicher Perspektive ist somit davon auszugehen, dass der primäre Rohstoff Naturgips, die Versorgungslücke auffangen wird.

Vor dem Hintergrund einer steigenden Weltbevölkerung (Bild 5) bedarf es auf dem Weg in eine nachhaltige Zukunft, den Ressourceneinsatz vom Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum zu entkoppeln. Erreichen lässt sich dieses Ziel nur durch eine Verringerung der Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen, z.B. durch den Ausbau der Kreislaufwirtschaft und eine höhere Ressourceneffizienz. [19]

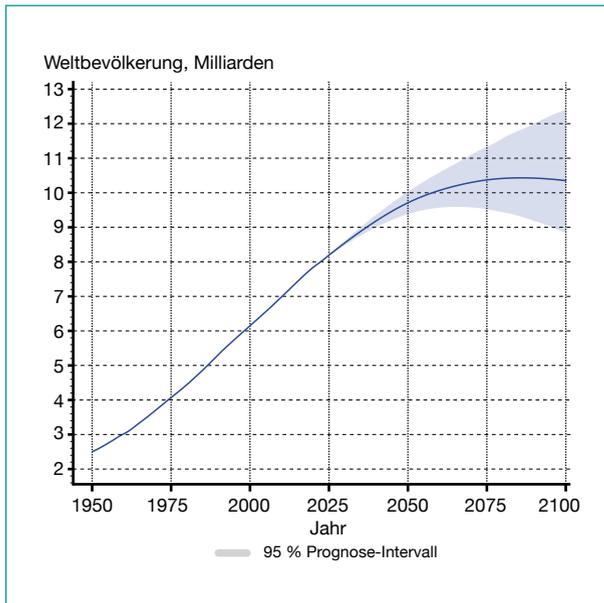


Bild 5:

Geschätzte Entwicklung der gesamten Weltbevölkerung 1950 bis 2100

Quelle: United Nations / Vereinte Nationen (Hrsg.): World Population Prospects 2022. In: <https://population.un.org/wpp/Graphs/DemographicProfiles/Line/900> [Zugriff am 05.04.2023]

## 2. (Zwischen-)Resümee – Status Quo

Die mittelfristige Stilllegung der Kohlekraftwerke in Deutschland und weiteren Ländern Europas führt dazu, dass sekundäre Rohstoffe verloren gehen, was weitreichende Auswirkungen für bestimmte Industrien und die Umwelt hat. Die Sekundärrohstoffwirtschaft ist ein wichtiger Baustein zur Reduzierung des Primärmaterialeinsatzes in Deutschland [15] und leistet einen signifikanten Beitrag zur Reduzierung und Schonung von primären Rohstoffen. Des Weiteren bewirkt die Stilllegung der Kohlekraftwerke eine teilweise Verlagerung des Anfalls von CO<sub>2</sub> Emissionen in andere Industrien, wodurch die ursprüngliche Zielsetzung konterkariert wird. Der European Green Deal der Europäischen Union hat das Ziel die Nettoemissionen von Treibhausgasen in der EU bis zum Jahr 2050 auf null zu reduzieren. Bis 2030 soll als Zwischenziel eine Reduktion der Treibhausgasemissionen auf 50 bis 55 Prozent gegenüber dem Jahr 1990 erreicht werden. Der Druck auf die energieintensive Industrie, Emissionen einzusparen, wächst somit ohnehin kontinuierlich und wird durch den Wegfall von Substituten verschärft.

Neben dem ökologischen Aspekt der Nutzung der Nebenerzeugnisse aus der Kohleverstromung, ist ebenso die wirtschaftliche Komponente zu betrachten.

Steigende Energiekosten und zu erwartende steigende Kosten zur Emissionsberechtigung führen zu einer erweiterten Nachfrage an Substitutionsprodukten, da diese einen teils signifikanten Kostenvorteil mit sich bringen.

Es bleibt somit festzuhalten, dass in Deutschland und weiten Teilen Europas, eine hohe und in Zukunft steigende Nachfrage an Nebenprodukten aus der Kohleverstromung auf eine stetig geringere Verfügbarkeit trifft. Die Auswirkung der nachhaltigen Veränderung auf dem Energiemarkt, beschreibt die größte Herausforderung, die durch die Abschaltung der Kohlekraftwerke entsteht. Als Resultat dieser Entwicklung ergeben sich Stoffstromverschiebungen, die im nachfolgenden dargestellt werden.

### 3. Zukünftige Entwicklung – Ausblick

Bei Betrachtung der Kohleverstromung weltweit, zeigt sich, dass Kohleverstromung nicht rückläufig ist, sondern es vielmehr zu einem Ausbau der Kohleverstromung kommt. [7] Daraus resultiert, dass die o. g. Nebenprodukte bei globaler Betrachtung nicht rückläufig sind, sondern vielmehr auch diese weiterhin in großen Mengen verfügbar sein werden.

Die Herausforderung für Unternehmen wie EP Power Minerals, die seit vielen Jahren Partner u. a. der Beton-, Zement- und Gipsindustrie sind, ist es, diese wichtigen Sekundärrohstoffe dem Verwertungskreislauf zuzuführen. Aus unterschiedlichsten Gründen werden, Stand heute, und auch in Zukunft die Mengen nicht vollständig in den jeweiligen heimischen Märkten verwertet werden. Der Import der global verfügbaren Mengen ist eine Säule der Zement- und Betonindustrie zur Dekarbonisierung.

Neben dem Import von weltweit verfügbaren Nebenerzeugnissen der Kohleverstromung, werden zusätzlich Maßnahmen forciert, die zur kreislaufgerechten Rückgewinnung von bereits abgelagerten Flugaschen oder Gipsen dienen. Dieser strategische Ansatz des Stoffstrommanagements, der vom Aufsuchen (Prospektion), der Erkundung (Exploration), der Erschließung und der Nutzung von Lagerstätten bis hin zur Aufbereitung der gewonnenen Sekundärrohstoffe geht, wird auch als Urban Mining definiert. [16] Die wichtigsten Fragen im Thema Urban Mining sind, wo befindet sich die Lagerstätte aus geographischer Sicht, welche Materialien sind in der jeweiligen Mine gelagert, welche Aufbereitungsschritte sind notwendig und wie kann die Mine erschlossen werden. Daraus abgeleitet lässt sich die technische und wirtschaftliche Nutzung der einzelnen Vorkommen ermitteln.

Als weiterer Baustein werden Alternativstoffe, wie natürliche Puzzolane oder importierte Zumahlstoffe untersucht, deren Gewinnung keinen negativen Eingriff in Ökosysteme darstellt - durch deren Nutzung aber eine Schonung knapper natürlicher Ressourcen erwirkt wird, um so die Lebensgrundlagen bestehender und zukünftiger Generationen zu sichern. In allen Fällen zeigt sich, dass der Transportsektor im Rahmen der Stoffstromverschiebungen, eine zentrale Rolle in der Versorgung der Industrien und in der Erreichung der Ziele des Pariser Klimaabkommens einnimmt. [17] Die Nutzung der genannten Sekundärstoffe zahlt jedoch auf eines der Hauptziele des Pariser Klimaabkommens ein, nämlich die Senkung der Emissionen. [4]

## 4. Quellen

- [1] BaustoffWissen (Hrsg.): Was ist REA-Gips? In: <https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/grundstoffe-des-bauens/rea-gips-definitionrauchgas-entschwefelungs-anlage-kohlekraftwerk-baustoffe/> [Zugriff am 05.04.2023].
- [2] Bundesministerium der Justiz / Bundesamt für Justiz (Hrsg.): Gesetz zur Reduzierung und zur Beendigung der Kohleverstromung (Kohleverstromungsbeendigungsgesetz - KVBG) - § 2, Abs. (1), (2) und (3). In: <https://www.gesetze-im-internet.de/kvbg/BJNR181810020.html#BJNR181810020BJNG000100000> [Zugriff am 05.04.2023].
- [3] Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Hrsg.): Folgen des Klimawandels In: <https://www.bmz.de/de/themen/klimawandel-und-entwicklung/folgen-des-klimawandels-124774> [Zugriff am 05.04.2023].
- [4] Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Hrsg.): Klimaabkommen von Paris. In: <https://www.bmz.de/de/service/lexikon/klimaabkommen-von-paris-14602> [Zugriff am 05.04.2023].
- [5] Bundesnetzagentur (Hrsg.): Kohleausstieg. In: <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Kohleausstieg/start.html> [Zugriff am 05.04.2023].
- [6] Deutscher Wetterdienst (Hrsg.): Klimawandel – ein Überblick. In: [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimawandel\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimawandel_node.html) [Zugriff am 05.04.2023].
- [7] Energie & Management (Hrsg.): Kohleverstromung weltweit auf dem Vormarsch. In: <https://www.energieund-management.de/nachrichten/handel/emission/detail/kohleverstromung-weltweit-auf-dem-vormarsch-165375> [Zugriff am 05.04.2023].
- [8] EP Power Minerals: Kraftwerksnebenprodukte. In: <https://www.eppowerminerals.com/de/produkte/kraftwerksnebenprodukte> [Zugriff am 05.04.2023].
- [9] Geolino: Wie Kohlendioxid das Klima verändert. In: <https://www.geo.de/geolino/natur-und-umwelt/15385-rtkl-klimawandel-wie-kohlendioxid-das-klimaveraendert#:~:text=ja%2C%20denn%20schon%20seit%20Urzeiten,in%20kohlenstoffhaltigen%20Zucker%20und%20Sauerstoff.> [Zugriff am 05.04.2023].
- [10] Umweltbundesamt (Hrsg.): Herkunft und Minderung von Kohlendioxid-Emissionen. In: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/kohlendioxidemissionen#herkunft-und-minderung-von-kohlendioxid-emissionen> [Zugriff am 05.04.2023].
- [11] Umweltbundesamt (Hrsg.): Treibhausgas-Emissionen nach Kategorien. In: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#treibhausgasemissionen-nach-kategorien.> [Zugriff am 05.04.2023].
- [12] Umweltbundesamt (Hrsg.): Kraftwerksnebenprodukte - Steinkohleflugaschen und REA-Gips. Hinweise zum Recycling. In: <https://www.umweltbundesamt.de/kraftwerksnebenprodukte-steinkohleflugaschen-rea#hinweisezum-recycling> [Zugriff am 05.04.2023].
- [13] Umweltbundesamt (Hrsg.): Der Europäische Emissionshandel. Teilnehmer, Prinzip und Umsetzung des Europäischen Emissionshandels. In: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/der-europaeischeemissionshandel#teilnehmer-prinzip-und-umsetzung-des-europaischen-emissionshandels> [Zugriff am 05.04.2023].
- [14] Umweltbundesamt (Hrsg.): Kraftwerksnebenprodukte - Steinkohleflugaschen und REA-Gips. Verwertung und Produktion in Deutschland. In: <https://www.umweltbundesamt.de/kraftwerksnebenproduktesteinkohleflugaschen-rea#hinweise-zum-recycling> [Zugriff am 05.04.2023].
- [15] Umweltbundesamt (Hrsg.): Stoffstromorientierte Ermittlung des Beitrags der Sekundärrohstoffwirtschaft zur Schonung von Primärrohstoffen und Steigerung der Ressourcenproduktivität. Abschlussbericht. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-03-27\\_texte\\_34-2019\\_sekundaerrohstoffwirtschaft.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-03-27_texte_34-2019_sekundaerrohstoffwirtschaft.pdf) [Zugriff am 05.04.2023].
- [16] Umweltbundesamt (Hrsg.): Urban Mining. In: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfallressourcen/abfallwirtschaft/urban-mining#was-ist-urban-mining-> [Zugriff am 05.04.2023].
- [17] United Nations / Vereinte Nationen (Hrsg.): Sustainable transport. In: <https://sdgs.un.org/topics/sustainable-transport> [Zugriff am 05.04.2023].

- [18] United Nations / Vereinte Nationen (Hrsg.): World Population Prospects 2022. In: <https://population.un.org/wpp/Graphs/DemographicProfiles/Line/900> [Zugriff am 05.04.2023].
- [19] VDZ (Hrsg.): Ressourcen der Zukunft für Zement und Beton – Potenziale und Handlungsstrategien. In: [https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/VDZStudie\\_Ressourcenroadmap\\_2022.pdf](https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/VDZStudie_Ressourcenroadmap_2022.pdf) [Zugriff am 05.04.2023].
- [20] vge energy e. V. (Hrsg.): Statistik zur Vermarktung von Baustoffen aus Kohlekraftwerken (KNP) in Deutschland 2011 – 2021.

### Ansprechpartner



#### **Dipl.-Ing. Andreas Hugot**

EP Power Minerals GmbH  
Sprecher der Geschäftsführung  
Abteilung Kraftwerksnebenprodukte  
Duisburger Straße 170  
46535 Dinslaken, Deutschland  
+49 173 5192453  
a.hugot@ep-pm.com

#### **Kilian von Bartenwerffer**

EP Power Minerals GmbH  
Vertriebsleiter Deutschland  
Abteilung Kraftwerksnebenprodukte  
Duisburger Straße 170  
46535 Dinslaken, Deutschland  
+49 151 20985702  
k.vonbartenwerffer@ep-pm.com

Besuchen Sie unsere Website  
[www.schlackenkantor.de](http://www.schlackenkantor.de)



*emvau-schlacke - der Baustoff  
für starke Beanspruchung*

**emvau**   
**Ein Baustoff aus MV-Schlacke**

*... ein Baustoff mit Zukunft*

- UMWELTBEWUSST
- GÜTEÜBERWACHTE QUALITÄT
- HOHE TRAGFÄHIGKEIT
- WITTERUNGSUNABHÄNGIG EINBAUBAR
- PREISWERT

**Hanseatisches Schlackenkantor GmbH**

Hamburg 040-25407790 • [info@schlackenkantor.de](mailto:info@schlackenkantor.de) • [www.schlackenkantor.de](http://www.schlackenkantor.de)

# **Substitutionspotentiale in der Zementindustrie**

## Mineral Wastes as CO<sub>2</sub>-Neutral Raw Material in Clinker Production

Mirjam Wolfers, Urs Häseli, Paula Dörfler, Gisela Weibel and Urs Eggenberger

Through recycling of mineral wastes in the sense of a circular economy, valuable primary resources and scarce landfill space can be conserved, which results in positive effects on the environment. Recycling of mineral wastes may also reduce the carbon footprint of construction materials. The main contribution to the carbon footprint of building materials such as concrete is caused by the decarbonization of limestone in clinker production. The substitution of limestone with geogenic CO<sub>2</sub>, thus offers a great CO<sub>2</sub> savings potential: With each ton of calciumoxide substituted by CO<sub>2</sub>-free or CO<sub>2</sub>-neutral raw materials, 785 kg of CO<sub>2</sub> can be saved.

However, the amount of limestone that can be substituted is limited by the maximum SiO<sub>2</sub> input of the alternative raw material to meet the lime saturation factor of the raw meal blend. Therefore, CaO-rich mineral wastes such as wood- and paper ash, as well as construction demolition wastes with high cement paste content, offer the greatest potential to substitute limestone. Wood- and paper ash are thereby assumed to be CO<sub>2</sub>-free as they originate from a thermal process. However, both wood- and paper ash are enormously reactive and can hydrate within a very short time and carbonate via CO<sub>2</sub>-uptake from the air. They should therefore be considered as CO<sub>2</sub>-neutral raw materials. CO<sub>2</sub>-neutral raw materials are materials which are largely CO<sub>2</sub>-free at initial stage, but incorporate CO<sub>2</sub> from the air within short timescales during their use, storage and processing into an alternative raw material. The short-term bound CO<sub>2</sub>, which is emitted during clinker production, does not contribute to the greenhouse effect and should be regarded as climateneutral.

As of today, only the use of CO<sub>2</sub>-free raw materials can be accounted for in the Swiss emissions trading system, but not the use of CO<sub>2</sub>-neutral raw materials. The use of CO<sub>2</sub>-neutral raw materials therefore does not result in a CO<sub>2</sub> reduction in the current monitoring system, or only to a limited extent. Ensuring the accountability of climateneutral CO<sub>2</sub> in clinker production on the raw material side would create additional incentives to use secondary CaO-sources in clinker production and could represent a decisive turning point in the utilization of mineral waste. The achieved CO<sub>2</sub> reduction can attribute an additional financial value to the mineral waste, which enables further investments in technologies for quality optimization.

## Mineralische Abfälle als CO<sub>2</sub>-neutrale Rohmaterialien in der Klinkerproduktion

Mirjam Wolfers, Urs Häseli, Paula Dörfler, Gisela Weibel und Urs Eggenberger

1.	Situation mineralische Abfälle in der Schweiz .....	261
2.	Einsatz von mineralischen Abfällen als Maßnahme zur CO <sub>2</sub> -Reduktion in der Zementproduktion .....	262
3.	CO <sub>2</sub> -neutrale Rohmaterialien und ihre Anrechenbarkeit .....	265
4.	Nächste Schritte und Ausblick .....	268
5.	Quellen.....	268

Seit Mitte der 1980er Jahre steigen die Abfallmengen in der Schweiz kontinuierlich, in den letzten Jahren fielen in der Schweiz jährlich etwa 80 bis 90 Millionen Tonnen Abfall an [3]. Damit hat die Schweiz weltweit eines der größten Abfallvorkommen pro Kopf – was mit erheblichem Verlust an wertvollen Rohstoffen verbunden ist. Als kleines Land mit beschränktem Deponieraum setzt die Schweiz bei der Abfallentsorgung grundsätzlich auf die stoffliche Verwertung (Recycling) sowie auf die energetische Verwertung (z.B. in Kehrlichtverwertungsanlagen). Als rohstoffarmes Land fördert die Schweiz seit Mitte der 1980er Jahre die Perspektive einer Kreislaufwirtschaft [5]. Schon damals forderte man, dass die Abfallwirtschaft als Teil der Volkswirtschaft begriffen wird und es neue Denk- und Handlungsanstöße in Richtung eines umweltverträglichen Gebrauchs von Gütern geben sollte. Mit der allgemeinen Verwertungspflicht nach dem Stand der Technik fand dieser Ansatz im Jahr 2015 dann den Weg in die Gesetzgebung [26].

In Bezug auf mineralische Massenrohstoffe wirkt sich eine Verwertung im Sinne einer Kreislaufwirtschaft mehrfach positiv auf die Umwelt aus. So können in erster Linie wertvolle Primärressourcen sowie auch immer knapper werdendes Deponievolumen geschont werden, und zudem wirkt sich der Einsatz von Sekundärrohstoffen oftmals positiv auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz aus. Abfälle sollen möglichst vermieden, oder aber zumindest wiederverwendet oder nachhaltig verwertet werden. Ein Recycling um jeden Preis ist jedoch nicht zielführend und die ökologischen Maßnahmen müssen wirtschaftlich tragbar sein. Um primäre Rohstoffreserven zu schonen und weitere Kreisläufe zu schließen, muss das Silodenken aufgebrochen werden. Es braucht neue Ansätze und Verfahren, um in größerem Umfang und in neuen Gebieten sekundäre Rohstoffe einzusetzen.

Die Verwertung von mineralischen Massenrohstoffen ist mengenmäßig das wirksamste Mittel, um die angestrebte Kreislaufwirtschaft umzusetzen. So verursacht das Wohnen inkl. Bauwesen, Energie- und Wasserverbrauch sowie Abfall- und

Abwasserentsorgung 25 Prozent der Umweltauswirkungen der Schweiz [19]. Für eine nachhaltige Rohstoffwirtschaft ist unter anderem der Einsatz klimafreundlicherer Baumaterialien und Sekundärrohstoffe gefragt. Der Hauptbeitrag an die CO<sub>2</sub>-Bilanz von Baustoffen wie Beton wird durch die Dekarbonisierung von Kalkstein in der Klinkerproduktion verursacht [14]. Um Baustoffe mit einem besseren ökologischen Fußabdruck zu erhalten, müssen folglich die CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Klinkerproduktion gesenkt werden. Eine große Wirkung auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz hat der Einsatz von CO<sub>2</sub>-freien oder CO<sub>2</sub>-neutralen Rohmaterialien, die als Substitution für den Kalkstein eingesetzt werden können. Das Potential für CO<sub>2</sub>-Einsparungen durch die Substitution von Kalkstein mit geogenem CO<sub>2</sub> ist aber noch weitgehend unausgeschöpft, da die CO<sub>2</sub>-freien Materialien im Aufbereitungsprozess teilkarbonatisieren. Kurzfristig gebundenes, klimaneutrales CO<sub>2</sub> kann heute rohstoffseitig in der Klinkerproduktion noch nicht angerechnet werden. Die Anrechenbarkeit wäre aber ein großer Treiber für die Verwertung von CO<sub>2</sub>-neutralen Rohmaterialien. Die laufende Studie untersucht daher das Potential der mineralischen Abfälle als CO<sub>2</sub>-neutrales Rohmaterial sowie die Umsetzbarkeit der Anrechenbarkeit von klimaneutralem CO<sub>2</sub> auf der Rohmaterialseite der Klinkerproduktion.

Tabelle 1: Übersicht über die Stoffmengen an mineralischen Abfällen in der Schweiz (nicht abschließend) und deren Verwertungssituation

Mineralischer Abfall	Jährlicher Anfall	Situation Verwertung
	t/a	
Aushub	58 Millionen [24]	Geschätzte Verwertungsquote etwa 15 %, hauptsächlich zur Rekultivierung von Kiesgruben und anderen Abbaustellen [24]
Betonabbruch	5 Millionen [15]	Aufbereitung zu RC-Granulat und Verwertung von etwa 85 % im RC-Beton [19]
Mischabbruch	2,4 Millionen [21]	Aufbereitung zu RC-Granulat und Verwertung im (Mager) RC-Beton oder z.T. im Zementwerk; Verwertungsquoten zwischen 50-85 % [21] (regional schwankend)
Ausbauasphalt	2,5 Millionen [22]	Aufbereitung zu Asphaltgranulat und Verwertung in RC-Asphalt (etwa 60 %) [22]
Kieswaschschlämme	2,5 Millionen [6]	Hauptsächlich zur Wiederauffüllung von Kiesgruben (60 %) oder Deponierung (30 %), obwohl großes Potential für landwirtschaftliche Anwendungen (7 %) sowie in diversen Baustoffproduktionen [6]
KVA-Schlacken	800.000 [9]	Rückgewinnung der Metalle, Deponierung des mineralischen Anteils (85 % [20]); erste laufende Versuche zur Verwertung von aufbereiteten Fraktionen
Gips	350.000 [23]	Aufbereitung zu RC-Gips nur etwa 1 %, etwa 15 % bleibt als Mischabbruch im Kreislauf, der Rest wird deponiert [23]
Stahlwerkschlacken	170.000 [28]	Noch keine etablierten Verwertungswege [4], Möglichkeit Verwertung Elektroofenschlacke als Gesteinskörnung, Koffermaterial oder in Bodenplatten
Holzaschen	75.000 [12]	Zunehmend Verwertung von Rost- und Bettaschen im Zementwerk, geschätzt etwa 20 %
Papieraschen	30.000 (geschätzt)	Fast vollständige Verwertung der Papierflugaschen als Rohmaterialersatz im Zementwerk

## 1. Situation mineralische Abfälle in der Schweiz

Durch die hohe Bautätigkeit fallen in der Schweiz jährlich etwa 58 Millionen t Aushub und 17 Millionen t Rückbaumaterial an [24]. Von den Rückbaumaterialien bilden im Hochbau hauptsächlich Beton und Mauerwerk den Hauptanteil, während im Tiefbau nebst Ausbausphalt etwa 60 Prozent Kies und Sand anfallen [16]. Zusätzlich fallen jährlich beträchtliche Mengen an Kieswaschschlämmen und Gips an (Tabelle 1), welche heute kaum verwertet werden. Auch die Rückstände aus thermischen Prozessen wie die Verbrennungsrückstände und Stahlwerksschlacken stellen gerade im Hinblick auf eine Verwertung in der Zementindustrie interessante Sekundärrohstoffe dar, sofern die Schwermetallgehalte in zu verwertenden Fraktionen den Anforderungen der Gesetzgebung [26] entsprechen. Bild 1 zeigt die chemische Zusammensetzung der mineralischen Abfälle im Ternär Diagramm.

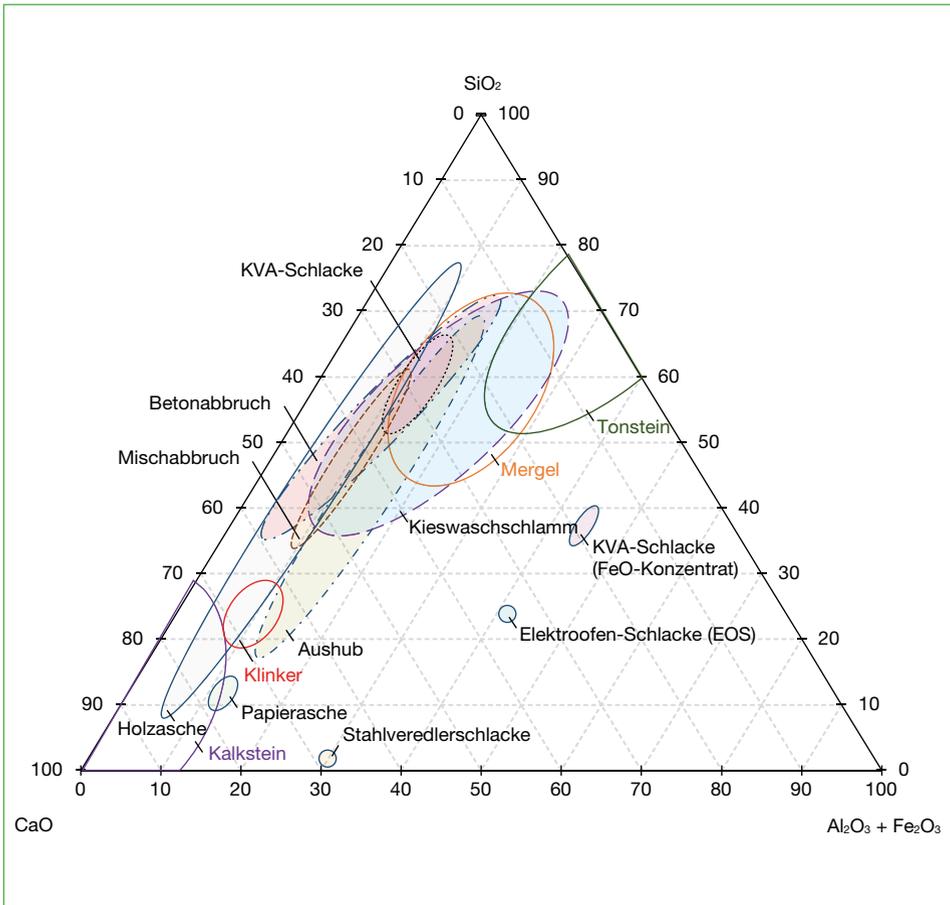


Bild 1: Übersicht der chemischen Zusammensetzung der mineralischen Abfälle im Ternärsystem CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; als Referenz ist die chemische Zusammensetzung des Klinkers und der Klinkerrohmaterien Kalkstein, Tonstein und Mergel dargestellt

## 2. Einsatz von mineralischen Abfällen als Maßnahme zur CO<sub>2</sub>-Reduktion in der Zementproduktion

Obwohl die Emissionen der Schweizer Zementindustrie seit 1990 um etwa 30 Prozent pro Tonne Zement gesenkt werden konnten [8], beträgt der Ausstoß heute immer noch etwa 2,4 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> im Jahr. Von den Gesamtemissionen werden etwa ein Drittel durch die Emissionen von Brennstoffen sowie durch Transport und Elektrizität verursacht. Dieses Drittel der Emissionen könnte in nahbarer Zukunft beinahe vollständig klimaneutral gestaltet werden durch die Substitution von fossilen Brennstoffen durch biogene Brennstoffe, ergänzt durch prozessbedingte Energieeffizienzsteigerungen und der Nutzung von erneuerbaren Energien. Etwas mehr als zwei Drittel der Emissionen (1,68 Millionen Tonnen) sind jedoch sogenannte geogene Emissionen, die unmittelbar mit der Kalzinierung des Rohmaterials verbunden sind und sich daher nicht mit Effizienzsteigerungen im Brennvorgang senken lassen. Durch die Reduktion des Klinkeranteils im Zement und der Verschiebung der in der Schweiz dominanten Zementsorte von CEM I mit 95 % Klinkeranteil zu CEM II/B mit 74 % Klinkeranteil konnte die CO<sub>2</sub>-Bilanz des Zements bereits beträchtlich verbessert werden [7]. Durch den konsequenten Einsatz von Zementen mit kalzinierten Tonen und Kalkstein als Klinkersubstitution (sogenannte LC3 Zemente) könnte die CO<sub>2</sub>-Bilanz des Zements um weitere etwa 15 bis 30 % verbessert werden [10, 25].

Ein weiterer großer Hebel zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen bietet der Einsatz von alternativen Rohmaterialien in der Klinkerproduktion. Durch die Substitution der primären Rohstoffe Kalkstein und Mergel, die geogenes CO<sub>2</sub> enthalten, durch entsäuerte, sogenannte CO<sub>2</sub>-freie Rohmaterialien, können direkt CO<sub>2</sub>-Einsparungen im Prozess erzielt werden. Im Jahr 2021 wurden schweizweit mit etwa 500 Millionen Tonnen alternativen Rohmaterialien bereits etwa 10 % des Rohmaterials eingespart, wobei hier aber hauptsächlich der siliziumreiche Mergel substituiert werden konnte [7]. Das größere CO<sub>2</sub>-Einsparungspotential bietet sich bei der Substitution des Kalksteins an: Mit jeder Tonne Kalzium, die durch CO<sub>2</sub>-freie oder CO<sub>2</sub>-neutrale Rohmaterialien substituiert wird, kann 785 kg CO<sub>2</sub> eingespart werden. Jedoch ist aber die Menge an Kalkstein, die substituiert werden kann, limitiert durch den maximalen Eintrag des alternativen Rohmaterials an SiO<sub>2</sub>, um den Kalkstandard der Rohmehlmischung einzuhalten [18]. Daher bieten Ca-reiche mineralische Abfälle wie Papier- und Holzasche sowie mineralische Rückbaufractionen mit hohem Anteil an Zementstein das größte Potential, um Kalkstein, und somit geogenes CO<sub>2</sub> zu substituieren. Heute werden in der Schweiz bereits mineralische Abfälle wie Papierasche und Holzasche eingesetzt, um das Ziel des klimaneutralen Zements bis 2050 [8] zu erreichen. Der Anteil an eingesetzten Aschen betrug im Jahr 2021 etwa 1 % des verwendeten Rohmaterials [7]. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Holz- und Papieraschen CO<sub>2</sub>-frei sind, da sie aus einem thermischen Prozess stammen. Jedoch sind sowohl Papier- als auch Holzasche enorm reaktiv [2, 13] und können innert kürzester Zeit hydratisieren und über das CO<sub>2</sub> aus der Luft karbonatisieren – es handelt sich also um CO<sub>2</sub>-neutrale Rohmaterialien.

# S-CEM®

im Einsatz für Zement- und Baustoffindustrie

Ein Beitrag zur Produktentwicklung,  
Dekarbonisierung und Ressourcenschonung



**eew**

Energy from Waste



**HEIDEMANN**

Recycling GmbH

[www.S-CEM.de](http://www.S-CEM.de)



## Schulungen zur Ersatzbaustoffverordnung

Im Zuge der Einführung der Ersatzbaustoffverordnung hat REMEX die Schulungsplattform MEB® Wissen entwickelt. Das Kursangebot reicht von den Grundlagen bis zu vertiefenden Vorträgen. Nutzer haben die Wahl zwischen zahlreichen Webinaren und On-demand-Kursen. Erfahren Sie mehr auf > [meb-wissen.de](http://meb-wissen.de)

REMEX GmbH // Am Fallhammer 1 // 40221 Düsseldorf // Deutschland  
T +49 211 17160-0 // F +49 211 17160-420 // [info@remex.de](mailto:info@remex.de) // [remex.de](http://remex.de)

### 3. CO<sub>2</sub>-neutrale Rohmaterialien und ihre Anrechenbarkeit

CO<sub>2</sub>-neutrale Rohmaterialien sind Materialien, die zum Zeitpunkt ihrer Entstehung weitestgehend CO<sub>2</sub>-frei sind, jedoch während der Nutzung, Lagerung und Aufbereitung zum alternativen Rohmaterial kurzfristig CO<sub>2</sub> aus der Luft binden. Das kurzfristig gebundene CO<sub>2</sub>, welches bei der Klinkerproduktion wiederum ausgetrieben wird, trägt nicht zum Treibhauseffekt bei und kann als klimaneutral angesehen werden (Bild 2).

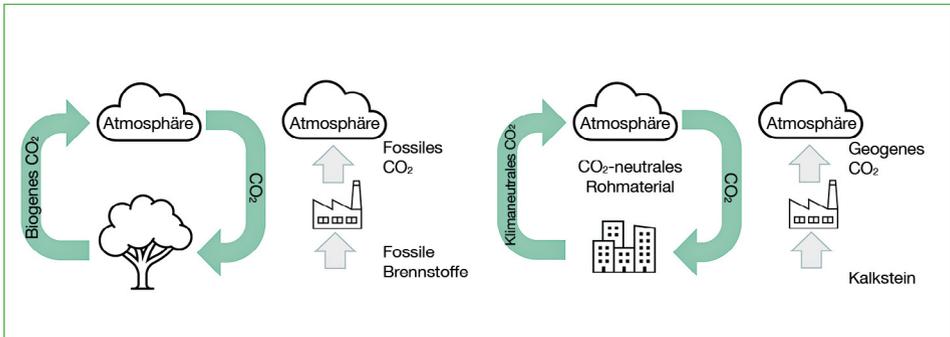


Bild 2: Analog wie bei den biogenen Brennstoffen für die Klinkerproduktion (links) würde durch den Einsatz von CO<sub>2</sub>-neutralen Rohmaterialien kurzfristig gebundenes CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre emittiert, welches als klimaneutral angesehen werden sollte, da es nicht zum Treibhauseffekt beiträgt; durch eine konsequente Teilsubstitution von Kalkstein durch CO<sub>2</sub>-neutrale Rohmaterialien könnte daher der Ausstoß von geogenem und somit treibhausgasförderndem CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre reduziert werden

Stand heute kann im Schweizer Emissionshandelssystem (EHS) nur der Einsatz von CO<sub>2</sub>-freien Rohmaterialien mittels der Methode Tier 2 der IPCC-Guidelines [17] angerechnet werden, nicht aber der Einsatz von CO<sub>2</sub>-neutralen Rohmaterialien (Bild 3). Für das Monitoring wird heute der Anteil an karbonatisch gebundenem Kohlenstoff im Ofenmehl gemessen, wobei nicht unterschieden wird, zu welchen Anteilen geogenes oder klimaneutrales CO<sub>2</sub> gebunden ist.

Heute sind die eingesetzten Mengen an Holz- und Papierasche noch zu gering, um eine messbare Reduktion des Anteils an CO<sub>2</sub> im Ofenmehl zu erkennen. Da die Aschen aber enorm reaktiv sind und bereits bei der Anlieferung zur Hälfte karbonatisiert sind, ist davon auszugehen, dass sie spätestens nach der Rohmühle mit 10 % absoluter Feuchte und 15 % CO<sub>2</sub>-Atmosphäre nahezu vollständig karbonatisiert sind (Bild 4). Im Rohmehl wird zum Zeitpunkt des Monitorings also kaum mehr CO<sub>2</sub>-freies Calciumoxid enthalten sein. Der Einsatz von CO<sub>2</sub>-neutralen Rohmaterialien resultiert also im heutigen Monitoringsystem nicht oder nur bedingt in einer CO<sub>2</sub>-Reduktion. Stand heute ist die Datengrundlage in den Zementwerken jedoch nicht ausreichend, um diese Hypothese zu bestätigen.

Eine erste Bilanz der Monitoring Analysen aus Schweizer Zementwerken zeigt, dass das Calciumoxid in den vermeintlich CO<sub>2</sub>-freien Holz- und Papieraschen

bereits zum Zeitpunkt der Anlieferung im Zementwerk etwa zur Hälfte karbonatisiert vorliegt. Auch der Zementstein in Rückbaumaterialien stellt eine extrem reaktive Ca-Quelle dar [27], die einzig durch das Lagern an der Luft  $\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre bindet [1]. In erster Linie betrifft das Thema des  $\text{CO}_2$ -neutralen Rohmaterials also die besonders reaktiven Materialien wie Verbrennungsrückstände und in Rückbaumaterialien gebundener Zementstein. Zukünftig könnte auch die CaO-reiche mineralische Restfraktion der KVA-Schlacke eine denkbare  $\text{CO}_2$ -neutrale Ca-Quelle in der Klinkerproduktion darstellen. Heute erfüllen die Schlackenfraktionen auf Grund der erhöhten Schwermetallgehalte die Anforderungen der Grenzwerte jedoch noch nicht.

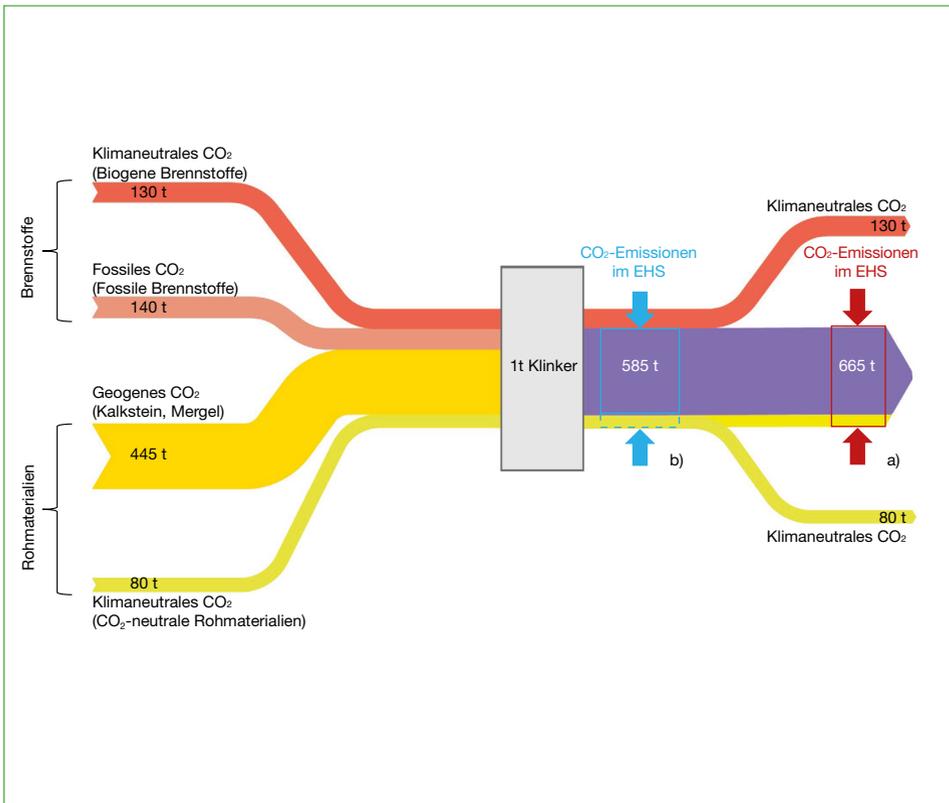


Bild 3: Das  $\text{CO}_2$ -Massenflussdiagramm zeigt schematisch die Unterschiede in der Anrechenbarkeit von klimaneutralem  $\text{CO}_2$  in der Klinkerproduktion; brennstoffseitig wird die Substitution von fossilen Brennstoffen durch biogene Brennstoffe und somit die Substitution von treibhausgasfördernden  $\text{CO}_2$ -Emissionen durch klimaneutrale  $\text{CO}_2$ -Emissionen im Emissionshandelssystem (EHS) angerechnet; rohmaterialseitig ist die Substitution von Kalkstein und Mergel (geogenes  $\text{CO}_2$ ) durch  $\text{CO}_2$ -neutrale Rohmaterialien noch nicht im EHS anrechenbar (Situation a); wäre die Substitution anrechenbar (Situation b), würden zusätzliche Anreize geschaffen, um primäres Rohmaterial mit geogenem  $\text{CO}_2$  durch sekundäre,  $\text{CO}_2$ -neutrale Rohmaterialien zu substituieren

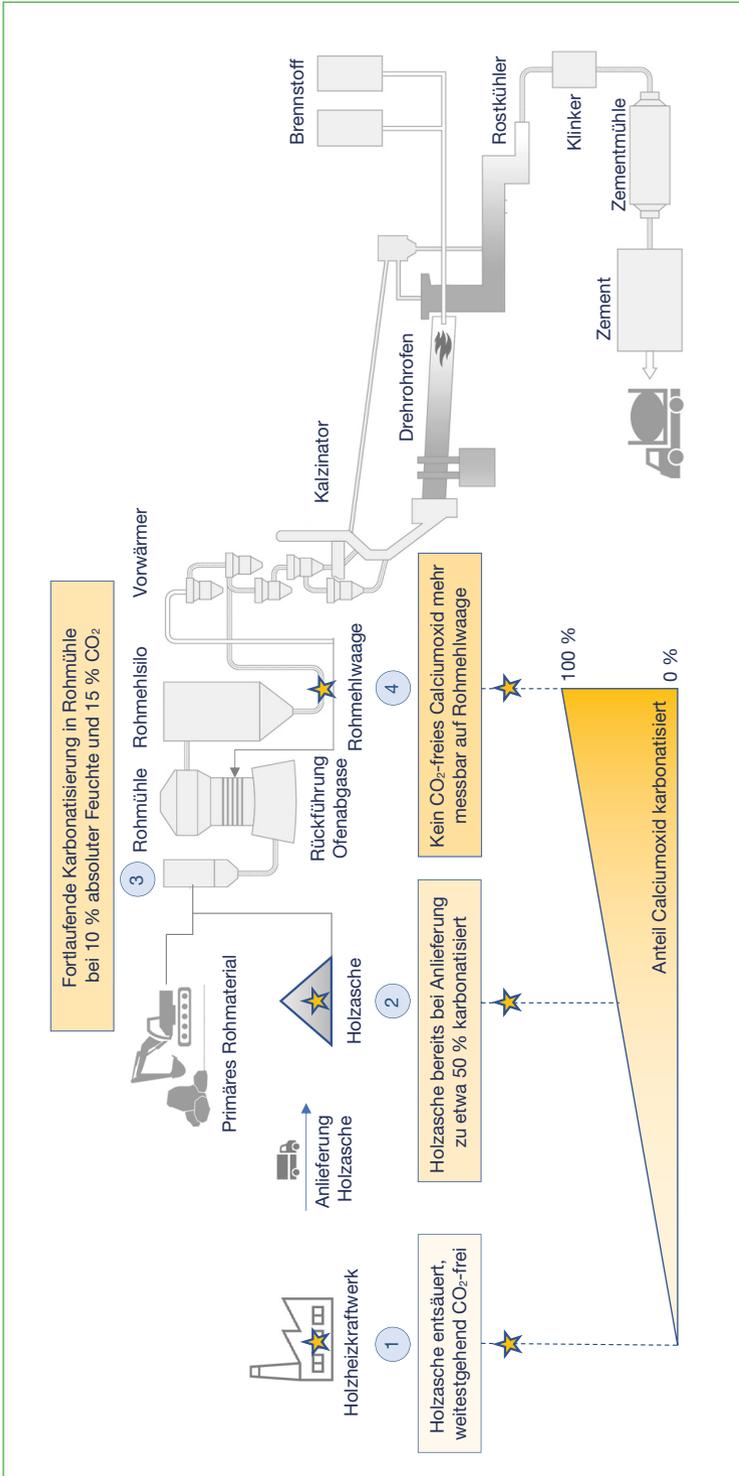


Bild 4: Schematische Darstellung des Karbonatisierungsverlaufs im Zementwerk am Beispiel der Holzgasche; im Schweizer Monitoringsystem wird der Anteil an karbonatisch gebundenem Kohlenstoff im Rohmehl an der Rohmehlwaage gemessen; es ist davon auszugehen, dass sich kaum mehr CO<sub>2</sub>-freies Calciumoxid nachweisen lässt, da die Holzgasche kurzfristig CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre gebunden hat; der Prozess wird beschleunigt über die Rückführung der Ofenabgase in die Rohmühle, wodurch in der Rohmühle eine Atmosphäre mit 10 % absoluter Feuchte und 15 % CO<sub>2</sub> herrscht

Quelle: Schema abgeändert von Durag Group, 2023. Lösungen für die Zementindustrie [WWW Document]. URL <https://www.durag.com/de/zementindustrie1930.htm>.

Substitution in der Zementindustrie

## 4. Nächste Schritte und Ausblick

Die laufende Studie untersucht nun das Potential der mineralischen Abfälle als CO<sub>2</sub>-neutrales Rohmaterial. Nebst einer detaillierten Materialcharakterisierung soll auch der Karbonisierungsverlauf der CO<sub>2</sub>-neutralen Rohmaterialien abgebildet werden, um das Potential für eine Verbesserung der CO<sub>2</sub>-Bilanz aufzuzeigen. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse sollen als Grundlage dienen, um die Anrechenbarkeit von klimaneutralem CO<sub>2</sub> in der Klinkerproduktion auch auf der Rohmaterialseite im Schweizer Emissionshandelssystem zu gewährleisten. Die gesetzlichen Rahmenbedingungen sind mittels Methode Tier 3 der IPCC Guidelines [17] gegeben, jedoch müssen die Anforderungen an das Reporting definiert werden (ggf. über die Definition eines CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktors).

Die Gewährleistung der Anrechenbarkeit von klimaneutralem CO<sub>2</sub> in der Klinkerproduktion würde zusätzliche Anreize schaffen, um sekundäre Ca-Quellen in der Klinkerproduktion einzusetzen und könnte einen entscheidenden Wendepunkt in der Verwertung von mineralischen Abfällen darstellen. Durch die erzielte CO<sub>2</sub>-Reduktion kann den mineralischen Abfällen ein zusätzlicher finanzieller Wert zugeschrieben werden, welcher weitere Investitionen in Technologien zur Qualitätsoptimierung ermöglicht.

## 5. Quellen

- [1] Angulo, S.C., Ulsen, C., John, V.M., Kahn, H., Cincotto, M.A., 2009. Chemicalmineralogical characterization of C&D waste recycled aggregates from São Paulo, Brazil. *Waste Manag.* 29, 721-730. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.07.009>
- [2] Barthel, M., 2023. Papierasche als Bindemittelkomponente – Potentiale und Grenzen.
- [3] Bundesamt für Umwelt BAFU, 2023. Rohstoffe, Abfall und Kreislaufwirtschaft: Das Wichtigste in Kürze [WWW Document].
- [4] Bundesamt für Umwelt BAFU, 2018. Verwertung von Elektroofenschlacke (EOS).
- [5] Bundesamt für Umweltschutz, 1986. Leitbild für die Schweizerische Abfallwirtschaft, Schriftenreihe Umweltschutz.
- [6] Bunge, R., 2013. Abklärung zum Inventar an umweltrelevanten Schlämmen in der Schweiz 41.
- [7] cemsuisse, 2022. Jahresbericht cemsuisse 2022.
- [8] cemsuisse, 2021. Roadmap 2050 – Klimaneutraler Zement als Ziel, Verband der Schweizerischen Zementindustrie.
- [9] Christen, C., Fasko, R., 2017. Einheitliche Heizwert- und Energiekennzahlenberechnung der Schweizer KVA nach europäischem Standardverfahren.
- [10] Díaz, C.Y., et al., 2017. Limestone calcined clay cement as a lowcarbon solution to meet expanding cement demand in emerging economies. *Dev. Eng.* 2, 82 – 91.
- [11] Durag Group, 2023. Lösungen für die Zementindustrie [WWW Document]. URL <https://www.durag.com/de/zementindustrie/1930.htm>
- [12] Fromm, S., Zucha, W., Schlumberger, S., Eggenberger, U., 2021. Metallrückgewinnung aus Filteraschen der thermischen Altholzverwertung.
- [13] Gunning, P.J., Hills, C.D., Carey, P.J., 2010. Accelerated carbonation treatment of industrial wastes. *Waste Manag.* 30, 1081 – 1090. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.005>
- [14] Habert, G., Miller, S.A., John, V.M., Provis, J.L., Favier, A., Horvath, A., Scrivener, K.L., 2020. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nat. Rev. Earth Environ.* 1, 559 – 573. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>

- [15] Hiltbrunner, D., 2017. Das Bauwerk als Rohstofflager. *Swiss Bull. Appl. Geol.* 22, 65 – 69.
- [16] Hoffmann, C., Huth, O., 2006. Konstruktionsbeton aus recycelter Gesteinskörnung.
- [17] IPCC, 2006. *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Vol. 3 Industrial Processes and Product Use, Mineral Industry (Ch.2)*.
- [18] Kytzia, S., Stürwald, S., Meglin, R., Pohl, T., Gilg, S., Häseli, U., Di Bella, C., 2020. CLOSE - Nachhaltiges Recycling von Brechsand aus Betonabbruch.
- [19] Matasci, C., Gauch, M., Böni, H., 2019. Material- und Energieflüsse der schweizerischen Volkswirtschaft 89.
- [20] Mehr, J., Haupt, M., Skutan, S., Morf, L., Raka Adrianto, L., Weibel, G., Hellweg, S., 2021. The environmental performance of enhanced metal recovery from dry municipal solid waste incineration bottom ash. *Waste Manag.* 119, 330 – 341. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.001>
- [21] Rubli, S., 2021. Mischabbruchverwertung in der Schweiz - Schlussbericht 2020.
- [22] Rubli, S., 2020. Modellierung der Asphaltflüsse in der Schweiz 39.
- [23] Rubli, S., 2014. Modell zur Beschreibung der Entwicklung der Gipsflüsse in der Schweiz 48.
- [24] Rubli, S., Schneider, M., 2020. KAR-Modell – Modellierung der Kies-, Rückbau- und Aushubmaterialflüsse: Bezugsjahr 2018.
- [25] Sánchez Berriel, D., et al., 2015. Assessing the environmental and economic potential of limestone calcined clay cement in Cuba. *J. Clean. Prod.* 361 – 369.
- [26] Schweizerischer Bundesrat, 2015. Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA) 2015, 1 – 46.
- [27] Zajac, M., Skibsted, J., Durdzinski, P., Bullerjahn, F., Skocek, J., Ben Haha, M., 2020. Kinetics of enforced carbonation of cement paste. *Cem. Concr. Res.* 131, 106013. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106013>
- [28] Zeltner, C., Niederberger, E., Glauser, A., Eggenberger, U., 2020. Übersichtspublikation EOS-Granulat in der Schweiz; Bau und Umwelt .

### Ansprechpartner



#### Dr. Mirjam Wolfers

Universität Bern, Institut für Geologie  
Bereichsleiterin Mineralische Sekundärrohstoffe  
Abteilung: Fachstelle Sekundärrohstoffe  
Baltzerstrasse 3  
3012 Bern, Schweiz  
+41 31 68489 53  
[mirjam.wolfers@geo.unibe.ch](mailto:mirjam.wolfers@geo.unibe.ch)

### Weitere beteiligte Institution

Practical Performance Improvement Häseli (PPIH), Brugg

## Provision of Alternative Binder Components Produced from Residue Combinations through Thermal Treatment

Klaus Doschek-Held, Anna Krammer, Florian Roman Steindl,  
Theresa Sattler and Dominik Wohlmuth

Nearly 40 % of global energy use and about 45 % of global CO<sub>2</sub> emissions can be attributed to industrial activities. [12, 13, 15] Some particularly energy- and CO<sub>2</sub>-intensive industry sectors are the production of chemicals, iron/steel, Portland cement and pulp/paper, making them high-priority targets for large-scale industrial decarbonisation. At the same time, these industry sectors have a high potential for connecting their respective materials in- and outputs within a circular economy, promoting the recycling of residues as SRM.

In the present contribution, experiments on the thermochemical treatment of residues from the iron and steel, glass recycling, construction and demolition and paper industry are planned and carried out on a laboratory scale at the Chair of Thermal Processing Technology (TPT) at the Montanuniversität Leoben in cooperation with the Chair of Waste Processing Technology and Waste Management (AVAW). These trials should generate a metal fraction as a secondary raw material (SRM) for the iron and steel industry and/or a slag fraction as an alternative binder component in the cement industry comparable to ground granulated blast furnace slag. The residues are mixed, melted, cooled, processed, and analysed. The material characterisation and investigations on the binder suitability of the slag fraction were provided by the Institute for Technology and Testing of Building Materials (IMBT) and the Institute of Applied Geosciences (IAG) at the Graz University of Technology (TUG). The results of the trials show that the metal and slag fraction separation is possible on a laboratory scale, and the slag fraction fulfils the proven requirements as an alternative binder component. Finally, a material flow analysis based on the results could be carried out to estimate the recycling potential for the province of Styria in Austria.

## Bereitstellung von alternativen Bindemittelkomponenten aus Reststoffkombinationen mittels thermischer Behandlung

Klaus Doschek-Held, Anna Krammer, Florian Roman Steindl,  
Theresa Sattler und Dominik Wohlmuth

1.	Methode.....	272
2.	Material und Prüfmethode.....	273
3.	Durchführung.....	274
4.	Ergebnisse und Diskussion.....	275
5.	Zusammenfassung und Ausblick.....	279
6.	Quellen.....	280

Das weltweite Streben nach materiellem Wohlstand stellt die Menschheit vor enorme ökologische Herausforderungen. Dies wird durch eine stark wachsende Weltbevölkerung und aufstrebende Volkswirtschaften weiter verstärkt und schlägt sich im rasant steigenden Verbrauch natürlicher Rohstoffe nieder. [6] Die aktuelle Wirtschaftsweise folgt dabei vorrangig einem linearen Ansatz von der Rohstoffgewinnung, über die Produktion, den Nutzungszeitraum bis zur Entsorgung, wobei ungenutzte Reststoffe und Nebenprodukte ein hohes Abfallaufkommen und Emissionen bedingen. [4] In diesem Zusammenhang sind sowohl die Eisen- und Stahlherstellung als auch die Zement- bzw. Bindemittelproduktion als besonders energie- und emissionsintensive Industrien zu nennen. [14, 16] Daher sind die Dekarbonisierung und Optimierung dieser Sektoren von besonderer Wichtigkeit, um die CO<sub>2</sub> Intensität der Produkte zukünftig zu reduzieren. [5, 10]

Diese Bestrebungen zeigen sich in den geplanten Technologieänderungen [12] in der Eisen- und Stahlindustrie hin zu einer CO<sub>2</sub>-neutralen Produktion. Dadurch kommt es jedoch zum schrittweisen Entfall von Hochofenschlacke, welche als Hüttensand (HÜS) in der Zement- und Bindemittelproduktion als Klinkersubstitut eingesetzt wird, um unter anderem die gesetzten Klimaziele zu erreichen. [11, 12, 21] Ein Ersatz des Energie- und CO<sub>2</sub>-intensiven Portlandzementklinkers durch Reststoffe ist dabei in mehrerer Hinsicht sinnvoll: (i) um CO<sub>2</sub> Emissionen in der Produktion von mineralischen Bindemitteln einzusparen, (ii) um das Abfallaufkommen bzw. die Deponierung zu verringern und (iii) um Stoffkreisläufe zu schließen.

Daher wird zur Forcierung der reststofffreien, nachhaltigen Kreislaufwirtschaft und Ressourcenschonung am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik (TPT) an der Montanuniversität Leoben (MUL) an den Möglichkeiten einer stofflichen Verwertung von Reststoffen, welche aufgrund von fehlenden Verwertungsmöglichkeiten zwischengelagert oder deponiert werden müssen, gearbeitet. Das aktuelle Projekt *UpcycSlag-Binder* befasst sich dabei mit dem Upcycling von Hüttenreststoffen zu neuen, nachhaltigen Bindemitteln in der Baustoff-Kreislaufwirtschaft und das Projekt *RecyMin* des Lehrstuhls für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft (AVAW) mit dem Recycling künstlicher Mineralfasern. [7, 8, 18, 25 – 27] Im gegenständlichen Beitrag werden auszugweise Versuche zur thermochemischen Behandlung im Labormaßstab am TPT im Rahmen dieser Projekte beschrieben und auf deren Ergebnisse eingegangen. Im Zuge dieser Versuche gilt es die gezielte Konditionierung und thermische Behandlung entsprechend den angestrebten Qualitätsmerkmalen [27] zur stofflichen Verwertung als Sekundärrohstoff für die Eisen- und Stahlindustrie und/oder als alternative Bindemittelkomponenten, vergleichbar mit konventionellem HÜS, nachzuweisen. Die Materialcharakterisierung und Untersuchungen zur Bindemittelleignung der Schlackenfraktion werden durch die Institute für Materialprüfung und Baustofftechnologie (IMBT) bzw. für Angewandte Geowissenschaften (IAG) an der TU Graz (TUG) erbracht. [27] Die Ergebnisse münden in einer abschließenden Stoffflussanalyse zur Potentialabschätzung der Substitution von Hüttensand als Sekundärrohstoff (SZS) für das Bundesland Steiermark in Österreich.

## 1. Methode

Allgemein sollen die in den Reststoffen enthaltenen Wertstoffe in zwei Fraktionen isoliert werden: eine Metallfraktion als Sekundärrohstoff und eine reaktive Schlackenfraktion, welche die geforderte Qualität zur Nutzung als Bindemittelkomponente erfüllt. Dazu gilt es die Rest- und Korrekturstoffe entsprechend zu mischen, zu schmelzen und abzukühlen (Bild 1).



Bild 1: Ablaufdiagramm der thermischen Behandlung von Reststoffen zur stofflichen Verwertung als Sekundärrohstoff und Bindemittelkomponente

Die angestrebte carbothermische Reduktion der Reststoffmischung ist die Voraussetzung zur Rückgewinnung bzw. Abtrennung der Wertmetalle. Bei der anschließenden Abkühlung der Schmelze soll eine glasige Erstarrung der Schlackenphase erreicht werden, um ihre hydraulische Aktivität im Portlandzementssystem und in weiterer Folge die Festigkeitsentwicklung im erhärtenden Material sicherzustellen. Anschließend erfolgen weitere Probenaufbereitungsschritte, um eine umfassende Analyse der entstehenden Fraktion zu ermöglichen. Zur Umsetzung der Stoffflussanalyse wird das Programm STAN 2.6 (subSTANCE flow ANALYSIS) herangezogen, welches auf der ÖNORM S 2096 [24] basiert und den Aufbau von grafischen Modellen ermöglicht.

## 2. Material und Prüfmethode

Voraussetzung für die gezielte thermochemische Behandlung der Rest- und Korrekturstoffe ist eine entsprechende chemisch-mineralogische Charakterisierung. Die zu prüfenden Materialien (Rest- und Korrekturstoffe) wurden dazu homogenisiert und gemahlen. Die chemische Zusammensetzung der Materialien wurde mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) bestimmt. Die mineralogische Zusammensetzung und der amorphe Anteil der Materialien wurde durch Röntgenpulverdiffraktometrie (P-XRD) festgestellt. [17] Die hydraulische Reaktivität, als Maß für die Fähigkeit des Schlackenpulvers zur hydraulischen Reaktion, wurde mit dem R<sup>3</sup>Schnellverfahren ermittelt. [2, 19] Der Aktivitätsindex, welcher der Einschätzung der hydraulischen Reaktivität in Kombination mit Portlandzement dient, wurde gemäß ÖN B 33091 [22] an Mörtelprismen mit einem Bindemittel aus 75 % Einheitszement (CEM I 42,5 R) und 25 % Prüfmaterial bestimmt. Hierbei wurde von der Prüfnorm ÖN B 33092 [23] mit 50 % Einheitszement und 50 % Prüfmaterial abgewichen. [27] Im gegenständlichen Beitrag wurden Reststoffe aus

- der Eisen- und Stahlindustrie,
  - Roheisenschwefelungsschlacke – REES,
  - Sekundärmetallurgie/Strangguss – CCS,
  - Konverterschlacke – LDS,
  - Siemens-Martin-Schlacke – SMS,
- dem Glasrecycling,
  - Aufbereitungsrückstand/Feinglas – FG,
- dem Gebäuderückbau
  - Steinwolle – SW,
  - Glaswolle – GW und
- der Papierindustrie
  - Wirbelschichtverbrennung/Flugasche – FA

betrachtet.

Die entsprechenden chemischen Zusammensetzungen der untersuchten Einsatzmaterialien wurden in Bild 2 zusammengefasst.

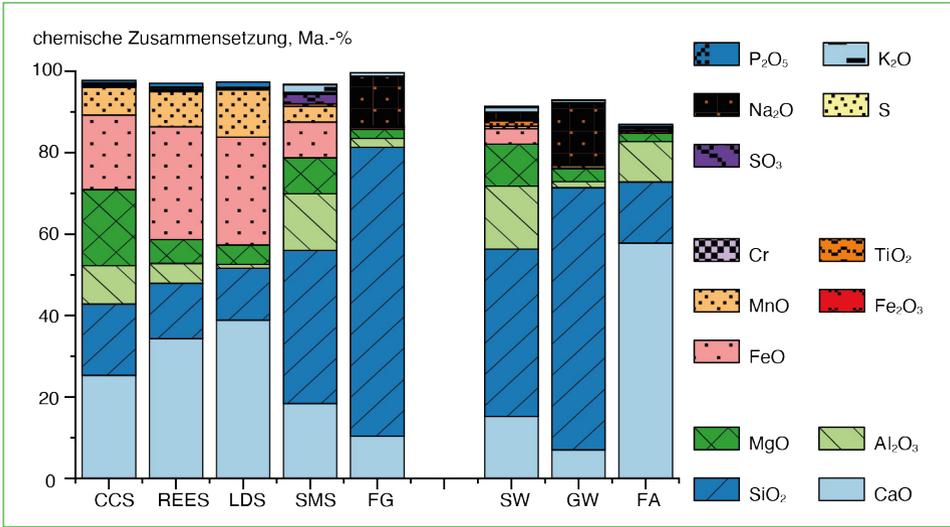


Bild 2: Hauptelementzusammensetzung der gegenständlichen Einsatzmaterialien

### 3. Durchführung

Basierend auf der Charakterisierung der Einsatzmaterialien und anhand identifizierter Qualitätsansprüche [27] in der angestrebten stofflichen Verwertung wurden potenzielle Stoffgemenge zur thermischen Behandlung erarbeitet. Dafür wurde ein Mischungsrechner in MS Excel mithilfe eines Solver Add-Ins realisiert. [9] Darüber hinaus wurde für den metallischen Reststoffanteil der stöchiometrische Reduktionsmittelbedarf für die carbothermische Reduktion bestimmt. Anhand dieser Ergebnisse wurden Mischungen (M1, M2, M3) der verschiedenen Einsatzstoffe unter Zusatz von Kohlenstoffpulver als Reduktionsmittel hergestellt (Tabelle 1).

	REES	CCS	LDS	SMS	FG	SW	GW	FA
	%							
M1	16	50	4	30				
M2	20	64			16			
M3						49	15	36

Tabelle 1:

Prozentuelle Zusammensetzung der Einsatzmischungen

In einem Graphittiegel wurden anschließend etwa 1 bis 1,5 kg der Mischungen induktiv geschmolzen. Die Versuchsdauer betrug im Durchschnitt 200 Minuten mit einer Haltezeit von 60 Minuten. Dabei wurden Heizraten von bis zu 870 K/h und eine maximale Temperatur von 1.450 °C erreicht. Es folgte eine gezielte Abkühlung durch Nassgranulation mit einer anschließenden Trockenzeit von 24 Stunden bei 105 °C. Das getrocknete Granulat wurde im Anschluss mittels Backenbrecher auf 0,1 mm zerkleinert und gesiebt, darauffolgend wurde die Metall- und Schlackenfraktion magnetisch getrennt. Danach wurden die Materialcharakterisierung und Untersuchungen zur Bindemittel-eignung durchgeführt. Basierend auf den Analyseergebnissen wurde abschließend

eine Stoffflussanalyse zur Potentialabschätzung der stofflichen Verwertung der Metall- und Schlackenfraktion für das Bundesland Steiermark in Österreich durchgeführt. Dazu wurde exemplarisch die Mischung M2 und M3 in Bild 3 als Stoffflussdiagramm dargestellt. Hierzu wurde als Berechnungsbasis ein Anfall von 100.000 t/a CCS und 15.000 t/a SW angenommen und dem Sekundärzumahlstoffbedarf (SZS) an Hüttsand (HÜS) der Zementindustrie in der Steiermark von etwa 297.000 t für das Jahr 2020 gegenübergestellt. [3, 20]

#### 4. Ergebnisse und Diskussion

Die durchgeführte Materialcharakterisierung zeigte wesentliche Unterschiede zwischen den Ausgangsmaterialien bzw. -mischungen und den Schlackenfraktionen. Dabei konnte im Wesentlichen der Metallgehalt im Vergleich zur Einsatzmischung reduziert werden und gleichzeitig der Gehalt an CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und MgO gezielt angepasst werden. Die chemische Zusammensetzung der Einsatzmischungen und der generierten Schlackenfraktion ist in Bild 3 dargestellt.

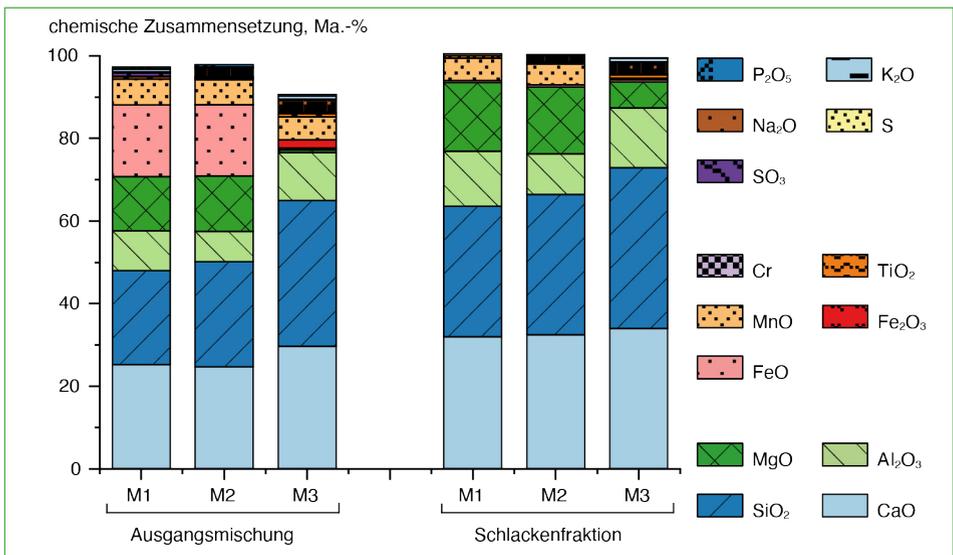


Bild 3: Hauptelementzusammensetzung der Einsatzmischungen und der Schlackenfraktion nach der thermischen Behandlung

Daraus lässt sich die gezielte Modifikation der chemischen Zusammensetzung der Schlackenfraktion sowie die gewünschte Abtrennung der Metalle durch die Transferkoeffizienten der Metalle (Eisen (Fe), Mangan (Mn), Chrom (Cr)) ableiten. Des Weiteren konnte die Modifikation der Schlackenfraktion durch die notwendige Abkühlgeschwindigkeit zur glasigen Erstarrung mittels Glasgehalten größer 97 % nachgewiesen werden. Die weiterführenden Ergebnisse der Materialcharakterisierung, Prozessanalyse und Untersuchung zur Bindemittelleignung sind Tabelle 2 zu entnehmen.

Substitution in der Zementindustrie

Tabelle 2: Ergebnisse der Materialcharakterisierung und baustofflichen Untersuchung der Schlackenfraktion nach der thermischen Behandlung

Eigenschaft	Einheit	Annahmen/ Anforderungen	M1	M2	M3
Glasgehalt	%	> 66	100	97	100
CaO+MgO+SiO <sub>2</sub>	Ma.-%		80	83	79
(CaO+MgO)/SiO <sub>2</sub>	–	> 1,00	1,55	1,43	1,03
TK* <sub>Schlacke, Fe</sub>	%	< 10	2	2	27
TK* <sub>Schlacke, Mn</sub>		< 50	60	59	6
TK* <sub>Schlacke, Cr</sub>		< 20	7	6	26
R <sup>3</sup> – Hydratationswärme nach 7 Tagen	J/g <sub>Schlacke</sub>	> 250	525	396	364
Aktivitätsindex nach 28 Tagen	%	≥ 90	100	97	97

\*TK – Transferkoeffizient

Anhand der Ergebnisse lässt sich in erster Näherung eine baustoffliche Eignung der Schlackenfraktion nach der durchgeführten thermischen Behandlung feststellen. Basierend auf weiterführenden Untersuchungen sollen die Einflussgrößen der Einzeloxide und der Behandlungsbedingungen auf die Transferkoeffizienten und die Bindemittelqualität ermittelt werden. Darüber hinaus soll durch eine angestrebte Maßstabsvergrößerung eine ausreichende Menge zur bautechnologischen Eignungsuntersuchung bereitgestellt werden. Das abschließende Ergebnis der Stoffflussanalyse zur Potentialanalyse anhand der Mischung M2 und M3 ist in Bild 4 dargestellt.

Substitution in der Zementindustrie

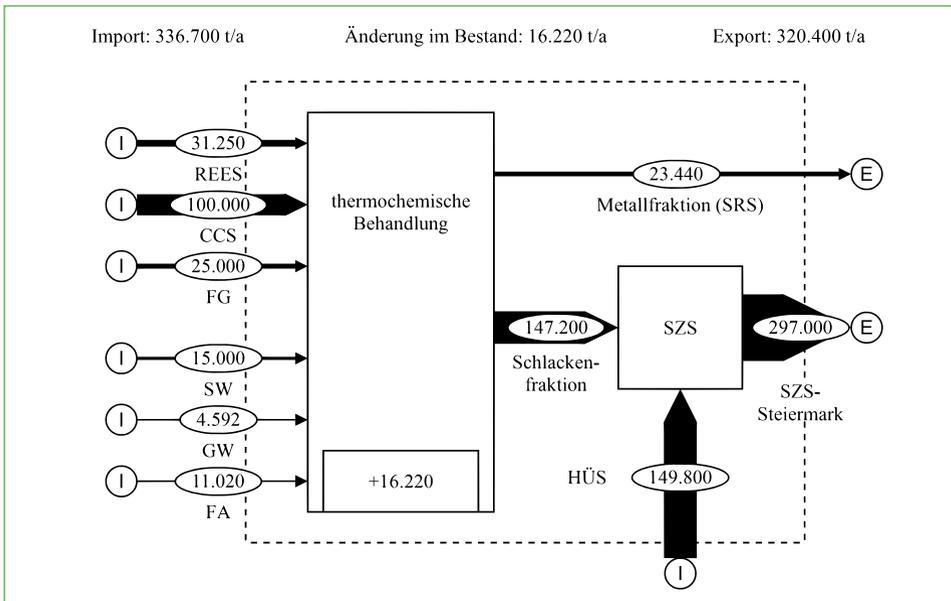


Bild 4: Stoffflussdiagramm zur Potentialabschätzung der Wertmetallrückgewinnung und Sekundärzumahlfeststoffbereitstellung für die Zementindustrie im Bundesland Steiermark/Österreich in Tonnen für das Jahr 2020

Besuchen Sie unsere Website  
[www.schlackenkantor.de](http://www.schlackenkantor.de)



*emvau-schlacke - der Baustoff  
für starke Beanspruchung*

**emvau**   
**Ein Baustoff aus MV-Schlacke**

*... ein Baustoff mit Zukunft*

- UMWELTBEWUSST
- GÜTEÜBERWACHTE QUALITÄT
- HOHE TRAGFÄHIGKEIT
- WITTERUNGSUNABHÄNGIG EINBAUBAR
- PREISWERT

**Hanseatisches Schlackenkantor GmbH**

Hamburg 040-25407790 • [info@schlackenkantor.de](mailto:info@schlackenkantor.de) • [www.schlackenkantor.de](http://www.schlackenkantor.de)

# S-CEM®

im Einsatz für Zement- und Baustoffindustrie

Ein Beitrag zur Produktentwicklung,  
Dekarbonisierung und Ressourcenschonung



**eew**

Energy from Waste



**HEIDEMANN**

Recycling GmbH

[www.S-CEM.de](http://www.S-CEM.de)

Daraus ergibt sich ein Wertmetallrückgewinnungspotential von etwa 23.440 t/a für die Eisen- und Stahlindustrie und ein Substitutionspotential von Hüttensand (HÜS) von etwa 147.200 t/a für den Einsatz als Sekundärzumahlstoff in der Zementindustrie. Dadurch könnten etwa 43 % des Hüttensandbedarfs in der Steiermark im Betrachtungsjahr 2020 gedeckt werden. Dabei kommt es im Prozess *thermische Behandlung* zur Lagerbildung, welche sich auf die gasförmigen Reduktionsprodukte und Behandlungsverluste zurückführen lässt und aktuell nicht näher erfasst werden. Eine Quantifizierung der entsprechenden Transferkoeffizienten ist Teil weiterführender Untersuchungen.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Die durchgeführten Versuche zeigten, dass die Einsatzmaterialie bzw. -mischungen im Labormaßstab derart thermisch behandelt werden konnten, dass eine Metall- und/oder Schlackenfraktion zur stofflichen Verwertung generiert werden konnte. Die Analyseergebnisse der Einsatzmaterialien und -mischungen sowie die entstandene Schlackenfraktion wurden nochmals im Dreistoffdiagramm  $[\text{SiO}_2]$  -  $[\text{CaO}+\text{MgO}]$  -  $[\text{Al}_2\text{O}_3+\text{FeO}]$  in Bild 5 zusammengefasst.

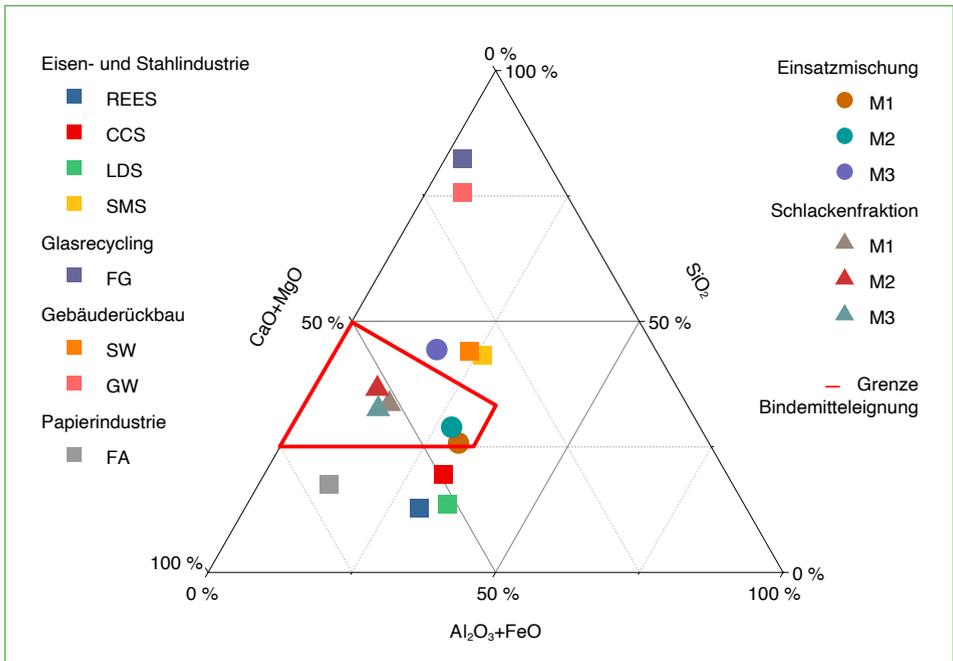


Bild 5: Dreistoffdiagramm  $[\text{SiO}_2]$  -  $[\text{CaO}+\text{MgO}]$  -  $[\text{Al}_2\text{O}_3+\text{FeO}]$  der Einsatzmaterialien und -mischungen sowie der Schlackenfraktion nach der thermischen Behandlung

Allgemein konnte nachgewiesen werden, dass bei Vorhandensein einer entsprechenden Metalloxidmenge ( $> 10\%$ ) in der Einsatzmischung eine Metallfraktion als Sekundärrohstoff zur Rückführung in die Eisen- und Stahlindustrie generiert werden

kann. Gleichzeitig erzielte die gebildete Schlackenfraktion in erster Näherung die geforderte Leistungsfähigkeit zum Einsatz als Hüttensands substitut. Basierend auf den Erkenntnissen konnten bereits Folgeprojekte zur Wertmetallrückgewinnung und Bindemittelbereitstellung in der Elektroofenroute (Recover-Met-Binder) und zum Recycling von künstlichen Mineralfasern (BitKOIN) gestartet werden. Dabei sollen weitere Entwicklungsschritte gesetzt werden, wie insbesondere die Maßstabsvergrößerung der thermischen Behandlung, basierend auf regenerativen Energieträgern. Dazu gilt es, die Einsatzmöglichkeit eines induktiven Inline-Ofens [1] im Technikumsmaßstab zu evaluieren. Darüber hinaus sollen auch die Einfluss- und Störgrößen auf die Qualitätsmerkmale näher beschrieben werden.

## Danksagung

Das Forschungsprojekt *RecyMin* wurde von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) gefördert und im Rahmen des Programms *Bridge* durchgeführt. Das Forschungsprojekt *UpcycSlag-Binder – US-B* wurde aus Mitteln des Zukunftsfonds Steiermark und dem Klimaschutzfonds der Stadt Graz gefördert und im Rahmen des Programms *Green Tech 100 – 1 Earth, 0 Carbon, 0 Waste* durchgeführt. Das Forschungsprojekt *BitKOIN* wird von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) gefördert und im Rahmen des Programms *FTI-Initiative Kreislaufwirtschaft* durchgeführt. Das Forschungsprojekt *Recover-Met-Binder – RMB* wird aus Mitteln des Zukunftsfonds Steiermark, der Austrian Society for Metallurgy and Materials (ASMET) und einzelner Industrieunternehmen (voestalpine High Performance Metals, Marienhütte, Andritz, Primetals Technologies und Saubermacher) im Rahmen des Programms *Green Tech X* durchgeführt.

## 6. Quellen

- [1] Bartashov, V.; Grass, K.; Sucker, J.: Der induktive Inline-Ofen für Recycling und Verwertung mineralischer Abfälle und Reststoffe, in: Pomberger, R. (Hrsg.): *Recy & DepoTech 2022: Vorträge, 2022*, S. 717–724
- [2] Blotevogel, S.; Ehrenberg, A.; Steger, L.; Doussang, L.; Kaknics, J.; Patapy, C.; Cyr, M.: Ability of the R3 test to evaluate differences in early age reactivity of 16 industrial ground granulated blast furnace slags (GGBS), *Cement and Concrete Research* 130 (2020), S. 105998
- [3] Bohslavski, S.: Sekundärrohstoffbedarf und -anfall für die Bereitstellung von neuen, nachhaltigen Bindemitteln aus Reststoffen mittels Heatmaps, Bachelorarbeit, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik, 2021
- [4] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie: Österreich auf dem Weg zu einer nachhaltigen und zirkulären Gesellschaft - Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie, (08.02.2023)
- [5] Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus: Masterplan Rohstoffe 2030, (09.02.2023)
- [6] Dellnik, R.; Chateau, J.; Bibas, R.; Lanzi, E.; Benkovic, M.: Global Material Resources Outlook to 2060 – Economic drivers and environmental consequences, (09.02.2023)
- [7] Doschek-Held, K.; Krammer, A.; Steindl, R. F.; Eisner, P.; Wohlmuth, D.: Thermische Behandlung und Konditionierung von Hüttenreststoffen zur stofflichen Verwertung, in: Pomberger, R. (Hrsg.): *Recy & DepoTech 2022: Poster, 2022*

- [8] Doschek-Held, K.; Mimra, C.; Sattler, T.; Steindl, R. F.: Behandlung von Steinwolle zur stofflichen Verwertung als Sekundärzumahlstoff in der Baustoffindustrie, in: Pomberger, R. (Hrsg.): Recy & DepoTech 2022: Vorträge, 2022
- [9] Eisner, P.: Stoffliche Verwertung von Eisenhütten- und Stahlwerksschlacken als Bindemittelkomponenten - Entwicklung eines Mischungsrechners, Montanuniversität, 2023
- [10] Europäische Kommission: Der europäische Grüne Deal, (08.02.2023)
- [11] Favier, A.; Wolf, C. de; Scrivener, K.; Habert, G.: A sustainable future for the european cement and concrete industry: technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050, ETH Zurich, 2018
- [12] IEA International Energy Agency: Energy Technology Perspectives 2020, (18.05.2022)
- [13] IEA International Energy Agency: Global Energy Review: CO<sub>2</sub> Emissions in 2021, (19.10.2022)
- [14] IEA International Energy Agency: Iron and steel technology roadmap: Towards more sustainable steelmaking, Paris, 2020
- [15] IEA International Energy Agency: Key World Energy Statistics 2020, (19.10.2022)
- [16] IEA International Energy Agency: Low-carbon transition in the cement industry, IEA Technology Roadmaps, Paris, 2018
- [17] Jansen, D.; Goetz-Neunhoeffler, F.; Lothenbach, B.; Neubauer, J.: The early hydration of Ordinary Portland Cement (OPC): An approach comparing measured heat flow with calculated heat flow from QXRD, Cement and Concrete Research 42 (2012), Nr. 1, S. 134–138
- [18] Krammer, A.: Thermal treatment and cooling of metallurgical residues for use as a supplementary cementitious material, Masterarbeit, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik, 2022
- [19] Li, X.; Snellings, R.; Antoni, M.; Alderete, N. M.; Ben Haha, M.; Bishnoi, S.; Cizer, Ö.; Cyr, M.; Weerd, K. de; Dhandapani, Y.; Duchesne, J.; Haufe, J.; Hooton, D.; Juenger, M.; Kamali-Bernard, S.; Kramar, S.; Marroccoli, M.; Joseph, A. M.; Parashar, A.; Patapy, C.; Provis, J. L.; Sabio, S.; Santhanam, M.; Steger, L.; Sui, T.; Telesca, A.; Vollpracht, A.; Vargas, F.; Walkley, B.; Winnefeld, F.; Ye, G.; Zajac, M.; Zhang, S.; Scrivener, K. L.: Reactivity tests for supplementary cementitious materials: RILEM TC 267-TRM phase 1, Materials and Structures 51 (2018), Nr. 6
- [20] Mauschitz, G.: Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie - Berichtsjahr 2020, 11.07.2022
- [21] Moser, S.; Leitner, K.-H.; Steinmüller, H.: F&E-Fahrplan - Energieeffizienz in der energieintensiven Industrie, 28.06.2016
- [22] Österreichisches Normungsinstitut: Aufbereitete, hydraulisch wirksame Zusatzstoffe für die Betonherstellung (AHWZ): Teil 1: Kombinationsprodukte (GC/GC-HS), Bd. 91.100.30, Wien, 2010
- [23] Österreichisches Normungsinstitut: Aufbereitete, hydraulisch wirksame Zusatzstoffe für die Betonherstellung (AHWZ): Teil 2: Hüttensandmehl zur Verwendung in Beton, Mörtel und Einpressmörtel (GS bzw. GS-HS) - Nationale Anwendung der ÖNORM EN 15167-1, Bd. 91.100.30, Wien, 2010
- [24] Österreichisches Normungsinstitut: Stoffflussanalyse - Teil 1: Anwendung in der Abfallwirtschaft – Begriffe, Wien, 2005
- [25] Sattler, T.; Galler, R.; Vollprecht, D.: Entwicklung innovativer Recyclingverfahren für Mineralwolleabfälle – Projekt RecyMin, BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 164 (2019), Nr. 12, S. 552–556
- [26] Sattler, T.; Pomberger, R.; Schimek, J.; Vollprecht, D.: Mineral Wool Waste in Austria, Associated Health Aspects and Recycling Options, Volume 09 - March 2020, Detritus (2020), Nr. 9, S. 174–180
- [27] Steindl, R. F.; Doschek-Held, K.; Juhart, J.; Wohlmuth, D.; Mittermayr, F.: Mineralische Reststoffe und Nebenprodukte als Bestandteile reaktiver Bindemittelkomponenten, in: Pomberger, R. (Hrsg.): Recy & DepoTech 2022: Vorträge, 2022

## Ansprechpartner



**Dipl.-Ing. Dr.mont. Klaus Doschek-Held**

Montanuniversität Leoben  
Senior Scientist  
Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik  
Franz Josef-Straße 18  
8700 Leoben, Österreich  
+43 3842402 5831  
klaus.doschek-held@unileoben.ac.at



**Dipl.-Ing. Anna Kramer**

Montanuniversität Leoben  
Dissertantin  
Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik  
Franz Josef-Straße 18  
8700 Leoben, Österreich  
+43 3842402 5829  
anna.kramer@unileoben.ac.at



**Theresa Sattler, M.Sc.**

Montanuniversität Leoben  
Wissenschaftliche Mitarbeiterin  
Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft  
Franz Josef-Straße 18  
8700 Leoben, Österreich  
+43 3842402 5138  
theresa.sattler@unileoben.ac.at



**Dr. rer. nat. Florian Roman Steindl, B.Sc. M.Sc.**

Technische Universität Graz  
Universitätsprojektassistent  
Institut für angewandte Geowissenschaften, Institut für Material-  
prüfung und Baustofftechnologie  
Rechbauerstraße 12  
8010 Graz, Österreich  
+43 3168 736870  
florian.steindl@tugraz.at

# ReSource

## Abfall • Rohstoff • Energie

Jahresabonnement (4 Ausgaben): 62 Euro (incl. MwSt. und Versand)

36. Jahrgang 2023



33. Jahrgang

ISSN 1868-9531 1. Quartal 2020 Preis 20,00 EUR A 13138 F

(Herausgeber: RHOOMBOS)

# ReSource

Abfall • Rohstoff • Energie Fachzeitschrift für nachhaltiges Wirtschaften

#### HERAUSGEBER

Dipl.-Pol. Bernhard Reiser

#### REDAKTION

Dr.-Ing. Stephan Hradl

Dipl.-Pol. Bernhard Reiser

#### REDAKTIONSBERAT

Professor Dr.-Ing. Michael Beckmann

Professor Dr.-rer. nat. Matthias Finkbeiner

Professor Dr.-Ing. Daniel Goldmann

Professor Dr.-Ing. Karl E. Lorber

Dipl.-Ing. Johannes J. E. Martin

Dipl.-Ing. Christian Tebert

Professor Dr. Andrea Versteijl

Ulrike Braun und Claus G. Bannick  
Die Standardisierung von Untersuchungsverfahren für  
(Mikro-)Plastik in der Umwelt hat begonnen

Mareike Carolin Taube, Christian Adam, Burkart Adamczyk,  
Tobias Bedermann, Markus Reuter und Michael Seiler  
Schmelzversuche zeigen, wie die Tantalrückgewinnung aus  
Zinnschlacken und weiteren Reststoffen optimiert werden kann

#### Jana Krüger

Eine aktualisierte Verfahrens- und Situationsübersicht  
ermöglicht Schlussfolgerungen für die Erweiterung der  
Phosphorrückgewinnung

Elmar Kuhn, André Leumann und Dominik Oetliker

Mit maßgeschneiderten Indikatoren misst die Kantom Zürich  
die in der Bauabstanz eingelagerten Rohstoffe

Thomas Obermayer und Sylvia Lehmann

Die Replik auf die NABU-Studie zur Entwicklung der  
energetischen Verwertung bis 2030 spricht gegen einen  
Rückbau von Kapazitäten

#### Gudrun Rinn

Politik und Wirtschaft diskutieren über den Beitrag der  
Müllverbrennung an der Berliner Wärmeversorgung

RHOOMBOS

1 2020

Fotos: pixelio.de

Für Wirtschaft und Politik ist ein nachhaltiger Umgang mit Abfall, Rohstoffen und Energie eine Frage der Zukunftssicherung. Umwelttechnisches Know-how und Informationen über grundlegende Entwicklungen sind für den Erfolg entscheidend. Mit der Fachzeitschrift **ReSource – Abfall, Rohstoff, Energie** sind Sie bestens über nachhaltiges Wirtschaften informiert.

Neben Forschungsergebnissen stellt die Fachzeitschrift praxisrelevante Konzepte und Verfahren zur Vermeidung und Verringerung von Umweltbelastungen vor. Verfahren der Abfallbehandlung werden auf ihre Ressourceneffektivität und Umsetzbarkeit geprüft. Experten aus dem In- und Ausland diskutieren Erfordernisse und Beispiele für eine zeitgemäße Rohstoffwirtschaft.

RHOOMBOS-VERLAG, Postfach 67 02 17, D-10207 Berlin, Tel. 030.261 94 61, Internet: [www.rhombos.de](http://www.rhombos.de), eMail: [verlag@rhombos.de](mailto:verlag@rhombos.de)

# Aschen • Schlacken • Stäube Mineralische Nebenprodukte und Abfälle



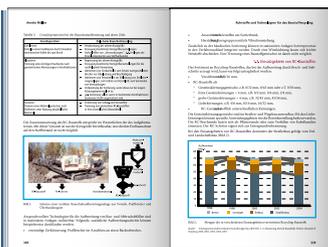
Herausgeber: Thomé-Kozmiensky (et.al.)

2013: <b>Aschen • Schlacken • Stäube</b> – aus Abfallverbrennung und Metallurgie –	ISBN: 978-3-935317-99-3	<b>25,00 EUR</b>
2014: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-11-4	<b>25,00 EUR</b>
2015: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 2</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-21-3	<b>25,00 EUR</b>
2016: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 3</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-28-2	<b>35,00 EUR</b>
2017: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 4</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-35-0	<b>35,00 EUR</b>
2018: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 5</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-41-1	<b>50,00 EUR</b>
2019: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 6</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-47-3	<b>50,00 EUR</b>
2020: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 7</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-53-4	<b>60,00 EUR</b>
2021: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 8</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-54-1	<b>75,00 EUR</b>
2022: <b>Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 9</b> – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –	ISBN: 978-3-944310-58-9	<b>75,00 EUR</b>

Bestellen Sie direkt beim TK Verlag  
oder unter [books.vivis.de](http://books.vivis.de)

## Paketpreis

**225,00 EUR**  
statt 310,00 EUR



Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Dorfstraße 51  
16816 Nietwerder-Neuruppin  
Tel. +49 3391-45 45-0  
E-Mail: [order@vivis.de](mailto:order@vivis.de)

**TK Verlag**

**Deponien**

## Climate Protection Concerns in the Approval of Landfills

Peter Kersandt

Changes in environmental and planning law constantly pose new challenges for project developers and authorities. After nature conservation and species protection law as well as water law, greater weight is now being given to global climate protection (also) in sectoral planning approval decisions.

Against this background, this article deals with how climate protection issues are considered in the planning and approval of landfills. It focuses on the requirements of the Federal Climate Protection Act (Bundes-Klimaschutzgesetz) and the related ruling by the Federal Administrative Court of 4 May 2022 (Ref. 9 A 7/21) on the consideration of global climate protection in sectoral planning. The judgment on the expansion of a federal motorway is also relevant for the approval of landfills because this is also a sectoral planning approval decision.

Section 13 (1) first sentence of the Federal Climate Protection Act provides that public duty bearers must consider the purpose of the Federal Climate Protection Act and the objectives set for its fulfilment in their planning and decision-making. While some federal states now have guidelines on how to interpret and apply the consideration requirement for road construction projects, there are no such guidelines for landfill planning. The article therefore also addresses the question as to whether and to what extent these implementation guidelines can be applied to landfills and whether a sectoral contribution on climate protection law is now required in the context of landfill planning.

The article comes to the conclusion that even in the case of landfill projects, the CO<sub>2</sub>-relevant impacts of the project and the consequences for the climate goals of the Federal Climate Protection Act can be determined with reasonable effort in relation to the concrete planning situation. However, this does not necessarily require GHG emissions to be balanced on the basis of the landfill's GHG life cycle emissions expressed in CO<sub>2</sub> equivalents. It is at present unlikely that the effort required to determine this data can be justified in the sense of the case-law of the Federal Administrative Court. Therefore, the focus in landfill planning and application procedures should rather be on practical measures to reduce CO<sub>2</sub> emissions and other climate protection measures, such as the preparation of the landfill surface as a site for facilities for the generation of renewable energies.

The author would welcome implementation guidelines for the authorities on how to implement the requirement of the Federal Climate Protection Act specifically for landfills. No such guidelines have been available up to now.

# Klimaschutzbelange bei der Zulassung von Deponien

Peter Kersandt

1.	Grundlagen.....	287
2.	Berücksichtigung von Klimaschutzbelangen in der Abwägung.....	288
2.1.	Berücksichtigungsgebot nach § 13 Abs. 1 Satz 1 KSG – Anwendungsbereich .....	288
2.2.	Inhalt des Berücksichtigungsgebots.....	288
2.3.	Anwendung auf Deponien .....	289
2.4.	Gewicht der Klimaschutzbelange in der Abwägung .....	290
3.	Praktische Umsetzung in den Antragsunterlagen.....	291
3.1.	Klimaschutzrechtlicher Fachbeitrag? .....	291
3.2.	Vollzugshilfen im Verwaltungsbinnenrecht .....	292
3.3.	Was folgt daraus für Deponien? .....	293
4.	Abschließende Thesen .....	294

## 1. Grundlagen

Die Errichtung und der Betrieb von Deponien sowie deren wesentliche Änderung bedürfen der Planfeststellung, unter bestimmten Voraussetzungen genügt eine Plan- genehmigung.<sup>1</sup> Das Planfeststellungsverfahren umfasst eine Umweltverträglichkeits- prüfung (UVP).

Die vom Deponievorhaben berührten öffentlichen und privaten Belange sind bei der Planfeststellung und Plangenehmigung im Rahmen einer Abwägung zu be- rücksichtigen. Das sogenannte fachplanerische Abwägungsgebot verlangt von der zuständigen Behörde, die von dem Vorhaben berührten öffentlichen und privaten Belange in einen adäquaten Ausgleich zu bringen.<sup>2</sup> Die Abwägung ist der maßgebliche Anknüpfungspunkt, über den der Klimaschutz – als öffentlicher Belang – Einzug in die Fachplanung erhält.

<sup>1</sup> Vgl. § 35 Abs. 1 und 3 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG).

<sup>2</sup> Neumann/Külpmann, in: Stelkens/Bonk/Sachs, VwVfG, 10. Aufl. 2022, § 74 Rn. 27.

## 2. Berücksichtigung von Klimaschutzbelangen in der Abwägung

### 2.1. Berücksichtigungsgebot nach § 13 Abs. 1 Satz 1 KSG – Anwendungsbereich

Die Berücksichtigung des Klimaschutzes ist gesetzlich angeordnet. Nach § 13 Abs. 1 Satz 1 des Bundes-Klimaschutzgesetzes (KSG)<sup>3</sup> haben die Träger öffentlicher Aufgaben bei ihren Planungen und Entscheidungen den Zweck des KSG und die zu seiner Erfüllung festgelegten Ziele zu berücksichtigen.

Der Zweck des Gesetzes liegt darin, zum Schutz vor den Auswirkungen des Klimawandels die Erfüllung der nationalen und europäischen Zielvorgaben zu gewährleisten (§ 1 Satz 1 KSG). Aus § 13 Abs. 1 Satz 1 KSG ergibt sich somit eine Pflicht für Planungsbehörden, die Auswirkungen ihres Handelns auf das globale Klima zu berücksichtigen, das heißt, die Auswirkungen der Planungsentscheidung auf den Klimaschutz sind zu ermitteln und die Ergebnisse in die Abwägung einzustellen.

Welche Rechtswirkungen die Berücksichtigungspflicht gegenüber der Planungsbehörde entfaltet, hat das Bundesverwaltungsgericht in seinem Urteil vom 4.5.2022 (Az. 9 A 7/21) näher konkretisiert. Obwohl das Bundesverwaltungsgericht über den Ausbau einer Bundesautobahn zu entscheiden hatte, ist die Entscheidung des Gerichts auch für die Zulassung von Deponien von Bedeutung.

### 2.2. Inhalt des Berücksichtigungsgebots

Das Berücksichtigungsgebot verlangt, dass die Auswirkungen der Planungsentscheidung auf das Klimaschutzziel (§§ 1, 3 KSG) ermittelt und in die Abwägung eingestellt werden.<sup>4</sup> Der Maßstab der Berücksichtigung des Aspekts des Klimawandels ergibt sich somit aus §§ 1 und 3 KSG.

§ 1 KSG verweist auf die Verpflichtung nach dem Übereinkommen von Paris (aufgrund der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen), nach der der Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf deutlich unter 2 Grad Celsius und möglichst auf 1,5 Grad Celsius gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen ist, um die Auswirkungen des weltweiten Klimawandels so gering wie möglich zu halten.

§ 3 KSG enthält die nationalen Klimaschutzziele und legt fest, bis zu welchem Zeitpunkt (Jahr) jeweils welche Minderung an THG-Emissionen gegenüber dem Vergleichsjahr (1990) erreicht werden muss. Demnach müssen THG-Emissionen bis zum Jahr 2030 um mindestens 65 % und bis zum Jahr 2040 um mindestens 88 % gesenkt werden. Bis 2045 soll Netto-Treibhausgasneutralität, bis 2050 sollen negative THG-Emissionen erreicht werden.

Im Hinblick darauf ist gemäß dem Urteil des Bundesverwaltungsgerichts vom 4.5.2022 mit einem – bezogen auf die konkrete Planungssituation – vertretbaren Aufwand zu ermitteln, welche CO<sub>2</sub>-relevanten Auswirkungen das jeweilige Vorhaben hat und

<sup>3</sup> Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12.12.2019 (BGBl. I S. 2513), geändert durch Art. 1 des Gesetzes vom 18.8.2021 (BGBl. I S. 3905).

<sup>4</sup> BVerwG, Urteil vom 4.5.2022 – 9 A 7/21, juris Rn. 71; dazu Guckelberger, KlimR 2022, S. 294 (296 f.).

welche Folgen sich daraus für die Klimaschutzziele des Bundes-Klimaschutzgesetzes ergeben.<sup>5</sup> Das Gericht führt in diesem Zusammenhang ausdrücklich aus, dass nach der Gesetzesbegründung zusätzliche Kosten durch Datenerhebungen unter Hinweis auf die ohnehin erfolgende umfassende Datenerhebung ausgeschlossen sind.<sup>6</sup>

Das KSG enthält jedoch keine konkreten Vorgaben dafür, wie diese Verpflichtung umgesetzt werden kann. Offen bleibt damit, welche konkreten Auswirkungen ermittelt werden müssen und wann ein Vorhaben mit klimaschädlichen Nachteilen verbunden ist. Unklar ist ebenso, wie klimaschädliche Nachteile eines Vorhabens in der Abwägungsentscheidung zu berücksichtigen sind. Gleiches gilt für etwaige positive Effekte eines Vorhabens für das globale Klima.

Aufgrund der fehlenden konkreten Vorgaben spricht das Bundesverwaltungsgericht von einem *Rahmengesetz*, das sich in erster Linie an den Gesetzgeber richtet.<sup>7</sup> Daher, so das Gericht, dürften die Anforderungen an das Berücksichtigungsgebot nach § 13 Abs. 1 Satz 1 KSG nicht überspannt werden, müssten *mit Augenmaß* inhaltlich bestimmt und konkretisiert werden und dürften der Behörde keinen unzumutbaren Aufwand abverlangen.<sup>8</sup> Dies gilt laut Bundesverwaltungsgericht zumindest solange, bis Rechtsverordnungen, Verwaltungsvorschriften, Ausführungsvorschriften, Leitfäden o.Ä. vorliegen, die die Verwaltungsbehörden bei der praktischen Umsetzung ihrer Ermittlungs- und Bewertungspflicht zugrunde legen können.<sup>9</sup>

## 2.3. Anwendung auf Deponien

§ 13 Abs. 1 Satz 1 KSG gilt für *Planungen und Entscheidungen*, das heißt zunächst für alle Formen behördlicher Zulassungsentscheidungen (Errichtungsgenehmigungen, Produktgenehmigungen, Betriebsgenehmigungen usw.).

Wirkung kann ein Gebot zur Berücksichtigung bestimmter Belange aber nur dort entfalten, wo ein Ermessens- oder Abwägungsspielraum besteht.<sup>10</sup> Das gilt vor allem für fachplanerische Entscheidungen. Das Berücksichtigungsgebot findet daher auch in Planfeststellungs- und -genehmigungsverfahren für Deponien prinzipiell Anwendung, da es sich dabei um Abwägungsentscheidungen handelt (s.o.).

Für die Anwendbarkeit des Berücksichtigungsgebots auf Abfalldeponien spricht auch, dass die Abfallwirtschaft (neben Industrie, Verkehr usw.) zu den potentiell CO<sub>2</sub>-emittierenden Sektoren gehört, für die im KSG Minderungsziele und Jahresemissionsmengen vorgegeben sind.

<sup>5</sup> BVerwG, Urteil vom 4.5.2022 – 9 A 7/21, juris, Rn. 82.

<sup>6</sup> BVerwG, Urteil vom 4.5.2022 – 9 A 7/21, juris, Rn. 81, unter Bezugnahme auf BT-Drs. 19/14337 S. 21 f.

<sup>7</sup> BVerwG, Urteil vom 4.5.2022 – 9 A 7/21, juris, Rn. 80.

<sup>8</sup> So ausdrücklich BVerwG, ebd.

<sup>9</sup> BVerwG, ebd.

<sup>10</sup> Guckelberger, KlimR 2022, S. 294 (296).

In diesem Zusammenhang muss erwähnt werden, dass die Berücksichtigungspflicht sektorübergreifend im Sinne einer Gesamtbilanz zu verstehen ist. Klimarelevant ist etwa auch der positiv für die Gesamtbilanz wirkende Sektor *Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft* nach § 3a KSG (vgl. Nr. 7 der Anlage 1 zum Gesetz). Zu betrachten ist deshalb, ob durch das Deponievorhaben Klimasenken (z.B. Wald, Feuchtgebiete, Biotope) in Anspruch genommen werden und ggf. ein adäquater Ausgleich an anderer Stelle geschaffen wird.<sup>11</sup>

Für das in der bis zum 15.5.2017 geltenden Fassung des UVPG<sup>12</sup> hat das Bundesverwaltungsgericht außerdem entschieden, dass das KSG keine *Aufladung* und Erweiterung der Umweltverträglichkeitsprüfung um den Aspekt des globalen Klimas zur Folge habe.<sup>13</sup> Besteht im Planfeststellungsverfahren nach den einschlägigen Vorschriften über die Umweltverträglichkeitsprüfung keine Verpflichtung, das globale Klima zu betrachten, wird eine solche Pflicht nicht durch das Bundes-Klimaschutzgesetz erstmals begründet.<sup>14</sup>

Nach der aktuellen Fassung des UVPG gehört dagegen auch das Makroklima zum Gegenstand der Prüfung (vgl. Anlage 4 Nr. 4 Buchst. b) und Buchst. c) Doppelbuchst. gg) UVPG). Damit ist es nunmehr angezeigt, die möglichen Auswirkungen von UVP-pflichtigen Deponievorhaben auf Veränderungen des Klimas, z.B. durch THG-Emissionen, zu beschreiben.<sup>15</sup> Solche Auswirkungen dürften allerdings schwer zu bemessen sein.<sup>16</sup>

## 2.4. Gewicht der Klimaschutzbelange in der Abwägung

Wenn die Behörde die klimarelevanten Auswirkungen des Deponievorhabens ermittelt hat, stellt sich die Frage, ob die Deponie unter diesem Gesichtspunkt planfestgestellt bzw. -genehmigt werden kann. Dazu ist dieser Belang zu gewichten und mit dem ihm gebührenden Gewicht in die Abwägung einzustellen.

Wie oben ausgeführt, sind die Belange des Klimaschutzes unter dem Gesichtspunkt der globalen Klimaauswirkungen und der nationalen Klimaschutzziele im Rahmen der Gesamtabwägung zu berücksichtigen. Allerdings stellt das Berücksichtigungsgebot des § 13 Abs. 1 Satz 1 KSG keine gesteigerte Beachtungspflicht und kein Optimierungsgebot dar. Das heißt, dass die Planung nicht (allein) darauf auszurichten ist, klimaschädliche Auswirkungen möglichst weitgehend zu reduzieren. Aus dem KSG folgt also kein grundsätzlicher Vorrang des Klimaschutzes in der Abwägung.<sup>17</sup>

<sup>11</sup> Vgl. BVerwG, Urteil vom 4.5.2022 – 9 A 7/21, juris, Rn. 83.

<sup>12</sup> Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung in der Fassung der Bekanntmachung vom 18.3.2021 (BGBl. I S. 540), zuletzt geändert durch Art. 2 des Gesetzes vom 22.3.2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88).

<sup>13</sup> BVerwG, Urteil vom 4.5.2022 – 9 A 7/21, juris, Rn. 66.

<sup>14</sup> BVerwG, ebd.

<sup>15</sup> Leontopoulos/Hönig, UPR 2022, S. 361 ff.

<sup>16</sup> So zu Recht Hamacher, Schink/Reidt/Mitschang, UVPG, 2. Aufl. 2023, § 2 Rn. 30 m. w. N.

<sup>17</sup> BVerwG, Urteil vom 4.5.2022 – 9 A 7/21, juris, Ls. 6 und Rn. 85; Uechtritz/Ruttloff, NVwZ 2022, S. 9 (11).

Eine *Abwägung* setzt vielmehr voraus, dass eine Gegenüberstellung der Belange im konkreten Fall erfolgt, ohne dass das Ergebnis vorher feststeht.<sup>18</sup> Die Erkenntnisse der Behörde müssen in der Abwägung (lediglich) berücksichtigt, können im Einzelfall aber überwunden werden. So bildet bspw. der Lkw-Verkehr zu einer Deponie in aller Regel kein Zulassungshindernis unter dem Gesichtspunkt des Klimaschutzes.

Dafür, dass dem Klimaschutzgebot trotz seiner verfassungsrechtlichen Bedeutung kein Vorrang gegenüber anderen Belangen zukommt, spricht schon, dass sich die von der Behörde vorzunehmende Abwägung der planbetroffenen Belange bei Deponien stets am Wohl der Allgemeinheit in Gestalt des öffentlichen Interesses an einer umweltgerechten Abfallentsorgung zu orientieren hat. Die Abfallentsorgung ist unabhängig vom Vorhabenträger (öffentlich-rechtlich oder privat) stets eine Aufgabe der Daseinsvorsorge und Maßnahme des Umweltschutzes und verfolgt damit Gemeininteressen von hoher Bedeutung.<sup>19</sup>

Die Zulassung eines Deponievorhabens ist somit in aller Regel trotz zusätzlicher CO<sub>2</sub>-Emissionen abwägungsfehlerfrei möglich. Dies gilt für die Neuerrichtung von Deponien wie deren wesentliche Änderung/Erweiterung gleichermaßen.

### 3. Praktische Umsetzung in den Antragsunterlagen

#### 3.1. Klimaschutzrechtlicher Fachbeitrag?

Es wurde bereits ausgeführt, dass die Planfeststellungsbehörden die klimarelevanten Auswirkungen des Vorhabens *mit vertretbarem Aufwand*<sup>20</sup> zu ermitteln und in die Abwägung einzubeziehen haben. Dazu sind Angaben in den Antragsunterlagen erforderlich.

Hilfreich wäre eine standardisierte Prüfung, für die es jedoch bislang an (verbindlichen) Vorgaben fehlt. Denkbar ist die Erstellung einer dem artenschutz- oder wasserrechtlichen Fachbeitrag vergleichbaren Unterlage, in der die Vorgaben des § 13 Abs. 1 Satz 1 KSG abgearbeitet werden. Anhand eines solchen *Fachbeitrags Klimaschutz* könnte die Behörde die Belange des Klimaschutzes in die Abwägung einstellen.

Zwingend gefordert ist die Erstellung eines eigenen Fachbeitrags zum Klimaschutz jedoch nicht. Ausreichend ist vielmehr jede Unterlage mit einschlägigen Ausführungen oder auch eine Darlegung im Erläuterungsbericht oder UVP-Bericht, die die Behörde in die Lage versetzt, die Belange des Klimaschutzes in die Abwägung einzustellen und das Abwägungsergebnis in der Planbegründung zu dokumentieren.<sup>21</sup>

<sup>18</sup> Vgl. Uechtritz/Ruttloff, NVwZ 2022, S. 9 (12).

<sup>19</sup> BVerwG, Urteil vom 9.3.1990 – 7 C 21/89, juris, Rn. 10 f.

<sup>20</sup> BVerwG, Urteil vom 4.5.2022 – 9 A 7/21, juris, Ls. 6 und Rn. 81 a. E.

<sup>21</sup> Vgl. BVerwG, Urteil vom 4.5.2022 – 9 A 7/21, juris, Rn. 75.

### 3.2. Vollzugshilfen im Verwaltungsbinnenrecht

Rechtsverordnungen, Verwaltungsvorschriften, Ausführungsvorschriften, Leitfäden oder Vollzugshilfen, die der Behörde Anhaltspunkte geben könnten, was genau geprüft werden muss, existieren nicht in einer allgemeinverbindlichen Form.<sup>22</sup>

Vereinzelt lassen sich aber bereits Vollzugshilfen und Leitfäden von Landesbehörden finden, die den entscheidenden Behörden bestimmter Fachgebiete eine bessere Bewertung der Klimarelevanz eines Vorhabens ermöglichen. Insbesondere für die Straßenplanung existieren in mehreren Bundesländern Anleitungen zur Berücksichtigung des globalen Klimaschutzes.<sup>23</sup>

In Mecklenburg-Vorpommern etwa unterteilt sich die Bewertung der Klimaschutz Auswirkungen von Straßen in das Ausfüllen einer Checkliste und das anschließende Erstellen eines Fachbeitrags Klimaschutz. Dabei wird zunächst unterschieden, ob es sich um einen *einfachen Fall* ohne besondere Klimaauswirkungen handelt oder um einen solchen, in dem die Durchführung einer vollständigen Prüfung geboten ist.<sup>24</sup> Diese Vorgehensweise erinnert an die Vorprüfung zur Feststellung der UVP-Pflicht eines Vorhabens vor der eigentlichen, umfangreichen UVP (vgl. § 7 UVPG).

Das bayerische Methodenpapier zur Berücksichtigung des globalen Klimas bei der Straßenplanung empfiehlt, die zu erwartenden Emissionssteigerungen und -senkungen auf verschiedenen Ebenen zu berücksichtigen.<sup>25</sup> Anders als in Mecklenburg-Vorpommern soll hier jedoch die Einstellung in den UVP-Bericht und Darstellung im Gesamterläuterungsbericht ausreichen und auf einen eigenständigen Fachbeitrag verzichtet werden können.<sup>26</sup>

Nach dem bayerischen Methodenpapier werden zunächst die Lebenszyklusemissionen ermittelt. Diese hängen von der Streckenlänge und -breite, den Brücken- und Tunnelabschnitten ab. Sodann müssen die zu erwartenden verkehrsbedingten THG-Emissionen anhand der Verkehrszahlen berechnet werden. Zudem ist die Landnutzungsänderung durch das konkrete Vorhaben zu ermitteln. Hierfür ist entscheidend, ob besonders klimarelevante Böden oder Biotoptypen in Anspruch genommen werden und ob bzw. welche Kompensationsmaßnahmen durchgeführt werden. Abschließend erfolgt eine Gesamtbewertung der klimarelevanten Auswirkungen des Straßenbauvorhabens.

<sup>22</sup> BVerwG, Urteil vom 4.5.2022 – 9 A 7/21, juris, Rn. 80.

<sup>23</sup> Siehe z.B. Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr, Methodenpapier zur Berücksichtigung des globalen Klimas bei der Straßenplanung in Bayern, 2022 (Methodenpapier Straße BY); Landesamt für Straßenbau und Verkehr Mecklenburg-Vorpommern, Arbeitshilfe zur Erstellung eines Fachbeitrags Klimaschutz für Straßenbauvorhaben in Mecklenburg Vorpommern, 2022 (Arbeitshilfe Straße MV).

<sup>24</sup> Arbeitshilfe Straße MV, S. 39.

<sup>25</sup> Methodenpapier Straße BY, S. 6 ff.

<sup>26</sup> Methodenpapier Straße BY, S. 6.

Im bayerischen Methodenpapier finden sich ausdifferenzierte Tabellen und Listen, mit deren Hilfe die Lebenszyklusemissionen und die Emissionen aus der Landnutzungsänderung anhand diverser Parameter (Strecke, Breite, Landnutzungstyp, Fläche etc.) ermittelt werden können.

### 3.3 Was folgt daraus für Deponien?

Mangels Vollzugshilfen für die Prüfung des Klimaschutzes bei Deponievorhaben drängt sich die Frage auf, ob bzw. inwieweit die für den Straßenbau entwickelten Methodenpapiere hierfür herangezogen werden können.

Einerseits erscheint es grundsätzlich möglich, auch bei Deponien die sich aus den bau-, unterhaltungs- und betriebsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen zusammengesetzten Lebenszyklusemissionen sowie die landnutzungsbedingten THG-Emissionen zu ermitteln. Andererseits stellt sich die Frage, ob die Ermittlung dieser Daten – bezogen auf die konkrete Planungssituation einer Deponie – mit vertretbarem Aufwand im Sinne der oben zitierten Rechtsprechung des Bundesverwaltungsgerichts möglich ist. Dies scheint – zumindest derzeit – nicht der Fall zu sein, denn anders als bei den im Projektinformationssystem (PRINS) zum Bundesverkehrswegeplan 2030 aufgeführten Straßenbauprojekten<sup>27</sup> sind Basisdaten für die einem Deponievorhaben zuzurechnenden THG-Emissionen nicht ohne Weiteres zugänglich, sondern es müssen bspw. für die in den jeweiligen Teilbereichen einer Deponie (Oberflächenabdichtung, Verkehrsflächen, Entwässerungsanlagen, sonstige Betriebsanlagen) verwendeten Baumaterialien die CO<sub>2</sub>-Äquivalente je Mengeneinheit/Baustoff und Lebensdauer aufwändig ermittelt werden.

Dies und die weiteren wesentlichen Unterschiede zwischen Straßenbau- und Deponievorhaben sprechen gegen eine 1:1-Heranziehung der für den Straßenbau entwickelten Methodenpapiere auf die Deponiezulassung:

- Im Gegensatz zu Straßenbauprojekten werden Deponien häufig an vorgennutzten bzw. vorbelasteten Standorten realisiert, beispielsweise auf Flächen, die zum Rohstoffabbau genutzt wurden, auf Verfüllungen oder auf einer bestehenden Deponie (*Deponie auf Deponie*).
- Eine Abfalldeponie ist im Gegensatz zu einer Straße stets und von vornherein auf eine bestimmte Laufzeit angelegt, die von dem beantragten und planfestgestellten Deponievolumen abhängt. Wenn die Verfüllung einer Deponie mit Abfällen zur Beseitigung abgeschlossen ist, beginnt die Stilllegungsphase. Der sichere Abschluss einer Deponie durch die Herstellung eines Oberflächenabdichtungssystems, die Rekultivierung und die Rückgliederung in die Landschaft sind in der Zulassungsentscheidung verpflichtend geregelt, so dass auf lange Sicht eine rekultivierte Naturlandschaft verbleibt. Zusätzlich oder alternativ kann die Deponie für eine klimafreundliche Folgenutzung, z.B. durch Anlagen zur Herstellung erneuerbarer Energien (Photovoltaik), vorbereitet werden.

<sup>27</sup> Vgl. dazu BVerwG, Urteil vom 4.5.2022 – 9 A 7/21, juris, Rn. 89 ff.

- In allen Phasen der Deponierrichtung, des Deponiebetriebs und der Stilllegung kommen zahlreiche Klimaschutzoptionen, z.B. die Anlage eines Klimaschutzwalds, trockenheitsresistente Wiederaufforstung, der Einsatz erneuerbarer Energien zur Stromversorgung oder ein *klimafreundliches* Wassermanagement (Ableitung und Weiternutzung des Oberflächenwassers), in Betracht und können vom Vorhabenträger in die Planung eingebracht werden.

Schließlich gilt es nochmals zu betonen, dass die Abfallentsorgung eine Aufgabe der Daseinsvorsorge und zugleich eine Maßnahme des Umweltschutzes ist. Mit der Errichtung und dem Betrieb von Deponien werden mithin, unabhängig davon, ob es sich um einen öffentlich-rechtlichen oder privaten Vorhabenträger handelt, Gemeininteressen von hoher Bedeutung verfolgt.<sup>28</sup> Auch unter diesem Gesichtspunkt stellt sich die Frage, welcher Aufwand für die Ermittlung der vorhabenbedingten THG-Emissionen gerechtfertigt ist, wenn die Abwägung ungeachtet zusätzlicher CO<sub>2</sub>-Emissionen in aller Regel zugunsten des Deponievorhabens ausfällt.

#### 4. Abschließende Thesen

Rechtsprechung und Vollzugshilfen zur Berücksichtigung des Klimaschutzes bei der Deponiezulassung liegen bislang nicht vor. Ausgehend von dem Urteil des Bundesverwaltungsgerichts vom 4.5.2022 zum Klimaschutz bei Straßenbauprojekten werden die vorläufigen Erkenntnisse zu den Anforderungen des Bundes-Klimaschutzgesetzes bei Deponievorhaben thesenartig wie folgt zusammengefasst:

- Auch bei Deponievorhaben ist zu ermitteln, welche CO<sub>2</sub>-relevanten Auswirkungen das Projekt hat und welche Folgen sich daraus für die Klimaziele des Bundes-Klimaschutzgesetzes ergeben. Wenngleich damit die Klimaziele als (mit-)entscheidungs-erhebliche Gesichtspunkte in die Abwägung eingestellt werden, fällt diese trotz zusätzlicher CO<sub>2</sub>-Emissionen in aller Regel zugunsten des Deponievorhabens aus, weil Deponien nach ständiger Rechtsprechung hohe Bedeutung für die ordnungsgemäße und umwelt-gerechte Abfallentsorgung im Gemeinwohlinteresse zukommt.
- Das Bundes-Klimaschutzgesetz verlangt nach der Rechtsprechung des Bundesverwaltungsgerichts eine Ermittlung der dem jeweiligen Fachplanungsvorhaben zurechenbaren CO<sub>2</sub>-Emissionen mit – bezogen auf die konkrete Planungssituation – vertretbarem Aufwand. Die Abschätzung der THG-Lebenszyklusemissionen einer Deponie erfordert nach aktuellem Stand umfangreiche Ermittlungen in Bezug auf die CO<sub>2</sub>-Äquivalente z.B. für Baustoffe, Maschineneinsatz, Deponiegut, Transporte usw. und damit einen Aufwand, der jedenfalls derzeit nicht vertretbar erscheint und vom Vorhabenträger folglich nicht gefordert werden kann. Der Fokus bei der Deponieplanung und Antragstellung sollte vielmehr auf begleitenden Maßnahmen zur Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und anderen Klimaschutzmaßnahmen wie der Vorbereitung der Deponieoberfläche für Anlagen zur Gewinnung erneuerbarer Energien liegen.

<sup>28</sup> BVerwG, Urteil vom 9.3.1990 – 7 C 21/89, juris, Rn. 10 f.

- Vollzugshilfen für die Umsetzung des Berücksichtigungsgebots des Bundes-Klimaschutzgesetzes bei der Zulassung von Deponie liegen bislang nicht vor. Nicht, jedenfalls nicht *1:1* heranzuziehen sind die Methodenpapiere zum Klimaschutz bei Straßenbauvorhaben, da die Unterschiede zwischen beiden Fachplanungen – gerade auch im Hinblick auf die Klimarelevanz – erheblich sind. Wünschenswert wären deshalb Vollzugshilfen speziell für Deponien, die sich vor allem mit Klimaschutzoptionen bei der Deponieplanung befassen und die Anforderungen des Bundes-Klimaschutzgesetzes mit für diese Fachplanung vertretbarem Aufwand umsetzen.

### Ansprechpartner



**Rechtsanwalt Dr. Peter Kersandt**

avr Andrea Versteyl Rechtsanwälte

Partnerschaftsgesellschaft mbB

Partner

Hohenzollerndamm 122

14199 Berlin, Deutschland

+49 30 3180 417 0

Kersandt@avr-rechtsanwaelte.de

## Influence of Hydraulic Effects on Leachate Quality of Bottom Ash Landfills in Switzerland

Philipp Ingold and Gisela Weibel

In Switzerland, MSWI bottom ash is deposited in open landfills. The interaction with infiltrated rainwater leads to production of polluted leachates, whose quality is defined as key criteria for determining the actual and future landfill condition. Based on Swiss waste regulations, the leachate must be discharged into a near surface water system 50 years latest after completion of the landfill. Due to the lack of basic information on the development of landfill bodies with bottom ash, the course of the leachate quality can only be inadequately predicted. Therefore, the hydraulic and geochemical behaviour of Swiss bottom ash landfills and the dynamics of the leachate are currently being investigated in detail. It is the goal to describe general processes occurring in bottom ash landfills and predict the future development of the landfills and their leachates.

The investigations show that bottom ash landfills have similar properties of naturally formed layered soils. Due to the horizontal deposition, sequences with fine-grained, compacted material, and coarse-grained, skeletal layers are formed. The entire landfill body shows unsaturated conditions. Local saturation may be reached during heavy precipitation events. A dye tracer experiment visualized infiltrating rainwater, which firstly penetrates homogeneously into the landfill, but formed preferential flow paths when reaching coarse-grained layers. The flow paths are surrounded by diffusive zones with elevated water content, that decreases with increasing the distance to the preferential flow path. Most parts of the landfill body show no increase in water content and is therefore not affected by the simulated heavy rain event.

Leachate samples show alkaline conditions and high electrical conductivity values (EC). Na, K, Ca, Cl, and  $\text{SO}_4$  are identified as main components, while heavy metals usually show low concentration values. During heavy precipitation events, dilution effects are documented by decreasing EC and main ion concentrations. On the other side, pH value and various heavy metals show an increase in concentration with increasing discharge. The investigations show that the leachate composition is mainly connected to hydraulic aspects of the landfill. Due to the connection to weather conditions, the entire system is considered as dynamic and therefore challenging to predict. With the help of defining variable porewater systems with different interaction times, the observed phenomena can be explained. Flushing effects, induced by the preferential flow system, is responsible for mobilisation of highly concentrated porewaters, which then lead to the observed increase in pH and heavy metal concentration.

In the further course of the study, an attempt is made to identify generally valid processes from the investigations of various bottom ash landfills and to represent them with the aid of hydraulic and geochemical models. The model forms the basis for more precise predictions on the future development of the bottom ash landfill system.

## Einfluss von hydraulischen Effekten auf die Sickerwasserqualität von Schlackendeponien in der Schweiz

Philipp Ingold und Gisela Weibel

1.	Abfallbehandlung und Deponierung in der Schweiz.....	297
2.	Deponieentwicklung und Emissionsprognose.....	298
3.	Deponiestruktur und hydraulische Eigenschaften einer Schlackendeponie .....	298
4.	Witterungsabhängige Zusammensetzung von Sickerwasser .....	300
5.	Einfluss des Wasserflusses auf die Sickerwasserzusammensetzung.....	302
6.	Zusammenfassung und Ausblick.....	303
7.	Quellen.....	303

### 1. Abfallbehandlung und Deponierung in der Schweiz

Seit dem Jahr 2000 verpflichtet sich die Schweiz ihre rund 4 Millionen Tonnen Siedlungsabfälle aus Industrie und Haushalten vollumfänglich thermisch zu behandeln. Dabei entstehen in insgesamt 30 Kehrriechtverwertungsanlagen etwa 670.000 Tonnen KVA-Schlacke (umgangssprachlicher Begriff für MV-Rostasche in der Schweiz) [1]. Bei der thermischen Verwertung steht dabei die Reduktion der Schadstoffgefährdung des Abfalls durch Zerstörung und/oder Immobilisierung von Stoffen im Vordergrund [8]. Die Schlacke wird meist direkt nach der Verbrennung mithilfe eines Wasserbads abgeschreckt und ausgetragen. In den letzten Jahren haben diverse Schweizer Anlagen auf einen Trockenaustrag umgestellt. Die Vorteile des Trockenaustrags werden darin gesehen, dass die abgetrennten Metallfraktionen in einer höheren Reinheit anfallen.

Die Schweizer Gesetzgebung unterscheidet fünf Deponietypen (Typ A – D), in welche Abfälle abhängig des Verschmutzungsgrades abgelagert werden. Für die Ablagerung der KVA-Schlacken sind Deponien des Typs D vorgesehen, wobei Qualitätsanforderungen an die KVA-Schlacken gestellt werden (TOC < 2 Gew.-%, Nichteisenmetallgehalt < 1 Gew.-%) [8]. Während der TOC-Gehalt im Wesentlichen durch den Verbrennungsprozess gesteuert wird, ermöglichen physikalische Aufbereitungsprozesse (Magnetabscheidung, Induktionstrennverfahren, etc.) die Senkung des Restmetallgehalts und Rückgewinnung wertvoller Metalle. Die Schlacke wird im Anschluss auf offenen

Deponieanlagen meist mehrere Wochen zwischengelagert und im Anschluss in rund 50 cm mächtigen Schichten in die Deponie eingebaut und mithilfe einer Walze verdichtet. Durch die offene Deponiestruktur entsteht bei Kontakt von infiltrierendem Regenwasser mit der hochreaktiven Schlacke ein kontaminiertes Sickerwasser. Dies wird kontrolliert gefasst und gemäß den Richtlinien des schweizerischen Gewässerschutzgesetzes in die Kanalisation abgeführt [7]. Nach Abschluss der Schlackenablagerung in der Deponie wird eine gesetzlich klar definierte Oberflächenabdeckung vorgenommen [8].

## 2. Deponieentwicklung und Emissionsprognose

Mit dem Abschluss der Deponie beginnt die Nachsorgephase, in welcher die Schadstoffkonzentration im Sickerwasser in Bereiche gelangen soll, um es unter Einhaltung strikter Grenzwerte in ein nahes Oberflächengewässer einleiten zu können. Die aktive Nachsorgephase ist in der Schweiz gesetzlich auf 50 Jahre geregelt, wobei in dieser Zeit eine aktive Unterstützung zur Emissionsreduktion möglich ist. Hinsichtlich der mittel- bis langfristigen Deponieentwicklung herrscht in der Schweiz sowohl seitens Deponiebetreiber als auch bei den Kantonen, als Kontroll- und Vollzugsorgan, eine Unsicherheit. Aufgrund der fehlenden Grundlagen zur hydraulischen und geochemischen Entwicklung von Deponiekörpern mit KVA-Schlacke kann der Verlauf der Sickerwasserqualität nur ungenügend vorhergesagt werden.

Mit einer Grundlagenstudie wird deshalb aktuell das hydraulische und geochemische Verhalten von Schweizer Schlackendeponien und die Dynamik der Sickerwässer detailliert untersucht. An vier Standorten mit unterschiedlich alten Schlackenkompartimenten (3 – 35 Jahre) wurden umfangreiche Feldversuche zur Ermittlung der hydraulischen und geochemischen Eigenschaften von abgelagerter KVA-Schlacke durchgeführt und mit Laborversuchen ergänzt. Weiter wurden zahlreiche Sickerwasserproben bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen beprobt und analysiert. Das Ziel der Studie ist die modellhafte Beschreibung von allgemein gültigen Prozessen in Schlackendeponien als Grundlage für eine bessere Emissionsprognose.

## 3. Deponiestruktur und hydraulische Eigenschaften einer Schlackendeponie

Im Rahmen von Färbversuchen konnten Einblicke in die Deponiestruktur, die Infiltration von Wasser sowie dessen Fluss in Schlackendeponien gewonnen werden (Bild 1). Der Aufbau einer Schlackendeponie ähnelt einem natürlichen, geschichteten Boden. Die generell horizontale Struktur kommt durch die angewandte Einbautechnik zustande. Die repetitive Verdichtung der einzelnen Einbausequenzen äußert sich durch eine feinkörnige kompaktierte Schicht (5 – 15 cm), welche durch die Walzung entsteht. Darunter folgt jeweils eine grobkörnige, skelettgestützte Schicht (20 – 35 cm), welche im Wesentlichen durch die Schüttung entsteht. Die Einbaudichte der Schlacke beträgt etwa  $1,50 \text{ t/m}^3$  und zeigt eine Porosität von 50 Vol.-%. Der Wassergehalt der eingebauten Schlacke schwankt als Funktion der Witterung, weist jedoch im Mittel am

untersuchten Standort etwa 17,2 Gew.-% auf, während der gesättigte Wassergehalt etwa 34,3 Gew.-% beträgt. So zeigt sich, dass in der Deponie, ähnlich wie in natürlichen Böden, ungesättigte Bedingungen vorherrschen.

Die Färbversuche erlauben eine Einteilung des Deponiekörpers in vier verschiedene hydraulische Zonen. Die aufgetragene Lösung zeigt in den obersten 5 – 10 cm der Deponie eine homogene Infiltration (Bild 1, Zone A). Mit zunehmender Tiefe wird das Fließmuster zunehmend heterogener und erzeugt lokal präferentielle Fließzonen (Bild 1, Zone B), welche vorwiegend vertikale Fließrichtung aufweisen. Diese zeigen während Niederschlagsereignissen gesättigte Bedingungen, wodurch hohe Fließgeschwindigkeiten (mm/s bis cm/s) erreicht werden. Dies führt dazu, dass das Sickerwasservolumen kurze Zeit nach einem Niederschlagsereignis rasch ansteigt. Feinkörnigere, verdichtete Abschnitte bilden Stauer, in welchen eine eher homogene, horizontale Ausbreitung der Farblösung zu beobachten ist. Solche Stausysteme sind essenziell für die Bildung von präferentiellen Fließpfaden. Aufgrund von ungenügendem Wassernachschub aus diesen Sequenzen kollabiert das homogene Fließfeld im grobkörnigeren, darunterliegenden Abschnitt, wodurch ein *Fingering* entsteht [3]. Die gefärbten Zonen sind von einer ungefärbten Feuchtzone (Bild 1, Zone C) umgeben, welche durch das Befeuchten der Oberfläche vor dem Färbversuch oder durch diffusive Effekte zu erklären sind. Mit zunehmender Entfernung zum präferentiellen Fließsystem nimmt der Wassergehalt stetig ab bis Vorversuchsbedingungen mit einem mittleren Wassergehalt von 17,2 Gew.-% vorhanden sind. Dieser Teil der Deponie (Bild 1, Zone D) wird durch den durchgeführten Versuch nicht beeinflusst und zeigt deshalb keine Änderung des Wassergehalts.

Die gefärbten Bereiche (Bild 1, Zone A und B) nehmen etwa 10 Vol.-% des Profils ein, während die vom Versuch beeinflusste, jedoch ungefärbte Zone (Bild 1, Zone C) etwa 20 Vol.-% einnehmen. Der größte Teil des Deponieabschnitts (etwa 70 Vol.-%) zeigt keine Beeinflussung durch den Versuch (Bild 1, Zone D).

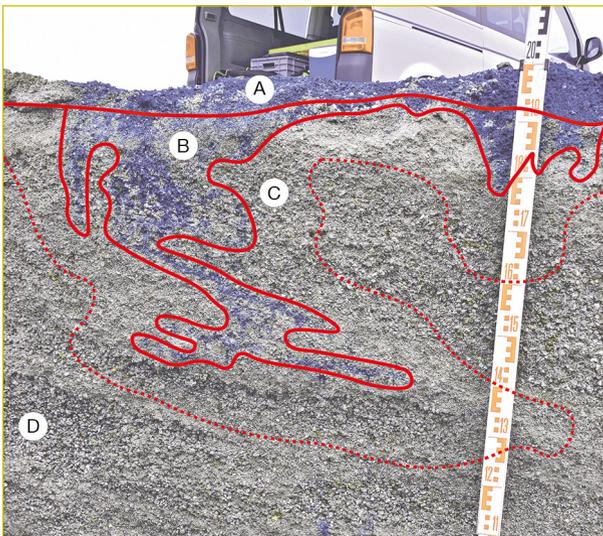


Bild 1:

Querschnitt einer Schlackendeponie nach einem Färbversuch mit Brilliant Blue FCF. Dabei sind die verschiedenen Einbausequenzen und Fließzonen sichtbar. Die Infiltrationszone (A) beschreibt die an der Oberfläche lokalisierte Zone, in welche die Farblösung homogen eindringt. Mit zunehmender Tiefe sind präferentielle Fließzonen sichtbar (B), welche von einer diffusiven, feuchten Zone (C) umgeben sind. Mit zunehmender Distanz zur gefärbten Zone nimmt der Wassergehalt stetig ab, bis Vorversuchsbedingungen (initialer Wassergehalt vor dem Auftragen der Farblösung) erreicht sind, welche als Zone D bezeichnet wird.

## 4. Witterungsabhängige Zusammensetzung von Sickerwasser

Sickerwasserproben, welche in einem Intervall von zwei Wochen über mehrere Monate an den diversen Deponiestandorten entnommen wurden, ergeben eine umfangreiche Übersicht zu den durchschnittlichen, witterungsunabhängigen Schadstoffkonzentrationen nach einigen Jahren Ablagerung der Schlacke (detaillierte Datensätze in [4]). Alle Sickerwässer weisen durchgehend alkalische pH-Bedingungen auf (pH 7,2 – 9,3) mit hohen elektrischen Leitfähigkeitswerten (LF 5,6 – 37,5 mS/cm). Es zeigt sich, dass LF und pH-Wert während trockenen Phasen (d.h. Abnahme des Abflusses (Q)) eine Zunahme aufweisen. Natrium (Na), Kalium (K) und Calcium (Ca) sind als Hauptkationen vertreten und bilden gemeinsam mit Chlorid (Cl) und Sulfat (SO<sub>4</sub>) auf anionischer Seite den größten Anteil des Sickerwassers. Schwermetalle und andere, mit Grenzwerten versehene Parameter (z.B. gelöster organischer Kohlenstoff (DOC)) [7], tragen zur Fracht nur einen kleinen Teil bei. Es zeigt sich, dass Schwermetalle generell tiefe Konzentrationswerte aufweisen und während gemäßigten Witterungsbedingungen mit Ausnahme von Kupfer (Cu) (Grenzwert = 0,5 mg/l), Molybdän (Mo) (Grenzwert = 1 mg/l) und DOC (Grenzwert = 10 mg/l) keine Überschreitungen aufweisen [7].

Tabelle 1: Durchschnittliche, minimale und maximale Konzentrationswerte von ausgewählten Parametern im Sickerwasser an einem der untersuchten Deponiestandorte. Zusätzlich dargestellt sind Konzentrationswerte während eines Starkniederschlagsereignisses bei maximalem Abfluss (Q).

	Einheit	Durchschnittskonzentration			Konzentration während Starkniederschlagsereignis
		Mittel	Min	Max	
pH	-	7,85	7,60	8,09	8,76
LF	mS/cm	22,40	19,39	26,60	6,35
Q	l/min	12,58	9,50	15,21	824
Na	mg/l	4.006	3.496	4.498	1.446
K		1.198	1.086	1.325	296
Ca		494	410	576	280
Mg		19,4	15,0	21,5	10,8
Cl		6.804	5.771	7.683	1.391
SO <sub>4</sub>		1.910	1.699	2.241	999
HCO <sub>3</sub>		149	112	193	97,3
NO <sub>3</sub>		150	99,1	181	45,6
Al		0,14	0,05	0,56	1,29
B		1,64	1,43	2,15	0,84
Cr		0,02	0,02	0,02	0,02
Cu		0,04	0,03	0,06	0,02
Fe		0,20	0,02	0,52	0,32
Mo		1,16	1,01	1,36	0,28
Ni		< 0,01	-	-	< 0,01
Pb		0,02*	-	-	0,02
Sb		0,06	0,05	0,08	0,06
V		0,02	0,01	0,02	0,04
Zn		0,05	0,02	0,14	0,08
DOC		10,4	5,64	28,2	6,46

\* Einzelwert; übrige Proben zeigen Konzentrationen unter Nachweisgrenze

Durch Beprobungen während Starkniederschlagsereignissen konnten deutliche Veränderungen der Sickerwasserzusammensetzung festgestellt werden. Tabelle 1 zeigt die durchschnittlichen Schadstoffkonzentrationen während des Jahres (Mittel, Min, Max) sowie die Konzentrationen eines Ereignisses bei höchstem Abflussvolumen an einem der untersuchten Deponiestandorte. Zudem sind in Bild 2 zeitliche Verläufe von pH-Wert, LF und Q sowie Konzentrationen ausgewählter Parameter während des Niederschlagsereignisses dargestellt. Es zeigt sich, dass bei Zunahme des Abflussvolumens die elektrische Leitfähigkeit abnimmt, während der pH-Wert des Sickerwassers eine Zunahme verzeichnet. Die Abnahme der LF zeigt sich auch in den Konzentrationen der Hauptelemente (Na, K, Ca, Cl, SO<sub>4</sub>), welche mit zunehmendem Fluss stetig abnehmen. Abnehmende Trends sind auch bei Molybdän (Mo) zu beobachten. Im Gegensatz dazu weisen zahlreiche Schwermetalle wie Aluminium (Al), Eisen (Fe), Chrom (Cr), Kupfer (Cu), Blei (Pb), Antimon (Sb) und Zink (Zn) bei zunehmendem Fluss eine Konzentrationszunahme auf.

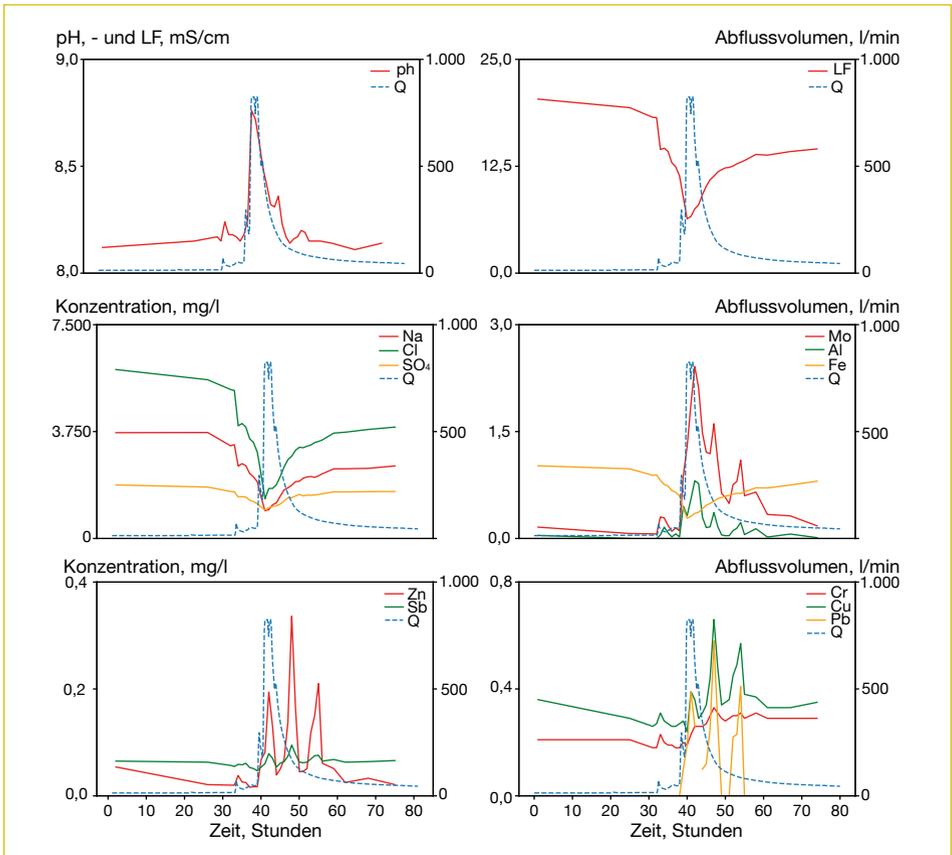


Bild 2: Gemessene pH-, Leitfähigkeits- (LF) und Abflusswerte (Q), sowie Konzentrationsverläufe von Na, Cl, SO<sub>4</sub>, Mo, Al, Fe, Zn, Sb, Cr, Cu und Pb von Sickerwasser aus einer Schlackendeponie während eines Starkniederschlagsereignisses im September 2022. Stunde 0 = 14.09.2022 05:00

Deponien

## 5. Einfluss des Wasserflusses auf die Sickerwasserzusammensetzung

Die erarbeiteten Erkenntnisse erlauben einen erweiterten Einblick in den Wasserhaushalt einer Schlackendeponie. Während geochemische Prozesse die Bandbreiten der Konzentrationen festlegen, in welchen sich die Sickerwasserzusammensetzung bewegt, sorgt die hydraulische Komponente des Systems für die beobachteten Schwankungen [5].

Um die witterungsabhängige Dynamik der Sickerwasserkonzentrationen zu erklären, ist die nähere Betrachtung des Porenwassersystems im Deponiekörper essenziell. Verglichen zu einem gesättigten System, sind bei ungesättigten Bedingungen, wie es in Schlackendeponien meist der Fall ist, tendenziell längere Aufenthaltszeiten des Wassers im Deponiekörper möglich (tiefere hydraulischen Leitfähigkeit). Dies erlaubt erhöhte Wechselwirkungsgrade der Schlacke mit dem Wasser, was zu erhöhten Schadstoffkonzentrationen im Sickerwasser führt. Trotz der vorhandenen Interaktionszeit zwischen Wasser und der abgelagerten Schlacke kann kaum von einem thermodynamischen Gleichgewicht der Porenwässer ausgegangen werden [5, 6]. Dabei hängt der Grad der Interaktion weitestgehend von den hydraulischen Gegebenheiten im Deponiekörper ab. So ist davon auszugehen, dass Mikroporenwasser näher am Gleichgewicht mit der abgelagerten Schlacke liegt als Makroporenwasser. Die Kapillarkräfte sorgen für längere Aufenthaltszeiten, wodurch der Interaktionsgrad in kleineren Porensystemen höher ausfällt. Dies äußert sich durch eine näher am Gleichgewicht liegende Sickerwasserzusammensetzung, für welche der pH-Wert der Lösung als dominantester Faktor angesehen wird. Eluatversuche helfen dabei, das chemische Gleichgewicht zwischen Schlacke und Wasser zu beschreiben. Solche Laborversuche zeigen stark alkalische Bedingungen (pH 12) [2], während die pH-Werte der Deponiesickerwässer im Bereich von 7,2 – 9,3 liegen. Weiter sind auch kinetisch limitierte Lösungsreaktionen von Schwermetallen in Mikroporensystemen in einem höheren Grad zu erwarten, da einerseits die höhere Aufenthaltszeit zu mehr Wechselwirkung mit der Schlacke führt, andererseits aufgrund der hohen pH-Bedingungen die Auslaugung durch erhöhte Löslichkeit von Schwermetallen im hochalkalischen Bereich ebenfalls verstärkt erfolgen kann. Dies zeigt sich ebenfalls deutlich in den stark erhöhten Konzentrationswerten von Schwermetallen in Gleichgewichts-Eluatversuchen [2]. Die Unterscheidung der chemischen Zusammensetzung der Porenwässer hilft, um die während Trockenphasen ansteigenden pH- und LF-Werte zu erklären. Durch Abnahme der aus Makroporen entwässernden Volumen steigt der Anteil des Mikroporenwassers im Deponiesickerwasser stetig an, was das Mischverhältnis zwischen den Porenwässern verändert. Als Konsequenz ändern sich die pH- und Konzentrationswerte des Deponiesickerwassers im Abfluss.

Analog zu den ansteigenden pH- und LF-Werten bei abnehmendem Abfluss während Trockenphasen können auch die hohen pH-Werte und Schwermetallkonzentrationen bei Niederschlagsereignissen mit der chemischen Zusammensetzung des Porenwassersystems und der Hydraulik erklärt werden (Tabelle 1, Bild 2). Mit der Aktivierung von präferentiellen Fließsystemen während Starkniederschlagsereignissen bewegt sich Wasser unter gesättigten Bedingungen mit hoher Fließgeschwindigkeit durch die Deponie. Folglich kann davon ausgegangen werden, dass dieses große Wasservolumen kaum mit dem abgelagerten Feststoff interagiert und somit geringe Frachten mit sich

führt. Dadurch nehmen die Konzentrationen im Deponieabfluss ab und es werden die beobachteten Verdünnungseffekte während den Starkniederschlagsereignissen ersichtlich (Bild 2). Dies resultiert in einem Abfallen der elektrischen Leitfähigkeit sowie dem Rückgang der Konzentrationen der Hauptelemente (Na, K, Ca, Cl, SO<sub>4</sub>). Weiter werden lang mit der Schlacke in Kontakt stehende Porenwässer durch die Wassermassen in den präferentiellen Fließzonen mobilisiert und ausgespült. Diese ähneln in ihrer Zusammensetzung den Eluatversuchen aus Laboruntersuchungen [2] und zeichnen sich im Vergleich zu den *Durchschnittswerten* (Tabelle 1) mit ähnlichen Konzentrationswerten in den Hauptelementen, jedoch mit stark erhöhten pH-Werten und Schwermetallkonzentrationen aus. Weiter kommen Lösungs- und Desorptionseffekten durch die präferentielle Fließsysteme als mögliche Erklärung für die beobachteten Phänomene hinzu. [5]

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Unsere Untersuchungen zeigen, dass die hydraulischen Aspekte einer Schlackendeponie große Auswirkungen auf die Sickerwasserqualität haben. Aufgrund der heterogenen Beschaffenheit der Deponie und des Wasserflusses ist ein unterschiedlicher Grad der Wechselwirkung zwischen infiltrierendem Regenwasser und der abgelagerten Schlacke zu erwarten. Eine genaue Voraussage zur Schadstofffracht im Sickerwasser bedingt somit zwingend, hydraulische Aspekte in die zukünftige Entwicklung miteinzubeziehen. Die derzeitigen Sickerwasserfrachten zeigen ein instantanes Bild der meteorologischen, hydraulischen und geochemischen Wechselwirkung der Deponie. Im weiteren Verlauf der Studie wird versucht, allgemeingültige Prozesse aus den Untersuchungen der diversen Schlackendeponien zu identifizieren und mithilfe von hydraulischen und geochemischen Modellen darzustellen. Die modellhafte Darstellung bildet die Grundlage für genauere Voraussagen zur zukünftigen Entwicklung des Systems Schlackendeponie.

## 7. Quellen

- [1] Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bundesamt für Energie (BfE), Verband der Betreiber Schweizerischer Abfallverwertungsanlagen (VBSA): Einheitliche Heizwert- und Energiekennzahlenberechnung der Schweizer KVA nach europäischem Standardverfahren, 2021. In <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/erneuerbare-energien/biomasse.html> [Zugriff am 30.03.2023].
- [2] Glauser, A.: Factors influencing the quality of bottom ash from municipal solid waste incineration in Switzerland. PhD Thesis, Universität Bern, Bern, 2021, S. 1 – 245, <https://doi.org/10.48549/2697>.
- [3] Hillel, D.; Baker, R.: A descriptive theory of fingering during infiltration into layered soils. Lippincott Williams & Wilkins (Hrsg.). Soil Science, Band 146, Ausgabe 1, 1988, S. 51 – 56, <https://doi.org/10.1097/00010694-198807000-00008>
- [4] Ingold, P.; Weibel, G.; Wanner, C.; Gimmi, T.; Churakov, S. V.: Hydraulic and geochemical characterization of bottom ash landfills. Ready for submission, 2023.
- [5] Johnson, C. A.; Kaeppli, M.; Brandenberger, S.; Ulrich, A.; Baumann, W.: Hydrological and geochemical factors affecting leachate composition in municipal solid waste incinerator bottom ash Part II: The geochemistry of leachate from Landfill Lostorf, Switzerland. Elsevier, Journal of Contaminant Hydrology, Band 40, Ausgabe 3, 1999, S. 239 – 259, [https://doi.org/10.1016/S0169-7722\(99\)00052-2](https://doi.org/10.1016/S0169-7722(99)00052-2).

- [6] Johnson, C. A.; Schaap, M. G.; Abbaspour, K. C.: Model comparison of flow through a municipal solid waste incinerator ash landfill. Elsevier, Journal of Hydrology, Band 243, Ausgabe 1 – 2, 2001, S. 55 – 72, [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00404-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00404-2).
- [7] Schweizer Eidgenossenschaft: Gewässerschutzverordnung (GSchV), 2023. In: [https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1998/2863\\_2863\\_2863/de](https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1998/2863_2863_2863/de) [Zugriff am 30.03.2023]
- [8] Schweizer Eidgenossenschaft: Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA), 2023. In: <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2015/891/de> [Zugriff am 30.03.2023]

## Ansprechpartner



**Philipp Ingold, MSc Geologe**  
Institut für Geologie, Universität Bern  
Fachstelle Sekundärrohstoffe  
Doktorand  
Baltzerstrasse 1+3  
3012 Bern, Schweiz  
+41 31684 8953  
[philipp.ingold@unibe.ch](mailto:philipp.ingold@unibe.ch)

# Waste Management

Editors: Thomé-Kozmiensky (et.al.)

**HARDCOVER  
WITH  
COLORED  
ILLUSTRATIONS**



2011: <b>Waste Management, Volume 2 + CD Waste Management, Volume 2</b>	ISBN: 978-3-935317-69-6 ISBN: 978-3-935317-70-2	CD includes translations in Polish and German	<b>25.00 EUR</b>
2012: <b>Waste Management, Volume 3 + CD Waste Management, Volume 3</b>	ISBN: 978-3-935317-83-2 ISBN: 978-3-935317-84-9	CD includes translations in various languages	<b>25.00 EUR</b>
2014: <b>Waste Management, Volume 4</b>	ISBN: 978-3-944310-15-2		<b>40.00 EUR</b>
2015: <b>Waste Management, Volume 5</b>	ISBN: 978-3-944310-22-0		<b>40.00 EUR</b>
2016: <b>Waste Management, Volume 6</b>	ISBN: 978-3-944310-29-9		<b>40.00 EUR</b>
2017: <b>Waste Management, Volume 7</b>	ISBN: 978-3-944310-37-4		<b>40.00 EUR</b>
2018: <b>Waste Management, Volume 8</b>	ISBN: 978-3-944310-42-8		<b>65.00 EUR</b>
2019: <b>Waste Management, Volume 9</b>	ISBN: 978-3-944310-48-0		<b>65.00 EUR</b>
2022: <b>Waste Management, Volume 10</b>	ISBN: 978-3-944310-64-0	E-Book	<b>75.00 EUR</b>

**Package Price 290.00 EUR**  
save 125.00 EUR

order now [books.vivis.de](http://books.vivis.de)

Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

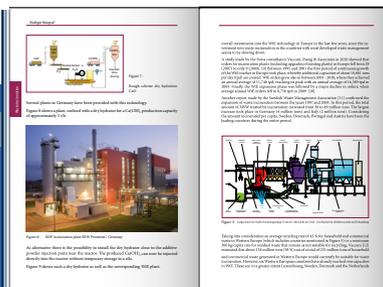
Dorfstraße 51

16816 Nietwerder-Neuruppin

Tel. +49 3391-45 45-0

E-Mail: [order@vivis.de](mailto:order@vivis.de)

**TK Verlag**



## Remediation and Recovery of Metallic Aluminium from Dross Residues in N6-Dumpsite

Johannes Czecczil

The major waste is depleted aluminium dross. Dross from all over Europe had been mechanically/physically processed (crushing, grinding, screening) in the 1980s to recover metallic aluminium. The remaining filter dust as well as the particles < 3 mm were dumped (about 680,000 tons) – lots too near to one of the largest drinking water reservoir in CEE.

Consequently, all the waste (680,000 tons of hazardous waste plus 320,000 tons non-hazardous contaminated soils) has to be removed. Aluminium dross residues have a high reactivity (hydrogen, methane and ammonia are formed by reaction with water) – thus, this waste fulfils the hazard criterion HP3 *flammable*.

Average composition of the 680,000 tons of dross residues:

- Al(met) 10 %,
- Al in other chemical compounds 20 % ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{AlC}_3$ ,  $\text{AlN}$ ,  $\text{AlCl}_3$ ),
- Salts 7 %,
- Cd, Cu, Pb, Sb, Zn.

These chemical contents complicate the targeted highest recovery ratio – and often even block landfilling without stabilisation.

The aim and purpose of the treatment is to recover Al(met) (about 60,000 to 70,000 tons) and a max of minerals and to reduce the reactivity of the rest. Utilizing the secondary materials instead of fresh raw material will save about 700,000 tons of  $\text{CO}_2$ -equivalents.

The core of the onsite mech./phys./chem. process is a brandnew type of eddy current technology (system exner) with highest efficiency in finegrain metal recovery. Thus, Al(met) in the grain range of 0,5 to 4 mm is reclaimed nearly completely. By separating the Al(met), the reactivity of the remaining mineral fraction is massively reduced and in consequence, most of this fraction can be used e.g. as substitute for bauxite in clinker process for cement production.

Main fields/equipment:

- Housing of the exploitation area to avoid emissions and humidity in material,
- Protective screening,
- Crusher/Pre-Screen/Grinding drum/Fractioning,
- Demetallisation/Al-recovery,
- Conditioning,
- Temporary storage/waste assessment.

## Sanierung und Rückgewinnung von metallischem Aluminium aus der Aluschlackendeponie Wiener Neustadt (Projekt N6)

Johannes Czeczil

1.	Beschreibung der Altlast.....	308
1.1.	Ablagerungskörper.....	308
1.2.	Charakterisierung des Aluminiumkrätzstaubs .....	309
2.	Projektentwicklung.....	310
3.	Beschreibung des Sanierungsprojektes .....	310
3.1.	Räumung .....	311
3.2.	Behandlung des Aluminiumkrätzstaubs .....	313
3.3.	Vereinfachte Verfahrensbeschreibung .....	313
4.	Sonstige projektrelevante Aspekte.....	316
4.1.	Zeitlicher Ablauf.....	316
4.2.	Projektkosten.....	316
4.3.	CO <sub>2</sub> - und Energiebilanz.....	317
5.	Quellen .....	317

Bei der Altlast N6 *Aluminiumschlackendeponie* handelt es sich um eine ehemalige Kiesgrube im Westen von Wiener Neustadt, die von 1974 bis 1991 mit etwa 580.000 m<sup>3</sup> Abfällen aufgefüllt wurde. Die Altdeponie besteht zum überwiegenden Anteil aus Aluminiumkrätzstaub, untergeordnet wurden auch Abfälle der Holz- und Textilindustrie, Rückstände aus der Altpapierverarbeitung sowie hausmüllähnliche Abfälle und Bauschutt abgelagert. Eine Basisabdichtung wurde nicht errichtet, die Oberfläche der Deponie wurde mit einer mineralischen Deckschicht abgedeckt.

Seit 2019 wird diese Umweltgefährdung im Auftrag der Bundesaltlastensanierungsgesellschaft m.b.H. (BALSA) nunmehr mit großem Aufwand wieder beseitigt. Zuvor musste über zwei Jahre die dafür erforderliche Infrastruktur aufgebaut werden. Im Zuge der Räumung und Behandlung der in der Altlast lagernden Abfälle werden auch wertvolle Rohstoffe zurückgewonnen.

## 1. Beschreibung der Altlast

Die Altlast N6 liegt außerhalb von geschlossenem Siedlungsgebiet der Stadt Wiener Neustadt (Österreich, Bundesland Niederösterreich). Nächstgelegene Wohnhäuser befinden sich in etwa 500 m Entfernung. Östlich der Altlast befinden sich Kiesabbauflächen sowie eine Fläche, die für Baurestmassenrecycling genutzt wird, ansonsten wird die Altlast von bewaldeten Grundstücken umgeben.

Die Altlast befindet sich innerhalb des wasserwirtschaftlich besonders sensiblen Gebietes der *Mitterndorfer Senke*, welches einen der größten geschlossenen Grundwasserkörper Mitteleuropas darstellt. Charakteristisch für die Geologie der Mitterndorfer Senke sind die aus mächtigen quartären Kies- und Sandablagerungen bestehenden obersten Grundwasser führenden Schichten. Das Grundwasser der Mitterndorfer Senke wird intensiv zur Trinkwasserversorgung genutzt, die nächstgelegene Brunnenanlage zur Versorgung der Stadt Wiener Neustadt ist 2,5 km von der Altlast entfernt.

Des Weiteren liegt die Altlast N6 innerhalb eines Europaschutzgebietes *Natura 2000* sowie einer Sicherheitszone des Militärflugplatzes Wiener Neustadt.

### 1.1. Ablagerungskörper

Die Ausdehnung der Deponie beträgt etwa 44.000 m<sup>2</sup>. Der Ablagerungskörper ist etwa 10 – 19 m mächtig und ragt etwa 3 m über das bestehende Geländeniveau. Deponieeinrichtungen zum Schutz des Grundwassers sind nicht vorhanden. Die Ablagerungen erfolgten direkt auf den gut durchlässigen Untergrund. Allfällige Deponiesickerwässer werden weder gesammelt noch geordnet abgeleitet. Die Oberfläche der Deponie wurde mit einer mineralischen Deckschicht (bindiges Material) abgedeckt.

Basierend auf Bohrprofilen der Erkundungsaufschlüsse wurde mit Hilfe eines 3D-Modells das Gesamtvolumen des Deponiekörpers mit etwa 580.000 m<sup>3</sup>, gerechnet von der Deponiesohle bis zur Oberkante der Abdeckschichten, ermittelt. Konkret besteht die Ablagerung aus den folgenden Abfallhauptfraktionen:

Tabelle 1: Abfallhauptfraktionen im Deponiekörper

Material	Volumen	Masse	Anteil
	m <sup>3</sup>	t	Vol.-%
Aluminiumkrätzestaub	377.000	679.000	64,7
Holzabfälle	60.000	48.000	10,3
Mineralische Abfälle	105.000	210.000	18,0
Sonstige Abfälle	41.000	50.000	7,0
<b>Summen</b>	<b>583.000</b>	<b>987.000</b>	<b>100,0</b>

Die Aluminiumkrätzestäube liegen über dem gesamten Bereich der Altlast in unterschiedlichen Schichtstärken (bis zu 15 m) vor. Meist sind diese Schichten durch andere Abfälle, wie Holzabfälle, Rejekt-Materialien und sonstige Abfälle unterlagert. In Teilbereichen wurden der Aluminiumkrätzestaub aber auch direkt auf dem anstehenden Boden abgelagert, bzw. sind im Zuge der Schüttungsmaßnahmen mit diesem vermischt worden.

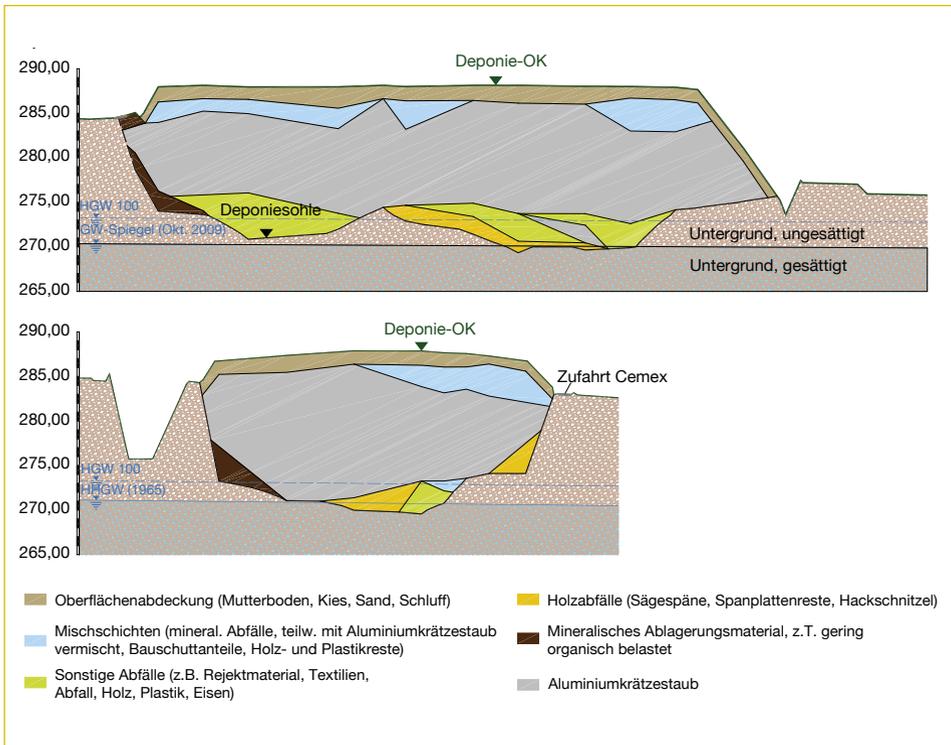


Bild 1: Längs- und ein Querschnitt durch den Ablagerungskörper mit der Verteilung der jeweiligen Abfallfraktionen

Der in Bild 1 dargestellte gesättigte Untergrund (blau gefärbt) stellt den bisher höchsten Grundwasserstand seit Beginn der Beobachtungen des Grundwasserverlaufes durch die BALSa dar. Der amtlich ausgewiesene HGW100 liegt etwa 3 m darüber (blau strichlierte Linie), bei diesem Höchststand wären etwa 20 % der Fläche des Ablagerungskörpers eingestaut.

## 1.2. Charakterisierung des Aluminiumkrätzestaubs

Der Hauptanteil der Ablagerung (65 %) kann als abgereicherte Aluminiumkrätze bezeichnet werden, die bereits einmal mechanisch/physikalisch aufbereitet worden ist (Brechen, Mahlen, Sieben). Der Anteil an metallischem Aluminium wurde dabei größtenteils zurückgewonnen. Der Rückstand, welcher als *Aluminiumkrätzestaub* bezeichnet wird, wurde zur Ablagerung gebracht.

In der Literatur wird Aluminiumkrätze oftmals auch als *Aluminiumschlacke* bezeichnet, wodurch sich die Namensgebung *Aluminiumschlackendeponie* erklärt.

Der Korndurchmesser des abgelagerten Aluminiumkrätzestaubs liegt durchwegs unter 3 mm. Der Gesamtaluminiumgehalt liegt bei etwa 30 % (bestimmt mittels XRF-Methode), wobei der Gehalt an metallischem Aluminium etwas mehr als 10 % beträgt.

Die restlichen Aluminiumverbindungen setzen sich hauptsächlich aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sowie aus Anteilen von  $\text{Al}_4\text{C}_3$ ,  $\text{AlN}$  und  $\text{AlCl}_3$  zusammen. Typisch für den Aluminiumkrätzestaub ist der festgestellte hohe Gehalt an löslichen Salzen, der im Mittel etwa 7 % beträgt. Weiters weist der Aluminiumkrätzestaub relevante Schwermetallgehalte auf (Cd, Cu, Pb, Sb, Zn).

Aufgrund seiner Inhaltsstoffe ist der abgelagerte Aluminiumkrätzestaub bei Kontakt mit Feuchtigkeit reaktiv, wobei die Reaktionsgase Wasserstoff, Methan und Ammoniak entstehen.

Entsprechend dem gemessenen Gasbildungspotenzial bei Kontakt mit Wasser von im Mittel etwa 1,0 l/kg·h erfüllt dieser Abfall das Gefährlichkeitskriterium HP3 *entzündbar*.

## 2. Projektentwicklung

In den Jahren 2007 bis 2010 wurden im Auftrag der Balsa detaillierte Untersuchungen durchgeführt, die als Planungsgrundlage für die Ausarbeitung möglicher Sanierungsvarianten dienen. An der Montanuniversität Leoben fanden dabei auch diverse Versuche im halbtechnischen Maßstab zur Untersuchung möglicher Verfahren für die Behandlung der Aluminiumkrätzestäube statt.

Als Ergebnis einer umfangreichen Variantenstudie, in der auch Ökobilanzierungen und Risikobewertungen eingeflossen sind, wurde festgestellt, dass nur die Räumung – also der vollständige Rückbau der Deponie – als verhältnismäßige und nachhaltige Lösung in Frage kommt. Infolge der Untersuchungen an der Montanuniversität Leoben war davon auszugehen, dass zumindest Teilmengen der dabei anfallenden Aluminiumkrätzestäube – allenfalls nach einem entsprechenden Aufbereitungsschritt – einer stofflichen Verwertung zugeführt werden können. Unter dieser Prämisse wurde sodann das Sanierungsprojekt entwickelt und genehmigt.

Über ein aufwendig gestaltetes Vergabeverfahren sollte das bestmögliche Knowhow vom Markt abgerufen werden. Die Vergabe erfolgte nach dem *Bestbieterprinzip*, die angebotene Verwertungsquote wurde dabei hoch gewichtet. Der Auftrag wurde an ein Bieterkonsortium, bestehend aus drei Unternehmen vergeben. Die Besonderheit dieses Angebotes ist die trockenmechanische Aufbereitung der Aluminiumkrätzestäube samt Rückgewinnung der metallischen Aluminiumanteile im Feinkornbereich.

## 3. Beschreibung des Sanierungsprojektes

In einer zweijährigen Bauphase (2017 bis 2018) wurde zunächst die für die Räumung erforderliche Infrastruktur errichtet. Wesentlicher Bestandteil ist die Behandlungsanlage für die Aufbereitung der Aluminiumkrätzestäube mit einer Jahresleistung von bis zu 150.000 t.



Bild 2:

Luftaufnahme vom 08.06.2022; Baustelleneinrichtung samt Behandlungsanlage rechts im Bild, überdachter Räumbereich links im Bild

### 3.1. Räumung

Über den gesamten Räumbereich wurde eine semimobile Überdachung errichtet, um einen weitgehend witterungsgeschützten Abbau der stark staubenden Abfälle gewährleisten zu können. Die 7.200 m<sup>2</sup> große *Halle* wird dem Räumfortschritt folgend alle 6 bis 8 Wochen versetzt. Sämtliche Arbeitsgeräte sind mit einer Überdruckkabine und entsprechenden Feinstaub- und Ammoniakfiltern ausgestattet. Das gleiche Schutzniveau gilt natürlich auch für sämtliche im Räumbereich eingesetzten Arbeitskräfte. Der Zutritt zum *Schwarzbereich* wird streng kontrolliert und setzt eine Freigabe durch die begleitende arbeitsmedizinische Betreuung voraus.



Bild 3:

Abbaubereich unterhalb der Überdachung, Räumung der stark staubenden Abfälle

Die unterhalb der Überdachung geräumten Aluminiumkräuzestäube werden über Förderbänder der Behandlungsanlage zugeführt, sämtliche anderen Abfälle und die Deponieabdeckschichten werden auf baustelleninterne Transportfahrzeuge verladen und bis zur Wiederverwendung bzw. Freigabe zum Abtransport zwischengelagert. Die Räumarbeiten werden ständig von der *chemischen Aufsicht* überwacht. Ziel ist es, die unterschiedlichen Abfallarten bereits bei der Räumung zu trennen, um die nachfolgenden Entsorgungskosten möglichst zu minimieren (*selektiver Aushub*).

Die ordnungsgemäße Endbehandlung dieser Abfälle findet in externen Anlagen statt (Verbrennung, Deponierung, Bodenwäsche, Baurestmassenrecycling).

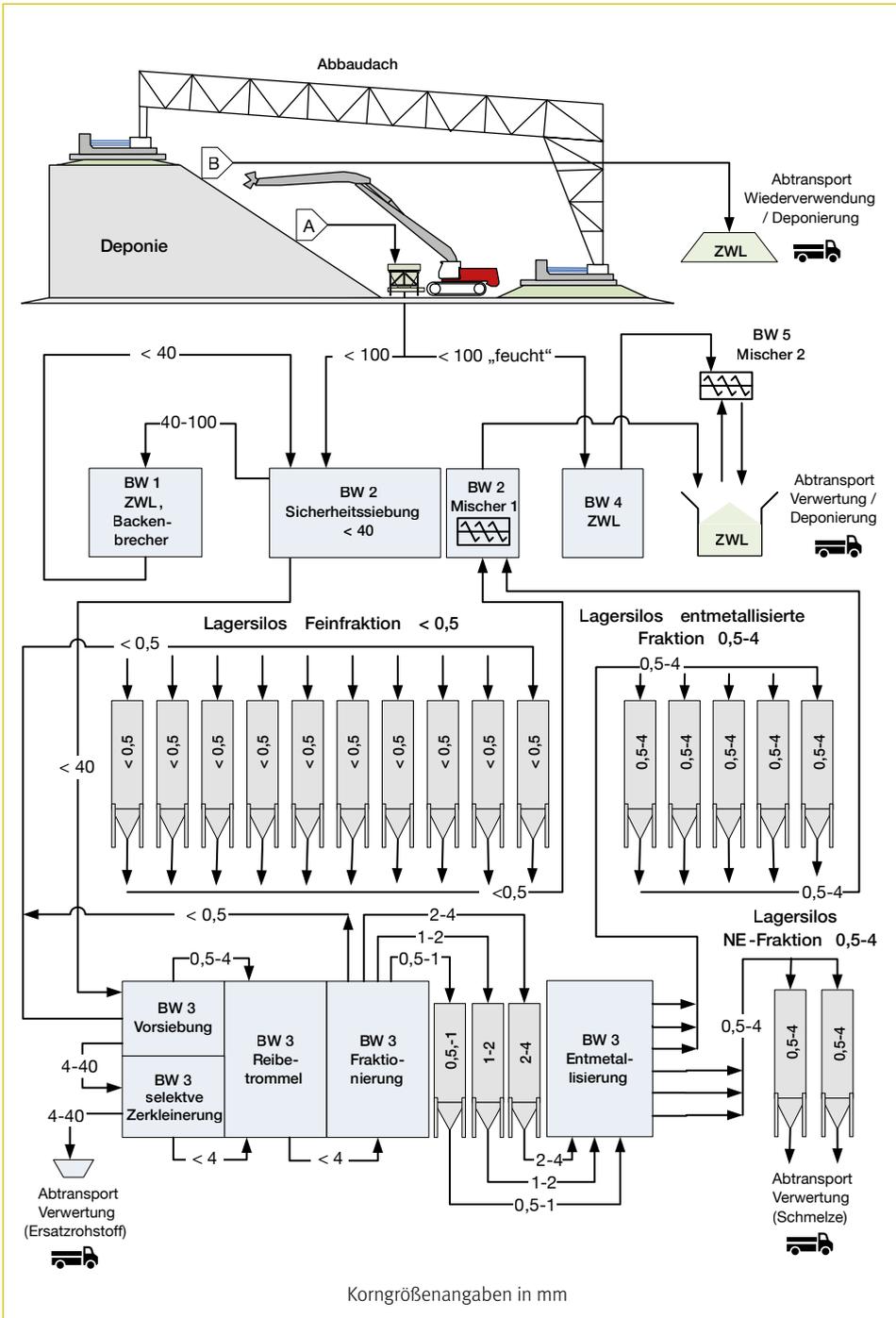


Bild 4: Schematische Darstellung Räumung und Behandlung, Pfeil A: Aluminiumkratzstäube, Pfeil B: sonstige Abfälle und Deponieabdeckschichten

## 3.2. Behandlung des Aluminiumkrätzestaubs

Ziel und Zweck der Behandlung ist es, durch einen Separationsprozess einerseits mineralische Fraktionen (Gesteinsanteile) und metallisches Aluminium aus dem Aluminiumkrätzestaub abzutrennen, um diese Materialien einer hochwertigen stofflichen Verwertung zuzuführen, und andererseits die Reaktivität der Aluminiumkrätzestäube zu reduzieren, sodass die – je nach Art und Weise der nachfolgenden Behandlung (Verwertung oder Deponierung) – erforderliche Abfallqualität erreicht werden kann.

Kern des Behandlungsverfahrens ist die Rückgewinnung des metallischen Aluminiums mittels Wirbelstromtechnik. Der Einsatz der zur Anwendung gelangten Abscheider (System Exner) ermöglicht die Abtrennung des sehr feinkörnigen metallischen Aluminiums aus den Aluminiumkrätzestäuben der Altlast N6.

Zum Ablagerungszeitpunkt war eine derartige Technologie nicht verfügbar (damals konnte nur bis etwa 3 mm Korngröße abgeschieden werden). Mit der genannten Wirbelstromtechnik können nunmehr etwa 60.000 – 70.000 Tonnen metallische Aluminiumfraktion rückgewonnen und durch Einsatz in der Aluminiumschmelze in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden.

Da vor allem der metallische Aluminiumanteil für die Reaktivität (Gasbildung) des gegenständlichen Abfalls verantwortlich ist, wird durch die Abtrennung gleichzeitig auch die Reaktivität des Abfalls deutlich abgesenkt, was sich positiv auf die nachfolgenden Behandlungsschritte auswirkt.

Die Behandlung setzt sich aus trockenmechanischen Verfahrensstufen, die neben Siebungen u.a. die Entmetallisierung beinhalten, und nachgeschalteten Verfahrensstufen auf chemisch-physikalischer Basis, die zur Schaffung der erforderlichen Materialqualitäten eingesetzt werden, zusammen.

## 3.3. Vereinfachte Verfahrensbeschreibung

### Materialaufgabe

Die Aluminiumkrätzestäube werden an der Abbaufont über eine Aufgabereinheit, in der auch ein Backenbrecher integriert ist, auf das Förderband aufgegeben und zur weiteren Behandlung in den Bereich Vorsiebung/Fraktionierung transportiert. Dabei wird mittels Sonde kontinuierlich der Feuchtegehalt bestimmt und der Anteil der feuchten, nicht feinsiebbarer Aluminiumkrätzestäube automatisch ausgeschleust. Weiters ist in der Förderbandstrecke ein Überbandmagnet zur Abtrennung eisenhaltiger Störstoffe verbaut.

### Vorsiebung/Fraktionierung

Über ein *Sicherheitssieb* erfolgt zunächst die Abtrennung der Fraktion 40 – 100 mm, welche mittels Backenbrecher auf < 40 mm zerkleinert und wieder in den weiteren Behandlungsablauf eingeschleust wird (Kreislaufführung).

Der gesamte Abfall-Massestrom < 40 mm wird in einem weiteren Behandlungsschritt in die Fraktionen 0 – 0,5 mm, 0,5 – 4 mm und 4 – 40 mm vorgeseibt, wobei der Feinanteil (< 0,5 mm) den größten Anteil der Aluminiumkrätze ausmacht. Der Feinanteil (< 0,5 mm) wird für die weitere Behandlung in Silos vorgehalten.

Zur Trennung der Inertfraktion (Kies) von der Aluminiumkrätze im Überkorn (Fraktion 4 – 40 mm) erfolgt eine schonende Zerkleinerung mit einem Prallbrecher (*selektive Zerkleinerung*) und anschließender nochmaliger Siebung. Der daraus gewonnene Anteil an Kies 4 – 40 mm wird ausgeschleust und direkt einer Verwertung zugeführt (Ersatzrohstoff für die Zementerzeugung). Die Feinfraktion < 4 mm wird der Fraktion 0,5 – 4 mm aus der Vorabsiebung zugeschlagen.

Nach der Behandlung der zusammengeführten Fraktionen < 4 mm in einer Misch- bzw. Reibetrommel (Abrieb von Feinteilen aus Agglomeraten) erfolgt die Fraktionierung in die Kornbänder 0,5 – 1 mm, 1 – 2 mm und 2 – 4 mm als Vorbereitung für die nachfolgende Entmetallisierung.

Im Kornbereich > 4 mm ist kein metallisches Aluminium mehr im Abfall vorhanden, da der Abfall – wie erwähnt – bereits vor Ablagerung auf der Deponie N6 mechanisch/physikalisch aufbereitet wurde und dabei metallisches Aluminium über etwa 3 mm bereits abgetrennt worden ist.

### Entmetallisierung

Die Abtrennung von NE-Metallanteilen erfolgt getrennt für die Fraktionen 0,5 – 1 mm, 1 – 2 mm und 2 – 4 mm mit insgesamt 12 Wirbelstromabscheidern, die – als einziger Anlagenbereich – 24/7 in Betrieb sind. Nur durch die gewählte, auf die spezifischen Korngrößen ausgerichtete Verfahrenstechnik kann ein Großteil des in der Aluminiumkrätze vorhandenen Anteils an metallischem Aluminium rückgewonnen werden.

Nach der Abtrennung des NE-Metallanteils werden die so erhaltenen entmetallisierten Fraktionen 0,5 – 1 mm, 1 – 2 mm und 2 – 4 mm für die gemeinsame Lagerung in Silos zusammengeführt (0,5 – 4 mm) und für die weitere Behandlung vorgehalten. Der abgetrennte NE-Anteil wird ausgeschleust (ebenfalls 0,5 – 4 mm) und direkt einer Aluminiumschmelze zugeführt.

### Chemisch-physikalische Behandlung

Die Fraktionen < 4 mm sowie feuchte, nicht fein siebbare Fraktionen 0 – 100 mm werden entsprechend ihrer chemischen Beschaffenheit weiteren Verfahrensschritten unterzogen. Diese sind im Einzelnen:

- **Konditionierung:** Behandlung von Materialströmen, die aufgrund ihrer Stoffeigenschaften zwar unmittelbar einer Verwertung oder Beseitigung zugeführt werden könnten, jedoch zur Staub- und Geruchsminimierung weiter behandelt werden. Durch Zugabe von Konditionierungsmitteln (z.B. Zeolith) erfolgt eine Bindung von Ammonium, sodass das Risiko des Ausgasens von Ammoniak sowie der Staubbildung deutlich reduziert wird. Das Material kann damit mit minimiertem Aufwand und Risiko manipuliert und transportiert werden.
- **Immobilisierung:** Behandlung von Materialströmen ohne gefahrenrelevante Eigenschaften, die jedoch den Annahmekriterien auf obertägigen Deponien nicht entsprechen. Durch Zugabe von einem Bindemittel auf Tonmineralbasis erfolgt



## 4. Sonstige projektrelevante Aspekte

### 4.1. Zeitlicher Ablauf

Nach etwa 10 Jahren Projektvorbereitungszeit haben am 01.01.2017 die Arbeiten zur Sanierung der Altlast N6 begonnen. Für die Vorarbeiten und die Herstellung der gesamten Baustelleninfrastruktur inkl. Behandlungsanlage waren zwei Jahre veranschlagt, die punktgenau eingehalten wurden, sodass mit 01.01.2019 die eigentlichen Sanierungsarbeiten beginnen konnten.

In den ersten Betriebsjahren wurde die Anlage laufend optimiert und an unerwartete Materialeigenschaften angepasst, seither befindet sie sich im Regelbetrieb. Die Frist zur Fertigstellung des Sanierungsvorhabens wurde von der Behörde mit 31.12.2030 vorgegeben. Der Genehmigungsbescheid sieht auch den kompletten Rückbau der Anlagen vor, wofür ein Zeitraum von etwa 1,5 Jahren veranschlagt ist. Die sich daraus ergebende indirekte Frist für den Abschluss des Deponierückbaus wäre also mit Mitte 2028 anzusetzen.

Aus heutiger Sicht wird die Räumung und Behandlung der Aluminiumkrätzzestäube aber deutlich früher abgeschlossen sein. Die aktuelle Projektplanung geht von Ende 2026 aus.

### 4.2. Projektkosten

Für das gesamte Sanierungsprojekt, also inkl. Nebenkosten und Projektvorlaufkosten, wurde zum Zeitpunkt der Zustimmung zum Projektvorschlag (2010) ein Budgetrahmen von EUR 210 Millionen festgelegt. Unter Berücksichtigung der bereits eingetretenen und abgeschätzten zukünftigen Preissteigerung rechnet die BALS aktuell mit etwa EUR 250 Millionen.

Tabelle 2: Kosten des Projekts N6, per 31.12.2022

Projektkosten	EUR
Projektvorlaufkosten	5,0 Millionen
Baustelleneinrichtung inkl. Behandlungsanlage	59,5 Millionen
laufender Sanierungsbetrieb	59,5 Millionen
Ingenieur- und Aufsichtsleistungen inkl. chemischer Analysen	9,1 Millionen
sonstige Nebenkosten	2,3 Millionen
Eigenleistungen BALS	5,1 Millionen
<b>Summe</b>	<b>118,9 Millionen</b>

### 4.3. CO<sub>2</sub>- und Energiebilanz

Bei der Räumung der Altlast N6 gelangt eine innovative Technologie im Bereich der Elektrosortierung (Wirbelstromscheider), welche im Laufe des Bieterverfahrens entwickelt und optimiert wurde, zum Einsatz. Dieses Verfahren ermöglicht erstmalig eine Abtrennung von metallischen Aluminiumteilen im unteren Korngrößenbereich mit hohen Ausbringraten. Dadurch kann der in den abgelagerten Krätzerückständen noch enthaltene Metallanteil rückgewonnen und gezielt zu hochwertigem Recyclingaluminium verwertet werden, wodurch es im Vergleich zur Primärgewinnung aus Bauxit zu sehr großen Einsparungen beim Energiebedarf sowie einer starken Reduktion von Treibhausgasemissionen kommt.

Aus der Rückgewinnung der Aluminiumfraktion von der Altlast N6, insgesamt 60.000 bis 70.000 t, ergibt sich unter Berücksichtigung der Schmelzausbeute von 50 bis 60 % eine Energieeinsparung von etwa  $7 \cdot 10^6$  GJ sowie eine Einsparung von etwa 700.000 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten.

Diese Werte verdeutlichen einen wesentlichen Beitrag des Projektes N6 zum Klimaschutz. Durch die zum Zeitpunkt der Vergabe neuartige Technologie entsteht aus einem klassischen Sanierungsprojekt zur Beseitigung der Umweltauswirkungen ein Vorzeigebispiel eines *Landfill Mining*.

## 5. Quellen

- [1] ARGE Sanierung Altlast N6: Vereinfachtes Verfahrensschema, 2020
- [2] ARGE Sanierung Altlast N6: Luftaufnahme, 2022
- [3] Antrekowitsch, H.; Raupenstrauch, H.: Abschätzung der Energie- und CO<sub>2</sub>-Einsparung bei Verwertung der Metallfraktion in den Krätzerückständen der Altlast N6, 2020
- [4] BALSА: Altlast N6 *Aluminiumschlackendeponie Berger*; Studie zum Gefährdungspotenzial der Altlast anhand vorhandener Unterlagen, 2007
- [5] BALSА: Projektvorschlag November 2010, 2010
- [6] BALSА: Einreichprojekt gem. UVP-G 2000, Vorhabensbeschreibung Bericht Einlage E.01, 2011
- [7] BALSА: Änderungsantrag gem. §18b UVP-G 2000, Bericht Einlage F.01, 2017
- [8] Montanuniversität Leoben: Situationsbericht zur Altlast N6, 2009
- [9] Montanuniversität Leoben: Verwertungsmöglichkeiten von Aluminiumkrätzerstäuben der Altlast N6, 2009
- [10] Umweltbundesamt: Gefährdungsabschätzung und Prioritätenklassifizierung, 2010

### Ansprechpartner



**Ing. Johannes Czeccil**

BALSА Bundesaltlastensanierungsgesellschaft m.b.H.

Projektleiter

Mosetiggasse 1

1230 Wien, Österreich

+43 1 90313 0

office@balsa-gmbh.at



## Dank

Die Herausgeber dieser Jubiläumsausgabe – des 10. Bands der Buchreihe Mineralische Nebenprodukte und Abfälle – danken den an diesem Buch beteiligten Personen und Unternehmen für ihr Engagement.

An erster Stelle danken wir den Autorinnen und Autoren, die mit ihren Manuskripten den Rohstoff für dieses Buch geliefert haben. Für sie war es zusätzliche Arbeit und Belastung. Herausgeber und Verlag danken ihnen allen mit dem angemessenen Umgang mit ihren Manuskripten und mit der Qualität der Präsentation.

Die Qualität des Buchs ist auch dem Engagement der Unternehmen zu verdanken, die mit den Inseraten eine weitere Voraussetzung für die Qualität der Redaktion, des Satzes und des Drucks sowie der buchbinderischen Verarbeitung geschaffen haben. Dank der Qualität der Beiträge erreicht die werbende Wirtschaft ein interessantes Fachpublikum.

Die Mitarbeiter des Verlags waren besonders gefordert, wenn Manuskripte hohe Anforderungen an die Bearbeitung stellten.

## Das Verlags-Team



Martin Graß hat die Buchplanung sowie die Zusammenarbeit mit den Autoren und der Druckerei geleitet. Er hat gemeinsam mit Carolin Pawel, Claudia Naumann-Deppe, Cordula Müller und Roland Richter zahlreiche Zeichnungen und Tabellen angefertigt und die Druckvorlage gesetzt. Janin Burbott-Seidel hat gemeinsam mit Roland Richter und Martin Graß die Verbindung zur werbenden Wirtschaft gepflegt. Lena Stucke hat das Jubiläums-Buchcover gestaltet. Parallel zu diesem Werk hat Dr. Olaf Holm unter anderem schon das nächste Buchprojekt *Verwertung von Klärschlamm* vorbereitet und beim Endspurt des vorliegenden Buchs in der Endkorrektur mitgearbeitet. Dagmar Neumann sorgt für ungezählte Dinge, die dem gesamten Team und damit auch der Erstellung der Bücher zugute kommen, und nicht zuletzt auch für den Versand unserer Publikationen.

Großen Dank schulden Herausgeber und Verlag der Druckerei Beltz Grafische Betriebe für die sorgfältige Verarbeitung unserer Vorlagen zu einem ansehnlichen Buch hoher Qualität.

Das Zusammenwirken von Autoren, werbender Wirtschaft, Redaktion, Druckvorstufe und Druckerei kommt dieser Publikation zugute. Das Ergebnis dieser Arbeit wird von den Lesern geschätzt, weil die Bücher über lange Zeit als wichtige Informationsquelle betrachtet werden und die tägliche Arbeit unterstützen.

Daher wird auch dieses Buch – sowohl in der Printversion als auch im E-Book-Format – die verdiente Verbreitung und Würdigung finden.

Es ist uns ein Bedürfnis, den an diesem Buch Beteiligten im Namen aller Herausgeber voller Bewunderung für ihre hervorragenden Leistungen zu danken.

Juni 2023

*Dr.-Ing. Stephanie Thiel*

*Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc.*





## Autorenverzeichnis

Abis, Marco .....	S. 164
Adam, Christian .....	S. 222
Algermissen, David .....	S. 212, 222
Bachmann, Georg .....	S. 164
Buchsteiner, Dirk .....	S. 14
Bunge, Rainer .....	S. 46
Bunzel, Jörg-Michael .....	S. 62
Chiara, Giovanna .....	S. 182
Czeczil, Johannes .....	S. 306
Dörfler, Paula .....	S. 258
Doschek-Held, Klaus .....	S. 234, 270
Ebert, Dominik .....	S. 212, 222
Edel, Hans-Georg .....	S. 154
Eggenberger, Urs .....	S. 258
Ehrenberg, Andreas .....	S. 212, 222
Fabian, Falk .....	S. 114
Faigle, Benjamin .....	S. 154
Farago, Patrick .....	S. 62
Fehse, Marthe-Louise .....	S. 26
Feldrappe, Volkert .....	S. 212, 222
Firsbach, Felix .....	S. 196
Giese, Hannes .....	S. 2
Gronen, Lars .....	S. 222
Häseli, Urs .....	S. 258
Hlawatsch, Frank .....	S. 36
Hugot, Andreas .....	S. 246
Ingold, Philipp .....	S. 296
Kabbe, Christian .....	S. 182
Kasper, Thomas .....	S. 14

Kersandt, Peter .....	S. 286
Kochberger, Michael .....	S. 126
Krammer, Anna .....	S. 270
Larisch, Michael .....	S. 164
Mai, Sybille .....	S. 2
Mann, Oliver .....	S. 126
Müller, Christoph .....	S. 74
Pieper, Dirk .....	S. 140
Pomberger, Roland .....	S. 100
Reiter, Wolfgang .....	S. 234
Richter, Jörn .....	S. 164
Rieger, Johannes.....	S. 234
Sattler, Theresa .....	S. 270
Schneider, Joachim .....	S. 222
Schraut, Katharina .....	S. 222
Senk, Dieter Georg.....	S. 196
Steindl , Florian Roman .....	S. 270
Sutter, Christoph .....	S. 126
Texter, Robert .....	S. 140
Thaler, Christoph .....	S. 234
Vollprecht, Daniel .....	S. 100
Volz, Bernhard .....	S. 154
von Bartenwerffer, Kilian .....	S. 246
Weibel, Gisela .....	S. 258, 296
Wohlmuth, Dominik .....	S. 270
Wolffers, Mirjam .....	S. 258
Woock, Philipp .....	S. 86
Wruss, Klaus .....	S. 126
Wruss, Werner .....	S.126



# **Inserentenverzeichnis**

## Förderer



**HEIDEMANN**  
Unternehmensgruppe

**REMEX<sup>®</sup>**

IM AUFTRAG DER ZUKUNFT

**STADLER<sup>®</sup>**

Technik von ihrer besten Seite

# Wir danken den Inserenten





**Verlag 320°**

S. 73

Viktualienmarkt 8  
80331 München, Deutschland  
+49 89 4132570 9  
info@320grad.de  
www.320grad.de



**Deutscher Fachverlag GmbH**

S. 33

Mainzer Landstraße 251  
60326 Frankfurt/Main, Deutschland  
+49 69 7595 01  
info@dfv.de  
www.dfv.de



**MSV Mediaservice & Verlag GmbH**

S. 25

Münchner Straße 48,  
82239 Alling/Biburg, Deutschland  
+49 8141 5300 20  
info@msvgmbh.eu  
www.eu-recycling.com



**Heidemann Recycling GmbH**

S. 169, 263, 278

Schmiedestr. 16  
21709 Himmelpforten, Deutschland  
+49 4144 69820 0  
info@heidemann-recycling.de  
www.heidemann-recycling.de



**Hanseatisches Schlackenkonto GmbH**

S. 256, 277

Oberwerder Damm 1-5  
20539 Hamburg  
+49 40 254077 90  
info@schlackenkonto.de  
www.emvau-schlacke.de



**Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG**

S. 186

Genthiner Straße 30 G  
10785 Berlin, Deutschland  
+49 30 250085 0  
ESV@ESVmedien.de  
www.muellundabfall.de



**REMEX GmbH**

S. 162, 189, 264

Am Fallhammer 1  
40221 Düsseldorf, Deutschland  
+49 211 17160 0  
info@remex.de  
www.remex.de



**RHOMBOS-VERLAG Bernhard Reiser**

S. 190, 283

Postfach 670217  
10207 Berlin, Deutschland  
+49 30 2619461  
verlag@rhombos.de  
www.rhombos.de



**Separ Chemie GmbH**

S. 185

Erika-Keck-Str. 4  
22926 Ahrensburg, Deutschland  
+49 4102 666 30  
info@separ-chemie.de  
separ-chemie.de



**Spaleck GmbH & Co. KG**

S. 58, 79

Robert-Bosch-Str. 15  
46397 Bocholt, Deutschland  
+49 2871 2134 0  
info@spaleck.de  
www.spaleck.de



**STADLER®**  
Technik von Ihrer besten Seite

### STADLER Anlagenbau GmbH

S. 34, 57

Max-Planck-Str. 21  
88361 Altshausen, Deutschland  
+49 7584 9226 0  
info@w-stadler.de  
w-stadler.de



**TK Verlag**

### Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Dorfstraße 51  
16816 Nietwerder, Deutschland  
+49 3391 4545 0  
tkverlag@vivis.de  
vivis.de





# Schlagwortverzeichnis

## A

Abbruchscheren 149  
Abfälle  
  asbesthaltige 115, 145  
Abfallmineralogie 104  
Abfallrahmenrichtlinie 18  
Abfallverwertungskonzept 121  
ABuG 29  
Altlast N6 307  
Aluminium  
  Rückgewinnung aus Schlackendeponie 307  
Aluminiumkrätzestaub 309  
Aluminiumschlackendeponie 307  
Anwendungsnormen 31  
Arbeitsmaschinen  
  autonome 97  
Asbest 116  
  Begriffsdefinition 130  
  Erfassung und Ausschleusung 141  
  in Baumaterialien 127  
Asbestfreiheit 70, 119, 127  
Asbestminerale 134  
Ash2Salt 183  
Aushubvorgang 95  
Ausstieg aus der Kohleverstromung 248

## B

BALSA 307  
Bauartgenehmigung  
  allgemeine 31  
Bauaufsichtliche Zulassung  
  Allgemeine (abZ) 30  
Baubestimmungen  
  technische 28  
Baumaschinen  
  autonome 90  
Baumaterialien 27  
Bauordnungsrecht 28  
  produktbezogenes 27  
Bauprodukte 27  
  harmonisierte 29  
Bauschutt 48  
  asbesthaltiger 145  
Bauschuttrecycling  
  Ausschleusung von  
  asbesthaltigen Baustoffen 117  
Baustoffe  
  ressourcenschonende 43  
Bau- und Abbruchabfälle 16

Bauwirtschaft  
  Materialkreisläufe 3  
Behinderungsverbot 30  
Beton 249  
Betonbruch  
  asbesthaltiger 146  
Betonherstellung  
  mit Recyclingmaterial 81  
  Ressourceneinsatz 76  
Betonrecycling 75  
Betonscan 148  
Betonzusatzstoff 249  
Bindemittelkomponenten  
  alternative 271  
Bodenwäsche  
  für Böden mit PFAS-Belastung 156  
Bremer RessourcenEffizienz-Tisch 43  
Building Circularity Passport 8

## C

Carry-Over 239  
CE-Kennzeichen 29  
Chloride 184  
Circular Economy 3, 15  
CO<sub>2</sub>-Neutralität  
  Rohmaterialien 265  
  Klinkerproduktion 259  
Cradle to Cradle (C2C)-Designprinzip 5

## D

Dekarbonisierung 75  
Deponie 298  
  Klimaschutzbelange bei der Zulassung 287  
Deponieentwicklung  
  Emissionsprognose 298  
Deponiestruktur 298  
Detektion  
  zerstörende 149  
  zerstörungsfreie 148  
Deutsches Institut für Bautechnik 28  
Direktreduktion 215  
Direktreduktionsanlagen 224  
DR-ELO-Route 205  
DRI-EAF-Schlacke 229  
DRI-Produktion 200  
DR-LBO-Route 203  
DR-Smelter-Konverter-Route 206  
Druckfestigkeit 174

**E**

EAF-Schlacke 229  
 Edelstahl 47  
 Einschmelzer 217, 224  
 Eisenhüttenschlacken  
 Verwendungsgebiete 214  
 Eisen- und Stahlindustrie  
 Umstellungen 197  
 Elektrohoheisen-Produktion 213  
 Eluatwerte 29  
 Emissionshandel 249  
 Ende der Abfalleigenschaft 15, 27  
 Entzinkungsraten 242  
 Ersatzbaustoffverordnung 20  
 EU-Bauprodukteverordnung 29  
 Europäische Technische Bewertung (ETA) 29

**F**

Fachbeitrag  
 Klimaschutzrechtlicher 291  
 Feststoffwerte 29  
 Flash-Reaktor 236  
 Flugaschen 248  
 aus der Wirbelschichtverbrennung 273  
 aus Waste2Energy-Anlagen 184  
 Formsteine 40  
 Freistemmen 149

**G**

Gebäuderessourcenpass 8  
 Gefahrenabwehr 29  
 Gefahrenvorsorge 29  
 Gefahrstoffe  
 krebserzeugende 118  
 Gefahrstoffverordnung 118  
 Gesteinskörnungen  
 rezyklierte 37  
 erforschte Verwertungswege 39  
 Gips 248  
 Gipskartonplattenabfall 65  
 Recycling 63  
 Gipsrecyclinganlage 66  
 Glaswolle 273  
 Green Deal 15, 32  
 Grenzwerte 108

**H**

Hochofen-Konverter-Route 199  
 Hüttenreststoffe  
 Upcycling 272  
 Hüttensand 230  
 Substitutionspotential 279

**I**

Immobilienwirtschaft  
 Circular Economy 3

**K**

Klimaschutzbelange  
 Berücksichtigungsgebot 288  
 Gewicht in der Abwägung 290  
 Klinkerherstellung  
 Rohstoffeinsatz 77  
 Kurze-Wege-Kreislaufwirtschaft 43  
 Kurzteile 47

**L**

LAGA Mitteilung 23 115  
 Landesbauordnungen 28  
 Langteile 48  
 Langteilabscheider 48  
 LD-Schlacke 225  
 Leistungserklärung 29

**M**

Manipulatorplanung 94  
 Mantelverordnung 20  
 Materialausweis  
 für Gebäude 8  
 Methanox 40  
 Mineralfasern  
 künstliche 272  
 Mineralogie 104  
 Mineralphasen 103

**N**

Nebenprodukte 27, 214, 248  
 Norm  
 harmonisierte 29

### O

- Ökodesign mineralischer Nebenprodukte und Abfälle 109
- Öko-Mauersteine 43

### P

- PFAS-Bodenwäsche 157
- Phase 102
- Porenbetonbruch 40
- Primärstahlerzeugung
  - Entwicklung 197
- Produktrecht 27

### R

- Raupenbagger
  - autonomer 96
- RC
  - siehe Recycling*
- REA-Gips 251
- Reaktionspotenzial
  - hydrothermales 42
- RECBest
  - Forschungsprojekt 141
- RecoDust Prozess 236
- Recycling
  - Aluminium 317
  - Bauprodukt 42
  - Gips 70
  - Poro-Gips-Platte 42
  - Wandsystem 40
- Regeln der Technik
  - allgemein anerkannte 30
- Ressourceneffizienz 75, 101, 252
- Roboter-Teams 96
- Robotik 87
- Roheisenentschwefelungsschlacke 273
- Rost- und Kesselaschen 167
- Rückbau
  - dosierter 149
  - konventioneller 149
  - selektiver 120

### S

- Sanierung
  - ehemaliges Raffineriegelände 156
  - mit Materialbewusstsein 7
- Schadstoffe 102

- Schadstoffausschleusung 101
- Schadstoffgutachten 144
- Schaumstein 41
- Schlackendeponien
  - hydraulische Eigenschaften 298
  - in der Schweiz
    - Sickerwasserqualität 297
- Schrott-Elektrolichtbogenofen-Route 201
- Schweiz 261
  - Abfallbehandlung und Deponierung 297
  - Schlackendeponien 297
- Sekundärmetallurgie 273
- Sekundärrohstoffe 253
- Sickerwasserzusammensetzung
  - Einfluss des Wasserflusses 302
  - Witterungsabhängigkeit 300
- Siebe
  - 3 D 48
- Siemens-Martin-Schlacke 273
- Smelter 207
- Städte
  - als Rohstofflager 3
- Stahlerzeugung
  - Nebenprodukte 214
  - Transformation 224
- Stahlproduktionsrouten 198
  - wasserstoffbasierte 213, 223
- Steinwolle 273
- Stelle
  - notifizierte 29
- Stoffstrommanagement 253
- Störstoffe 48

### T

- Thermografie
  - aktive 148
- Treibhauseffekt 247

### U

- Urban Mining 253
  - Praxis 3
- Ü-Zeichen 30

### V

- Verwendbarkeitsnachweis 30
- Verwertungskreislauf 253
- Vorerkundung 120
- Vorsorgeprinzip 107

**W**

- Waschverfahren
  - zur Reinigung von Böden
  - mit PFAS-Belastung 155
- Wirbelstromscheider 317
- Wohnhaus
  - materielle Zusammensetzung 4

**Z**

- Zementersatz 249
- Zementhauptbestandteile 167
- Zementindustrie 224
  - Einsatz von mineralischen Abfällen 262
  - Sekundärzumahlstoffbereitstellung 276
- Zementprüfungen 171
- Zementherstellung
  - Recyclingmaterial 81
  - Ressourceneinsatz 76
- Zink
  - selektive Verflüchtigung 236
- Zuschlagstoff 249
- Zustimmung im Einzelfall (ZiE) 30