

# Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft Bauen und Mineralische Stoffkreisläufe (ReMin)

Abschlussbroschüre



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

**FONA**

Forschung für Nachhaltigkeit



**ReMin**

Ressourceneffiziente  
Kreislaufwirtschaft

Bauen und Mineralische Stoffkreisläufe

**CUTE****C**



Clausthaler Umwelttechnik  
Forschungszentrum

**Ressourceneffiziente  
Kreislaufwirtschaft  
Bauen und Mineralische  
Stoffkreisläufe (ReMin)**

Abschlussbroschüre

# Inhalt

## 5 Willkommen bei ReMin

## 6 ASHCON

Einsatz von aufbereiteter Müllverbrennungsasche als Ausgangsstoff bei der Betonherstellung

## 8 BAUSEP

Separation von Aschen und Schlacken für die Herstellung ressourceneffizienter Bauprodukte

## 10 EMSARZEM

Einsatz von MV-Schlacke als Rohstoff für die Zementherstellung

## 12 FaBeR

Faser- und Beton-Recycling von Carbon- und Textilbeton

## 14 FERTIGTEIL 2.0

Real-digitale Prozessketten zur Gewinnung von eingebauten Betonbauteilen für die Weiterverwendung als fertige Bauteile

## 16 GipsRec2.0

Technische Vorbereitung der Verfügbarmachung von Gipsfaserplatten und Synthesegipsen zur Herstellung von RC-Gips

## 18 LIBS-ConSort

Laserbasierte Baustoffsartierung zur Aufbereitung von Bau- und Abbruchabfällen für die Kreislaufwirtschaft

## 20 MIN-LOOP

Substitution polystyrolbasierter Hartschäume durch zementgebundenen Mineralschaum aus rezykliertem Brechsand in Sandwichhybriddecken für rein mineralische Stoffkreisläufe im Hochbau

## 22 R-ZiEMENT

Ziegelhaltige Recyclingbaustoffe als Rohstoff für ressourceneffiziente Zemente in dauerhaften Betonen

## 24 REALight

Leichtgranulate und REA-Gips aus feinkörnigen sulfatbelasteten Bau- und Abbruchabfällen und industriellen Nebenprodukten

## 26 RECBest

Recyclingmaterial vor Asbest absichern – Erfassung und Ausschleusung von Asbest als Störstoff aus Bau- und Abbruchabfällen

## 28 ReCyCONtrol

Selbstlernende Steuerungstechniken für die automatisierte Produktion robuster Ressourcenschutzbetone – Schlüssel für die umfassende Verwertung mineralischer Stoffströme

## 30 RekoTi

Ressourcenplan kommunaler Tiefbau

## 32 REMINTA

REcycling MINeralischer Fraktionen aus TAILings

## 34 SABINE

Stahlwerksschlacke als Bindemittel für geotechnische Baustoffe

## 36 SlagCEM

Portlandzement und Roheisen aus Stahlwerksschlacken

## 38 TReMin

Vernetzungs- und Transfervorhaben

## 40 Abschließende Bewertung der Gesamtfördermaßnahme „BMBF-ReMin“

## 44 Kontaktdaten der Verbundpartner

## 54 Impressum

# Willkommen bei ReMin

Die Förderrichtlinie „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Bauen und Mineralische Stoffkreisläufe (ReMin)“ (2021–2024) ist eine Maßnahme zur Umsetzung des BMBF-Forschungskonzepts „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft“ und Teil der Strategie „Forschung für nachhaltige Entwicklung – FONA“, mit dem Ziel den Ausbau der Kreislaufwirtschaft weiter voranzutreiben. Im Fokus stehen die Bauwirtschaft mit ihrer hohen Nachfrage nach Rohstoffen und die erweiterte Nutzung von Sekundärrohstoffen aus Baurestmassen, Schlacken, Aschen sowie bergbaulichen Rückständen.

Thematische Schwerpunkte der Förderung sind:

**Bauen in der Kreislaufwirtschaft:** Neue Designkonzepte und innovative Bauprodukte, z. B.

- Vermeidung von Stoffen, die das Recycling erschweren können
- Erhöhter Einsatz von gebrauchten Bauteilen und leicht trennbaren Komponenten
- Bewertung neuer Baustoffe
- Prognose der Stoffströme aus dem Rückbau von Gebäuden
- Schaffung von Materialkatastern

**Verwertung von mineralischen Stoffströmen:** Baurestmassen, bergbauliche Rückstände, Aschen, Stäube, Schlacken, z. B.

- Entwicklung von Technologien zur Aufbereitung mineralischer Stoffströme (z. B. Sortiertechnologien)
- Erzeugung von hochwertigen Baustoffen
- Rückgewinnung von Gips
- Erfassen und Ausschleusen von Störstoffen (z. B. Asbest)
- Hemmnisse und Rahmenbedingungen
- Normierung und Standardisierung

Die Forschungsergebnisse der 17 in ReMin geförderten Verbundprojekte mit 101 Teilvorhaben sind in dieser Broschüre zusammengefasst.



## Zielstellung

Durch die Verbrennung von Siedlungsabfällen fallen in Deutschland pro Jahr etwa 5,7 Mio. t Hausmüllverbrennungsaschen (HMVA) an. Aus Gründen der Ressourceneffizienz und zur Einsparung von Deponievolumen, sollten diese Aschen zukünftig bestmöglich in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden. Ziel ist es, den mineralischen Anteil durch neue Aufbereitungsverfahren abzutrennen und für die Substitution natürlicher Gesteinskörnung der Kornfraktion 2/8 mm in herkömmlichen Rezepturen für Transportbeton und Betonwerksteine einzusetzen. Die Gewinnung der mineralischen Fraktion von HMVA aus Deponien sowie Müllverbrennungsanlagen, die Bestimmung der elementaren Zusammensetzung mittels Neutronenaktivierungsanalyse und der Einsatz der groben mineralischen Fraktion in Rezepturen für die Transportbeton- und Betonwerksteinindustrie bis hin zur großtechnischen Umsetzung sind Gegenstand des Forschungsprojektes ASHCON.

## Ergebnisse

Am Entsorgungszentrum Leppe in Lindlar-Remshagen wurden mehrere HMVA-Proben entnommen – drei Proben aus jeweils zwei Deponieabschnitten mit der Bezeichnung „DA3“ und „DA6.1“ sowie zwei Proben mit dem Namen „FRA-1“ bzw. „FRA-2“ aus „frischer“ Anlieferung. Nach deren elektrodynamischer Fragmentierung beim Fraunhofer IBP und Gewinnung einer mineralischen Fraktion mit 2 bis 8 mm Korngröße durch Sortier- und Aufbereitungsprozesse wurde das als Müllverbrennungsreststoff (MVR) bezeichnete Material als teilweiser Ersatz für natürliche Gesteinskörnung (Kies) in Betonen eingesetzt.

Die an der TH Köln untersuchten Betone variierten im MVR-Anteil der groben Gesteinskörnung (25% bis 75%), in der Herkunft der MVR bzw. HMVA sowie Art des Zementes. In den baustofftechnologischen Untersuchungen stand neben der Rheologie (Verarbeitbarkeit) die Druckfestigkeit im Vordergrund. Die MVR-Proben erwiesen sich hinsichtlich geometrischer, mechanischer und stofflicher Eigenschaften (siehe Bild 1) als sehr gleichmäßig, was sich in einer vergleichsweise hohen Gleichmäßigkeit der Frisch- und Festbetoneigenschaften bei Variation des MVR-Anteils und der MVR-Herkunft widerspiegelte. Beispielhaft sind in Bild 2 die Druckfestigkeiten von Betonen mit MVR im

# ASHCON

## Einsatz von aufbereiteter Müllverbrennungsasche als Ausgangsstoff bei der Betonherstellung

Vergleich zum Referenzbeton mit 100% natürlicher Gesteinskörnung dargestellt. Als wichtige betontechnologische Erkenntnis war die Wasseraufnahme der MVR bei der Betonkonzeption zwingend zu berücksichtigen, wobei das „Saugwasser“ nicht festigkeitswirksam ist und daher auch nicht in den Wasserzementwert einfließt. Trotz bekannter Wasseraufnahme der MVR und Kompensation durch entsprechend zusätzliche Wasserzugabe im Beton, ließen sich leicht erhöhte Streuungen in den rheologischen Eigenschaften der Betone mit unterschiedlichen MVR-Proben feststellen. Allerdings sind diese Streuungen durch Aussteuerung mit Hilfe von Betonzusatzmitteln beherrschbar. Auch unter Variation des Zementes (CEM III, CEM II/B-S und CEM I) ließen sich die gewünschten Frisch- und Festbetoneigenschaften unter Zugabe von Fließmittel zielsicher einstellen. Wie erste Untersuchungen zum Einsatz von MVR in großtechnischen Anlagen bestätigen, ließen sich die MVR-Proben auf Basis von Erfahrungen mit dem Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen zielsicher bei der Herstellung von Betonprodukten wie Transportbeton (siehe Bild 3) einsetzen.

## Ausblick

Im Rahmen der Projektverlängerung bis Ende 2024 werden die Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit (AKR, Frost), Umweltverträglichkeit und großtechnischen Umsetzung im Werk der Fertigbeton Rheinland GmbH & Co. KG bzw. Metten STEIN+DESIGN GmbH & Co. KG abgeschlossen.

### Projektlaufzeit

1. 2. 2021 – 31. 12. 2024

FKZ 033R258

### Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Björn Siebert  
Technische Hochschule Köln (TH Köln)  
Betzdorfer Str. 2  
50679 Köln  
+49 (0)221 8275 2708  
bjoern.siebert@th-koeln.de

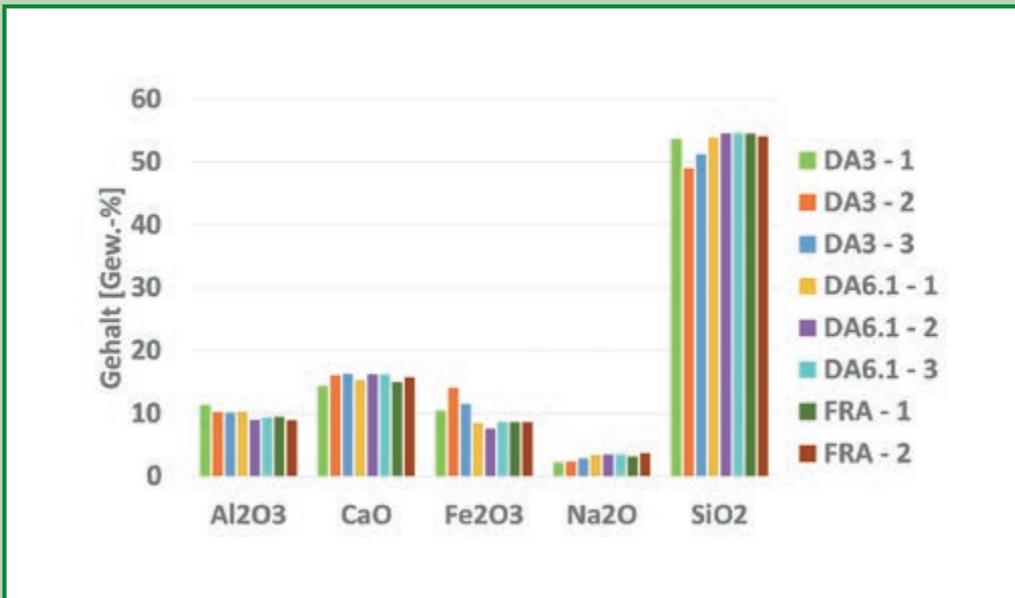


Bild 1:  
Elementgehalt in den  
elektrodynamisch frag-  
mentierten und sortierten  
Hausmüllverbrennungs-  
aschen  
Quelle:  
Norbert Leiss,  
Fraunhofer IBP



Bild 2:  
Druckfestigkeit von Beton  
bei Variation des MVR-An-  
teils an der Gesteinskörnung  
2/8 mm  
Quelle:  
Björn Siebert, TH Köln



Bild 3:  
Betonmischung mit MVR  
im Werk der Fertigbeton  
Rheinland GmbH & Co. KG  
Quelle:  
Daniel Wulff-Janssen,  
TH Köln

## Zielstellung

Das Projekt BAUSEP verfolgt das übergeordnete Ziel durch den Einsatz von Aschen und Schlacken ressourceneffiziente Bauprodukte zu entwickeln und deren Herstellung in die industrielle Produktion zu überführen. Konkret wurden im Zeitraum 02/2021 bis 06/2024 Hausmüllverbrennungsaschen (HMVA) und Eisenhüttenschlacken aus der Eisen- und Stahlproduktion (HOS/LDS) als Substitut für Primärgesteinskörnungen bereitgestellt, um so den Abbau natürlicher Gesteinsvorkommen und den damit verbundenen Landschaftsverbrauch reduzieren zu können. Im Sinne einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft wurden Betonbauteile, wie Pflaster- und Verbundsteine entwickelt und deren Nachhaltigkeit durch eine begleitende Ökobilanzierung und techno-ökonomische Analyse untersucht. In ergänzenden Untersuchungen zu technischen und rechtlichen Gesichtspunkten wurde zudem das Einsatzpotenzial aufbereiteter Hausmüllverbrennungsaschen und Eisenhüttenschlacken in handelsfähigen und vermarktbareren Bauprodukten bewertet.

## Ergebnisse

Nach erfolgter Charakterisierung mehrerer potenziell geeigneter Rohstoffe, wurden die folgenden Materialien zur weiteren Verwendung im Projekt ausgewählt:

- LD-Konverterschlacke (LDS)
- Hochofenstückschlacke (HOS)
- Hausmüllverbrennungsasche (HMVA)

Für die HMVA wurde eine Aufbereitungsstrategie entwickelt, mit dem Ziel für eine höherwertige Bauanwendung die störenden Stoffe nahezu vollständig auszutragen. Hier sind vorrangig Salze, Metall- und Glasfraktionen von Bedeutung. Nach erfolgter Aufbereitung wurden, auf Grundlage von Vorgaben an die Herstellung von regelwerkskonformen Pflastersteinen, alle drei Materialien durch Brechen und Sieben auf eine anwendungstypische Korngrößenverteilung eingestellt. In den so festgelegten Rezepturen, unter Berücksichtigung des höchstmöglichen Ersatzes von natürlicher Gesteinskörnung (Sand/Kies) durch HMV-Aschen und Schlacken, konnten abhängig vom Ausgangsmaterial Substitutionsraten von bis zu 100% erreicht werden. Dabei wurde im Wesentlichen auf eine zielorientierte Verarbeitbarkeit sowie auf eine gute Festigkeitsentwicklung geachtet. Nach ersten Laborversuchen konnte die Herstellung der Pflastersteine beim Projektpartner bzw auf die industrielle Produktion übertragen werden. Dabei zeigte sich, dass sich durch die Nutzung von HMV-Aschen und Schlacken

# BAUSEP

## Separation von Aschen und Schlacken für die Herstellung ressourceneffizienter Bauprodukte

regelkonforme Qualitäten für die Pflastersteinprodukte (siehe Bild 1) erreichen lassen, ohne dass Produktionsprozesse nennenswert angepasst werden müssten. Im weiteren Verlauf des Projektes wurde untersucht, ob die hergestellten „BAUSEP“-Steine recyclingfähig sind. Dazu wurden die Pflastersteine gebrochen und entsprechend fraktioniert. Als relevante Körnung wurde die Fraktion 0/11 festgelegt und auf etwaige Mobilitäten von Inhaltsstoffen mit dem Säulen- und Schüttelverfahren (DIN 19528 bzw. DIN 19529) gemäß Ersatzbaustoffverordnung überprüft. Als Beurteilungsgrundlage dienten dabei die Materialwerte gemäß Ersatzbaustoffverordnung. Im Anschluss wurde diese Körnung verwendet, um deren Einsatz bei der Herstellung von Beton zu untersuchen. In Bild 2 ist ein frisch entschalteter Probekörper zu sehen, dessen Zuschlag zu 100% aus gebrochenem Pflasterstein besteht. Eine Recyclingfähigkeit der BAUSEP-Pflastersteine konnte also aus technischer Sicht eindeutig nachgewiesen werden. Im Rahmen der ökobilanziellen Betrachtung wurde eine potenzielle CO<sub>2</sub>-Einsparung von 2% durch den Ersatz von Sand und Kies durch HMV-Aschen nachgewiesen. Für den Umweltwirkungsfaktor „Resource Use“ wurde ein Faktor von 30% errechnet.

## Ausblick

Die erzielten Ergebnisse im Projekt BAUSEP zeigen ein deutliches Potenzial zur Ressourceneffizienz von HMV-Aschen und Schlacken. Beide Stoffgruppen konnten als Substitut für natürliche Gesteinskörnungen bei der industriellen Produktion von Pflastersteinen eingesetzt werden. Im Umweltwirkungsfaktor „Climate Change“ ist über die Substitution von Rohstoffen nur ein geringer Einfluss (2% für HMVA) erkennbar. Zu dominant wird dieser Faktor von der CO<sub>2</sub>-Bilanz des Zements bestimmt. Aus diesem Grund wollen die Partner des Projektes in weiteren Untersuchungen Lösungsansätze zur Klinkerreduktion bei der Produktion von Betonwaren (z. B. Pflastersteine) entwickeln. Da es zurzeit für HMV-Aschen noch keine Vorgaben zur Umweltverträglichkeit der einzusetzenden Gesteinskörnungen in Betonprodukten gibt, wurde ein Vorschlag für solche Vorgaben entwickelt. Es bleibt abzuwarten, wie sich dieser in der Praxis umsetzen lassen kann.



Bild 1:  
Beim Projektpartner bww industriell  
gefertigte Pflastersteine mit LD-  
Schlacke als Substitut für Gesteins-  
körnungen aus Sand/Kies  
Quelle:  
Sebastian Dittrich, Fraunhofer IBP



Bild 2:  
Entschalter Betonprobekörper,  
statt Sand und Kies wurde die  
BAUSEP RC-Gesteinskörnung  
für die Herstellung des Betons  
verwendet  
Quelle:  
Sebastian Dittrich,  
Fraunhofer IBP

**Projektlaufzeit**

1. 2. 2021 – 30. 6. 2024

FKZ 033R256

**Kontakt**

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP  
Fraunhoferstraße 10  
83626 Valley  
Dr. Sebastian Dittrich  
+49 (0)8024 643209  
sebastian.dittrich@ibp.fraunhofer.de

## Zielstellung

In Deutschland entstehen durch die Müllverbrennung (26 Mio. t/a) ca. 6 Mio. t MV-Schlacke. Nach Abzug der Feuchtigkeit und grober Fraktionen liegen ca. 4 Mio. t Fertigschlacke (Bild 1) vor. Die Fertigschlacke enthält 1,3 Mio. t einer gröberen Fraktion (10–32 mm) und 2,7 Mio. t einer Feinfraktion (0–10 mm), die in Deutschland fast vollständig im Deponiebau verwendet wird. Diese Feinfraktion der MV-Schlacke enthält 0,3–0,5 % Kupfer, soviel wie heute in einem Kupfererz enthalten ist, das auf der Welt abgebaut wird. Im Gegensatz zu natürlichen Erzen liegt das Kupfer bereits überwiegend metallisch – vergesellschaftet mit Gold, Silber und weiteren Edelmetallen – in Form kleiner Partikel und Drähte vor. Damit ist die Feinfraktion unabhängig von Metallpreisschwankungen als Wertstoff zu betrachten. Das primäre Ziel des Vorhabens EMSARZEM ist es, im Sinne eines Urban Minings, mit Unternehmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette ein wirtschaftliches, industriell umsetzbares Verfahren zu entwickeln, mit dem die Metalle möglichst weitgehend durch Brechen, Mahlen, Sieben, magnetische Trennung beziehungsweise Wirbelstromtrennung aus beiden Fraktionen abgetrennt und wieder in die Metallproduktion zurückgeführt werden können. Aufgrund der dissipativen Verteilung in der MV-Schlacke und der daraus resultierenden großen Entropie gehen die Metalle heute im Deponiebau endgültig verloren. Dabei ist es aber für die Wirtschaftlichkeit des gesamten Prozesses entscheidend, dass anschließend die verbleibende feingemahlene mineralische Restfraktion so sauber ist, dass sie als Rohstoff in der Zementproduktion eingesetzt werden kann.

## Ergebnisse

Die bisher vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass die gröbere Fraktion (10–32 mm) und die Feinfraktion (0–10 mm) ohne wesentliche Probleme gemahlen werden können. Aus dem Sankey Diagramm (Bild 1) ist zu entnehmen, dass aus der theoretischen Menge von 2,7 Mio. t/a Feinschlacke nach weiteren Trennungsschritten die folgenden wertvollen Produkte hergestellt werden können:

- Mineralische Fraktion: ca. 1,4 Mio. t/a
- Magnetische Fraktion: ca. 1,2 Mio. t/a
- NE-Metall-Fraktion: ca. 0,1 Mio. t/a.

# EMSARZEM

## Einsatz von MV-Schlacke als Rohstoff für die Zementherstellung

Die zementtechnischen Untersuchungen (Bild 2) zeigen, dass die Festigkeiten eines Zements mit einem Anteil von 4% der mineralischen Fraktion (grüne Balken) der MV-Schlacke mit denen der Referenzzemente identisch sind.

Eine gröbere mineralische Fraktion, die bei der Aufbereitung ebenfalls anfällt, kann zur Herstellung von Beton verwendet werden. Aus Bild 1 ist zu entnehmen, dass im Rahmen der Aufbereitung ca. 100.000 t einer NE-Metall Fraktion (2%) resultieren. In Bild 3 ist dargestellt, in welche Körnungen und unterschiedlichen Fraktionen sich diese aufteilt.

Das Cu-Konzentrat, in dem im Rahmen dieses Projektes ca. 85% Kupfer und 30 ppm Gold analysiert werden konnten, ist die NE-Metall-Fraktion mit dem höchsten Wertinhalt. Aus Bild 3 wird deutlich, dass Metallpartikel in diesen Korngrößen, dissipativ verteilt, nur wiedergewonnen werden können, wenn sie nach dem Prozess der Müllverbrennung aufkonzentriert in der MV-Schlacke vorliegen.

## Ausblick

Auf der Basis der aktuell vorliegenden Daten kann dem Projekt EMSARZEM ein sehr hohes Potenzial für eine industrielle Umsetzung bescheinigt werden. Die Mahl- und Separationsprozesse erfolgten in Technikanlagen, mit denen normalerweise die Einsatzmöglichkeiten der Aufbereitungstechnologien vor der Auslegung großtechnischer Anlagen getestet werden. Im Jahr 2024 soll ein Großversuch in einem Zementwerk stattfinden.

### Projektlaufzeit

1. 2. 2021 – 31. 10. 2024

FKZ 033R265

### Kontakt

GKS-Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt GmbH  
Dr.-Ing. Ragnar Warnecke  
Hafenstraße 30, 97424 Schweinfurt  
+49 (0)9721 6580120  
ragnar.warnecke@gks-sw.de

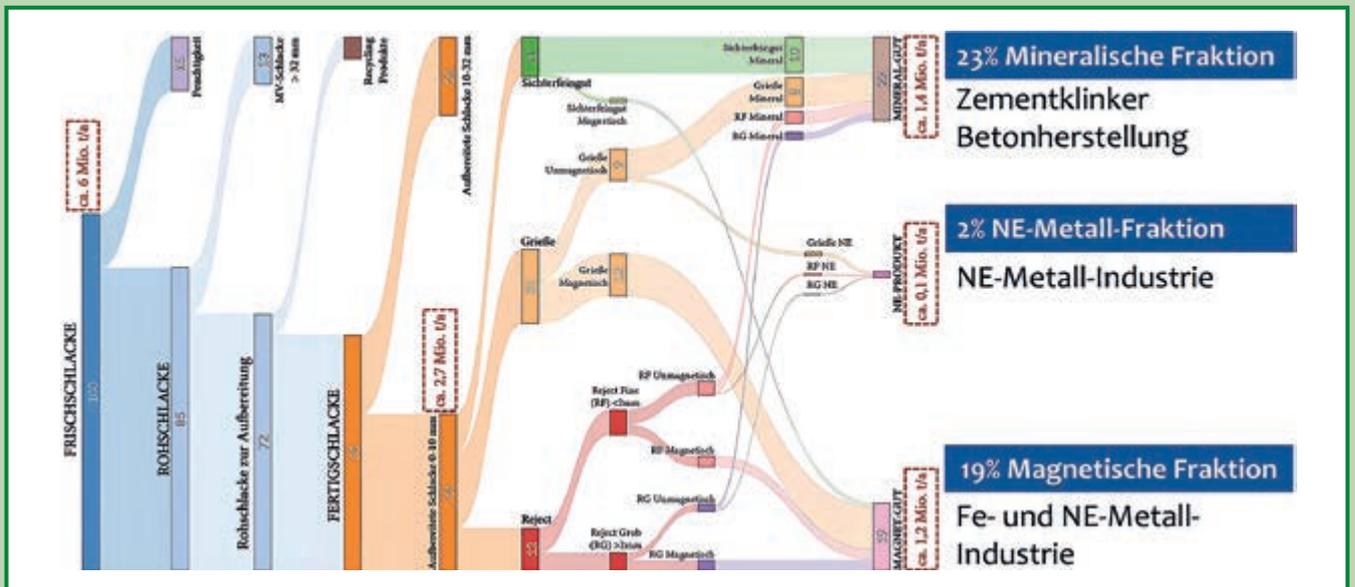


Bild 1: Theoretische Gesamtstoffströme bezogen auf die Frischschlacke  
Quelle: Ida Adhiwiguna, Universität Duisburg-Essen

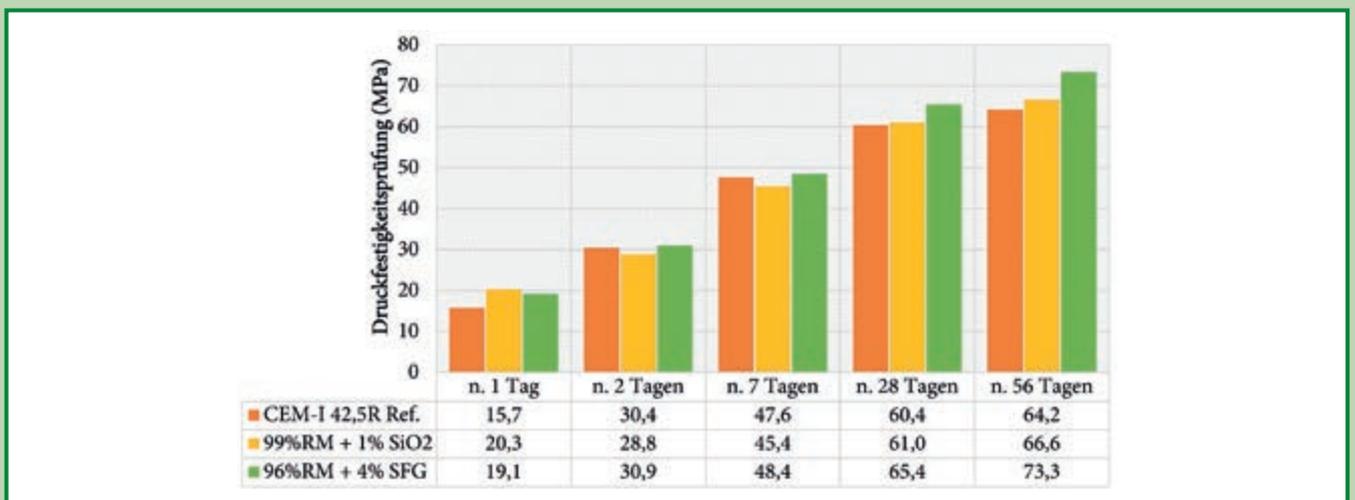


Bild 2: Vergleich der Druckfestigkeit eines Zements nach 56 Tagen unter Verwendung von 4% der mineralischen Fraktion der MV-Schlacke (grün) im Vergleich zu Referenzzementen (orange und gelb)  
Quelle: Sabine Mutke, Wilhelm-Dyckerhoff-Institut für Baustofftechnologie

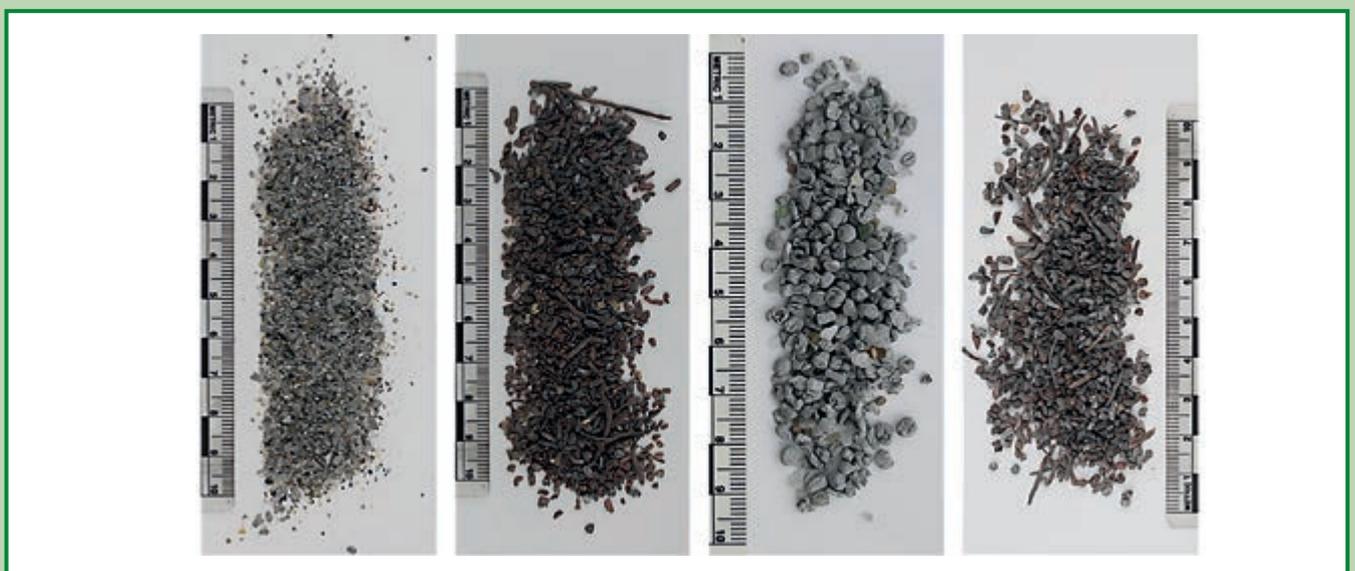


Bild 3: Unterschiedliche zurückgewonnene NE-Metall-Faktionen  
Quelle: Ida Adhiwiguna, Universität Duisburg-Essen

## Zielstellung

Das Projekt FaBeR verfolgt das Ziel einer stofflich hochwertigen, umfassenden Nutzung von zu recycelnden Textilbetonbauteilen. Die Mineralik- und Faserfraktionen sollen in der Produktion von Zement, RC-Beton und Textil-/Faserbetonen genutzt werden. Diese Verwertung soll den übrigen Baustoffstrom faserfrei halten. Weiterhin soll die gesundheitliche Unbedenklichkeit möglicher Faseremissionen über den gesamten Aufbereitungs- und Verwertungszyklus sichergestellt werden. Abschließend erfolgt ein LCA, eine ökonomische Bewertung der entwickelten Baumaterialien und die Entwicklung eines Demonstrators in Form eines faserbewehrten Industriefußbodens.

## Ergebnisse

Die assoziierten Industriepartner Fydro Glassfibreconcrete und Hering Bau haben Produktionsabfälle aus Textilbeton mit Glas- bzw. Carbonbewehrung für die Aufbereitung zur Verfügung gestellt (Bild 1). Am AMR erfolgte die selektive Zerkleinerung mittels Backenbrecher mit anschließender Klassierung zur Sortierung des Betonbruchs. Die Fraktionen 0–2 mm, 2–4 mm, 4–8 mm, >8 mm sowie Carbon- bzw. Glasfaser wurden den jeweiligen Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Der produzierte Betonbruch wurde am ibac charakterisiert und in Zusammenarbeit mit der Firma PAGEL SPEZIAL-BETON als Gesteinskörnung in einer Werk-trockenmischung eingesetzt.

Die Feinfraktion als Zementbestandteil in unterschiedlichen Zusammensetzungen testete die Holcim GmbH im Labor. Im Technikumsmaßstab wurde der Brechsand aufbereitet und anschließend mit Portlandzement und teilweise Hüttensandmehl zu unterschiedlichen Zementarten gemischt. Die unterschiedlichen Feinheiten der Technikumsmahlung beeinflussen die Festigkeiten der R-Zemente im betrachteten Bereich nicht. Diese Ergebnisse zeigen, dass zum Erreichen der Festigkeitsklasse 42,5 mit den verwendeten Mischkomponenten der normative Grenzwert (DIN EN 197-6 Entwurf) von 20 % RC-Mehl nicht überschritten werden sollte.

Die Aufbereitung der Carbonfaserfraktion erfolgt bei der Mitsubishi Chemical Advanced Materials GmbH. In einem Pyrolyseverfahren konnten aus CFK-Abfällen Kurzfasern hergestellt werden, die am ITA auf ihre Verbundeigenschaften beim Einsatz in Beton geprüft wurden. Die Kurzfasern zeichnen sich bereits ohne weitere Oberflächenbearbeitung oder -beschichtung durch hohe Verbundfestigkeiten aus. Neben der Möglichkeit der Knickwinkeländerung und dem Einfluss des Knickwinkels auf die Faserlängenverteilung wurde auch die Faserlängenverteilung mittels des fibreshape-Prüfgerätes der Firma IST AG untersucht.

# FaBeR

## Faser- und Beton-Recycling von Carbon- und Textilbeton

Die Glasfasern konnten bei den verwendeten Proben nicht vollständig vom Beton separiert werden, so dass eine gemischte Fraktion entstanden ist. Mörtelversuche und Versuche im Betonmaßstab zeigen eine prinzipiell gute Verarbeitbarkeit beider Recyclingfraktionen. Es ist ein Rezyklateinsatz von bis zu 100 % der Gesteinskörnung möglich.

Die entstandenen Probekörper werden ab Anfang 2024 mit unterschiedlichen Methoden (Brechen, Mahlen, Fräsen) in einem im Rahmen des Projektes entwickelten Fasermessstand (Bild 2) zerkleinert und die jeweilige Faserfreisetzung untersucht.

Das Ergebnis der Ökobilanzen zeigt, dass sowohl für den entworfenen Demonstrator als auch für die RC-Zement-Mischungen die nach wie vor benötigten primären Materialien (insbesondere Primärzement) ausschlaggebend für die analysierten Umweltkategorien, wie beispielsweise das *Global Warming Potential*, sind. Eine Ausnahme bildet das Humantoxizitätspotenzial für den Demonstratorboden – hier ist der Prozess der Zerkleinerung des Betons anteilmäßig am bedeutendsten. Kostentreiber sind Personalkosten und der Bezug primärer Materialien.

## Ausblick

Basierend auf den bisherigen positiven Ergebnissen, wurden unterschiedliche Rezepturen für faserbewehrten Industriefußboden entwickelt, um sowohl die Carbonkurzfasern, den separierten Betonbruch als auch den glasfaserhaltigen Betonbruch hochwertig zu nutzen. Die Rezepturen werden aktuell im Labor getestet und anschließend mit Unterstützung durch die Baumaschinen Beckschulte KG als Gehwegplatten mit variierenden Zusammensetzungen auf einer Probefläche am ITA eingebaut.

### Projektlaufzeit

1. 5. 2021 – 30. 4. 2024

FKZ 033R253

### Kontakt

apl. Prof. Dr.-Ing. Anya Vollpracht  
Institut für Baustoffforschung der  
RWTH Aachen University  
Schinkelstraße 3, 52062 Aachen  
+49 (0)241 809 5116  
vollpracht@ibac.rwth-aachen.de



Bild 1: CF aus unterschiedlichen Ursprungsproben mit teils noch anhaftendem Bauschutt  
Quelle: Mitsubishi Chemical Advanced Materials GmbH

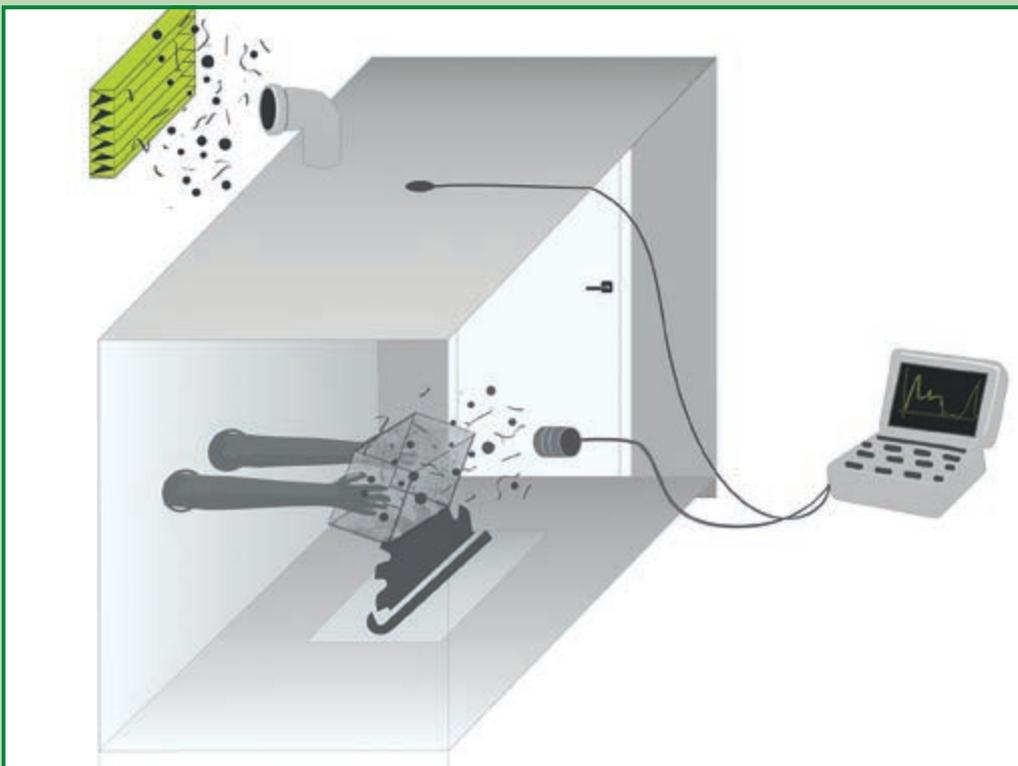


Bild 2: Schematische Darstellung des Versuchszustandes zur Faserfreisetzung  
Quelle: ibac

## Zielstellung

Im Projekt Fertigteil 2.0 werden Betonbauteile aus zum Abriss bestimmten Gebäuden als wiederverwendbare „fertige Bauteile“ für Neubauten gewonnen. Auf Basis einer neuartigen real-digitalen Prozesskette werden Gebäude digitalisiert und als digitaler Zwilling in einem Building Information Modell (BIM) abgebildet. Die Betonbauteile werden anschließend zu flexiblen neuen Fertigteilkonstruktionen zusammengefügt.

## Ergebnisse

Die Wiederverwendung von Bauteilen erfordert neue Planungs- und Bauabläufe. Während digital-reale Prozessketten von Neubauten mit der digitalen Planung starten und dann realisiert werden, steht zu Beginn der real-digitalen Prozessketten ein bestehendes Bauwerk. Im ersten Schritt dieser neuartigen Prozesskette werden daher die realen Bauwerke 3D gescannt und die wiederverwendbaren Betonbauteile systematisch erfasst und digitalisiert. Die realen Betonbauteile werden eindeutig gekennzeichnet (codiert) und als digitaler Zwilling (Geometriemodell mit zusätzlichen Attributen) in einem BIM-Modell abgebildet. Um eine möglichst flexible Wiederverwendung der Betonbauteile zu ermöglichen, werden die ursprünglich individuell verorteten Bauteile nach dem Rückbau durch subtraktive Nachbearbeitung so uniformiert, dass diese flexibel zu neuen Fertigteilkonstruktionen zusammengefügt werden konnten. Die so gewonnenen uniformierten Fertigteilteile 2.0 behalten ihre ursprüngliche Funktion (Stütze bleibt Stütze). Die Basis der neuartigen real-digitalen Prozessketten bildet eine Digitalisierungsplattform (Erfassung, Planung, Verwaltung, Logistik, Fabrikation), die im Projekt prototypisch entwickelt, angewendet und evaluiert wurde und neben der grundlegenden Prozessgestaltung auch die ökologische Bewertung umfasst. Die Veranschaulichung der real-digitalen Prozesskette erfolgte durch einen 1:1 Demonstrator in Form eines Gebäudeausschnittes aus weiterverwendeten Fertigteilteilen 2.0. Eine begleitende Lebenszyklusanalyse ermöglicht die Bilanzierung der ökologischen Effekte.

Durch die Realisierung des Demonstrators konnten zentrale Forschungsfragen beantwortet werden: Erstens konnte die für Fertigteilteile 2.0 entwickelte Herstellungs- und Verbindungsmethode im Gebäudemaßstab realisiert werden. Somit konnte gezeigt werden, dass die Herstellung mithilfe einer geschlossenen real-digitalen Prozesskette grundsätzlich möglich ist. Die Auswertung des Herstellungsprozesses zeigte zweitens, dass die Vorbereitung des Ernteprozesses ein zeitintensiver Arbeitsschritt ist, da die Sägeausrüstung und der Kran auf der Abrissbaustelle im Vor-

# FERTIGTEIL 2.0

## Real-digitale Prozessketten zur Gewinnung von eingebauten Betonbauteilen für die Weiterverwendung als fertige Bauteile

feld genau eingerichtet werden müssen. Sobald diese Vorbereitungen abgeschlossen sind, ist das eigentliche Sägen der Komponenten einfach.

Durch die begleitende Lebenszyklusanalyse konnte nachgewiesen werden, dass die Wiederaufbereitung und Wiederverwendung von rückgebauten Bauteilen zu signifikanten Einsparungen in der Ökobilanz führen, trotz des aufwändigen Ernteprozesses, der Transportwege und dem Aufbereitungsprozess. Die Ergebnisse der Ökobilanz zeigen, dass die Treibhausgasemissionen des wiederverwendeten Bauteils um ca. 65% geringer sind als die von Recyclingbeton oder konventionellem Beton. Unter den gewählten Modellbedingungen weisen die wiederverwendeten Bauteile in einem Transportradius von etwa 700 km geringere Emissionen auf als konventionell hergestellte Beton-elemente vor Ort.

## Ausblick

Das Projekt Fertigteil 2.0 bietet verschiedene wissenschaftliche und wirtschaftliche Weiterverwertungsmöglichkeiten. Die gewonnenen Erkenntnisse und entwickelten Technologien können im Rahmen von zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsprojekten im Feld der Kreislaufwirtschaft für die Baubranche eingesetzt werden. Der Ansatz des Projekts, eine Digitalisierungsplattform und einen Marktplatz für Bauteile zu schaffen, bietet das Potenzial einer größeren Vernetzung, besserer und digitalisierter Zusammenarbeit, sowie von digitalisierten Prozessabläufen in der Baubranche. So lassen sich Planung, Verwaltung, Logistik und Fabrikation zukünftig kreislaufgerecht optimieren.

### Projektlaufzeit

1. 3. 2021 – 30. 6. 2023

FKZ 033R255

### Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Oliver Tessmann  
Technische Universität Darmstadt  
Fachbereich Architektur  
DDU – Digital Design Unit – Digitales Gestalten  
El-Lissitzky-Str.1  
64287 Darmstadt  
+49 (0)6151 16-22483  
tessmann@dg.tu-darmstadt.de



Bild 1:  
Selektiver Rückbau mit einer  
diamantbestückten Beton-  
säge als Konzeptnachweis  
für die Gewinnung von  
Betonteilen zur Wiederauf-  
bereitung und Wiederver-  
wendung als Fertigteile 2.0.  
*Quelle:*  
Malcolm Unger, DDU,  
TU Darmstadt



Bild 2:  
Zusammengebauter  
1:1-Demonstrator aus  
wiederaufbereiteten,  
modularen Fertigteilen 2.0.  
*Quelle:*  
Lukas Ledderose, ITE,  
TU Darmstadt



Bild 3:  
Gebauter Demonstrator als  
Fragment einer größeren  
Gebäudestruktur.  
*Quelle:*  
DDU, TU Darmstadt

## Zielstellung

Vor dem Hintergrund der Endlichkeit und teils schwierigen Zugänglichkeit der natürlichen Gipsvorkommen bei aktuellem Rückgang der REA-Gipse aus der Kohleverstromung, sollen bisher unzureichend genutzte Potenziale des Recyclings von Gipsprodukten sowie sonstiger Gipsquellen identifiziert und bewertet werden. Ziel des Projektes ist somit die Ausweitung der Sekundärrohstoffpotenziale für die Herstellung von Recyclinggips. Im Projekt GipsRec 2.0 sollten technische Möglichkeiten zur Verfügbarmachung dieser Potenziale aus Gipsfaserplatten (GFP) (Bild 1) und Synthesegipsen entwickelt werden.

## Ergebnisse

Im Projekt wurden umfangreiche Recherchen zu Stoffströmen, Potenzialen und Qualitäten von GFP und Synthesegipsen durchgeführt und deren Materialeigenschaften analytisch untersucht. Die Aufkommen bzw. die Potenziale an GFP-Abfällen, insbesondere aus dem Rückbau und Abbruch, wurden recherchiert und ausgewertet. Darüber hinaus wurden bestehende Potenziale an Synthesegipsen aus industriellen Prozessen und deren Einsatzmöglichkeiten für das Recycling eruiert. Darauf aufbauend wurden geeignete Prozessketten zur Rückgewinnung der Wertstoffe Gips und Papier abgeleitet, die in entsprechende Versuchsanordnungen zur Findung geeigneter Aufbereitungstechnologien eingeflossen sind.

Zum Erreichen der Zielstellung, einer nahezu sortenreinen Trennung der in den GFP vorhandenen Gipsfraktion von der Papierfraktion und damit die Rückgewinnung von Gipsen als potenzielle Wertstoffquelle für die Gipsindustrie, erfolgten großtechnische Versuche mit unterschiedlicher Zerkleinerungs- (Stachelwalzenbrecher, Hammermühle) und Siebtechnik (Russell-Vibrationssieb und 10g-Linearschwingsieb). Die Ergebnisse zeigen, dass eine sehr gute Trennung der GFP in die ursprünglichen Wertstoffe Gips und Papier mittels der entwickelten Prozesskette möglich ist (Bild 2). Die abgetrennte Gipsfraktion (Bild 3) zeigte eine Reinheit, die eine Wiederverwendung in der Gipsindustrie zulässt. Die Papierfraktion kann ebenfalls einer Verwertung in der Gipsindustrie zugeführt werden. Hinsichtlich der Reinheit zur stofflichen Verwertung in der Papierindustrie besteht noch weiterer Optimierungsbedarf.

Basierend auf der Potenzialerhebung für vorhandene Synthesegipse wurde der Schwerpunkt auf deren Rückgewinnung aus Batteriesäuren gelegt, da hier ein hohes Potenzial beim Recycling von Altbatterien zu erwarten ist.

Im Rahmen der Forschungsarbeit sind verbrauchte Batteriesäuren in umfangreichen Versuchen, unter

# GipsRec2.0

## Technische Vorbereitung der Verfügbarmachung von Gipsfaserplatten und Synthesegipsen zur Herstellung von RC-Gips

Ausnutzung von Fällungsreaktionen und anschließender Filtration der Gipsfraktion, im Labormaßstab untersucht worden. Die dabei entstandenen Gipsfraktionen wurden laborchemisch auf deren Reinheit und Restkontamination, insbesondere Schwermetalle, untersucht. Daraus abgeleitet wurde eine Prozesskette entwickelt, die in der Praxis ihre Anwendung finden könnte. Die Ergebnisse zeigen, dass dieses Verfahren ein großes Potenzial im Hinblick auf die Rückgewinnung des Wertstoffes Gips aus Batteriesäuren besitzt.

Für die entwickelten Prozessketten wurden im Rahmen des Forschungsprojektes entsprechende Öko-Bilanzen erstellt sowie Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen vorgenommen. Dabei wurden diesen Betrachtungen Standortanalysen für Recyclingstandorte in Deutschland für neue und bestehende Gipsrecyclinganlagen, basierend auf den vorhandenen Abfallpotenzialen, zu Grunde gelegt.

## Ausblick

Die Ergebnisse des Projektes GipsRec2.0 verdeutlichen, dass ein GFP-Recycling in Deutschland technisch und ökonomisch umsetzbar ist. Die im Rahmen des Projektes entwickelte Technologie zur Aufbereitung von GFP ist im großtechnischen Maßstab einsetzbar. Ökonomisch ist eine Erweiterung in Betrieb befindlicher Gipsrecyclinganlagen durch Adaption der entwickelten Prozesskette sinnvoll. Dementsprechend kann die Umsetzung des GFP-Recyclings in der Praxis zur Gewinnung des verfügbaren Wertstoffpotenzials empfohlen werden.

Die Rückgewinnung von Synthesegipsen (Bild 4) aus verbrauchter Batteriesäure besitzt ebenfalls ein großes Wertstoffpotenzial. Inwieweit das betrachtete Verfahren in der Praxis realisiert werden kann, sollte mit den dafür in Betracht kommenden Wirtschaftsakteuren – Batterierecyclingunternehmen – weiter diskutiert und die Rentabilität und Umsetzbarkeit eruiert werden.

Beide betrachteten Aufbereitungsverfahren besitzen ein großes Potenzial für eine praktische Umsetzung und sollten durch dafür in Betracht kommende Wirtschaftsunternehmen weiterverfolgt und auf politischer bzw. administrativer Ebene unterstützt werden.



Bild 1: Gipsfaserplatten-Ausgangsmaterial



Bild 2: Papier- und Gipsfraktion nach Aufbereitung  
Quelle: MUEG

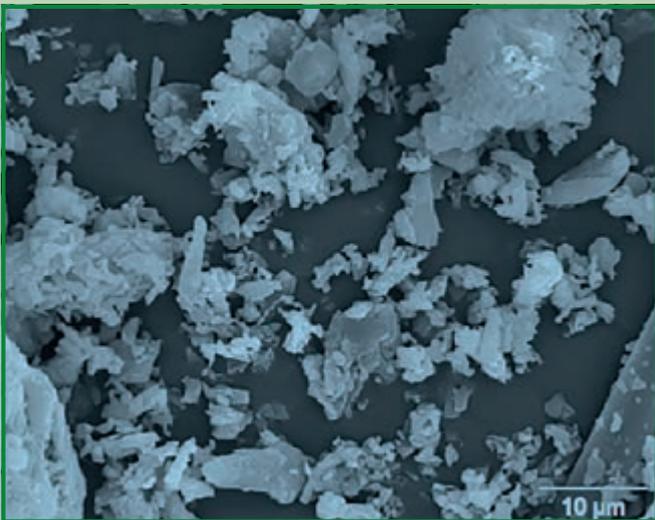


Bild 3: REM-Untersuchung – Gipsfraktion  
Quelle: MPA

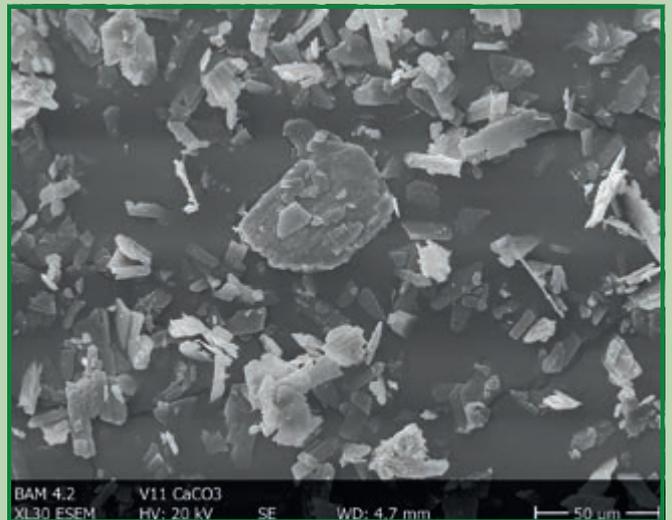


Bild 4: SEM-Untersuchung –  
Synthesegips bei Fällung mit  $\text{CaCO}_3$   
Quelle: BAM

**Projektlaufzeit**

1. 2. 2021 – 30. 4. 2024

FKZ 033R267

**Kontakt**

MUEG Mitteldeutsche Umwelt- und  
Entsorgung GmbH  
Geiseltalstraße 1  
06242 Braunsbedra  
Dipl.-Ing. Jörg-Michael Bunzel  
+49 (0)34633 41 115  
joerg-michael.bunzel@mueg.de

## Zielstellung

Für die Schaffung geschlossener Stoffkreisläufe in der mineralischen Baustoffindustrie werden vor allem sortenreine Materialfraktionen benötigt. Im Forschungsvorhaben wurde die Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) als neues Sortierverfahren für Baustoffe untersucht und eingesetzt. Klassische Sensortechnologien (NIR und Farbe) wurden durch LIBS ergänzt, um die Erkennungsraten zu erhöhen und Störstoffe möglichst frühzeitig innerhalb einer noch nicht etablierten Vorsortierung abzutrennen.

## Ausgangssituation

Der Großteil der Gebäude, die sich derzeit im Rückbau befinden, sind durch großes Materialvolumen, zunehmende Materialvielfalt und die Verwendung von Verbundbaustoffen gekennzeichnet. Das führt zu einer starken Heterogenität von Bauschutt und Baustellenabfällen, die vor der möglichen Weiterverwendung anforderungsgerecht sortiert werden müssen. Daher werden automatische Sortierverfahren benötigt, um verschiedene Nebenbaustoffe (Fremd- und Störstoffe) sowie Schadstoffe so früh wie möglich zu erkennen und von den Hauptbaustoff-Gemischen (Beton, Ziegel, Kalksandstein und Porenbeton) auszuschleusen. Dies ist auch der Tatsache geschuldet, dass der klassische selektive Rückbau und die händische Sortierung bei stationären Baustoffrecyclinganlagen zunehmend an ihre Grenzen der technischen Machbarkeit stoßen. Hinzu kommen der sich verschärfende Fachkräftemangel sowie der Platzbedarf für die selektive Sammlung der Materialien auf der Baustelle.

## Ergebnisse

Im Projekt wurden NIR-, SWIR- und LIBS-Spektralinformationen von 91 Proben verschiedener Bau- und Abbruchabfälle gesammelt. Mithilfe extrahierter Absorptionsmerkmale (NIR, SWIR) und Elementinformationen (LIBS) wurden Klassifikationsmodelle für jeden Sensor trainiert und anschließend in Form einer Kreuzvalidierung auf unbekannte Testproben angewandt. Die somit ermittelten Vorhersagewahrscheinlichkeiten für jede Materialgruppe gaben Aufschluss über Stärken und Schwächen der Sensoren und ermöglichten eine Datenfusion über die gewichtete Zusammenführung

# LIBS-ConSort

## Laserbasierte Baustoffsortierung zur Aufbereitung von Bau- und Abbruchabfällen für die Kreislaufwirtschaft

der Einzelklassifikationen in einem finalen Votingprozess (Bild 1). Zur Umsetzung der methodischen Kombination wurde ein Prototyp im Labormaßstab aufgebaut, welcher zur echtzeitfähigen Klassifikation verschiedenster Baustoffe dienen soll. Die Schwerpunkte liegen hierbei auf einer automatisierten Datenaufnahme aller Sensoren und der anschließenden fusionierten Verarbeitung mittels multivariater Analyse und maschinellem Lernen.

Die Ergebnisse werden als vielversprechend für die spektrale Erkennung von mineralischen Baustoffen angesehen. Die zusätzlichen Informationen der RGB-Kamera sollen die Erkennungsraten weiter verbessern. Simultan zur Entwicklung des Prototyps werden ein erweiterter Datensatz von Prüfkörpern und der Einfluss von Verschmutzung und Feuchtigkeit auf die Erkennungsgenauigkeit untersucht. Auch Verbundwerkstoffe werden gesondert betrachtet, um ein Konzept für eine zuverlässige Identifizierung zu entwickeln. Die abschließende Validierung erfolgt an „unbekannten“ Referenzproben aus der Praxis, um statistische Aussagen zu Detektionswahrscheinlichkeiten treffen zu können. Die bisher erarbeiteten Erkenntnisse fließen direkt in die Entwicklung eines Demonstrators im Technikumsmaßstab (Bild 2) ein. Auf diesem können verschiedene Materialproben nach der Aufgabe linear eingespart und dem Strahlungsbereich zugeführt werden. Die Probe wird mit dem verbauten Laser beschossen (Bild 3) und das entstehende Plasma analysiert. Der Vergleich des erfassten Spektrums mit den Informationen aus der Materialdatenbank ermöglicht die Klassifizierung und damit die Ausschleusung der Probe.

## Ausblick

Angesichts des großen Potenzials einer chemisch-mineralogischen Sortierung durch die Kombination von NIR-, SWIR- und LIBS-Technologie empfiehlt sich eine Weiterentwicklung der Methodik bis hin zum industriellen Einsatz. Ebenso erscheint eine Übertragbarkeit auf weitere Fragestellungen, wie die Charakterisierung feinkörniger Bau- und Abbruchabfälle vielversprechend.

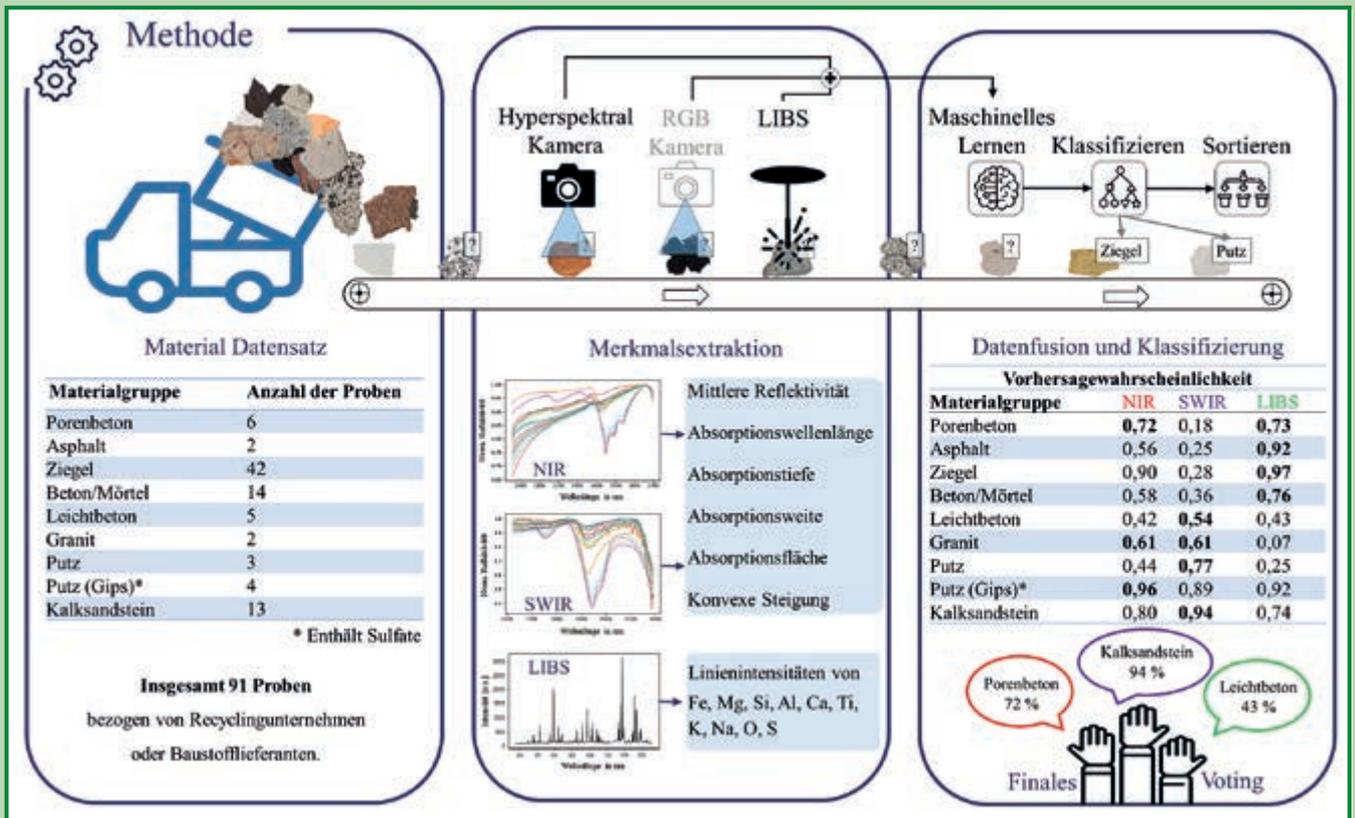


Bild 1: Methodologie der Datenfusion  
Quelle: Klewe (BAM, Berlin)



Bild 2: LIBS-Demonstrator am IAB  
Quelle: Müller (IAB Weimar)

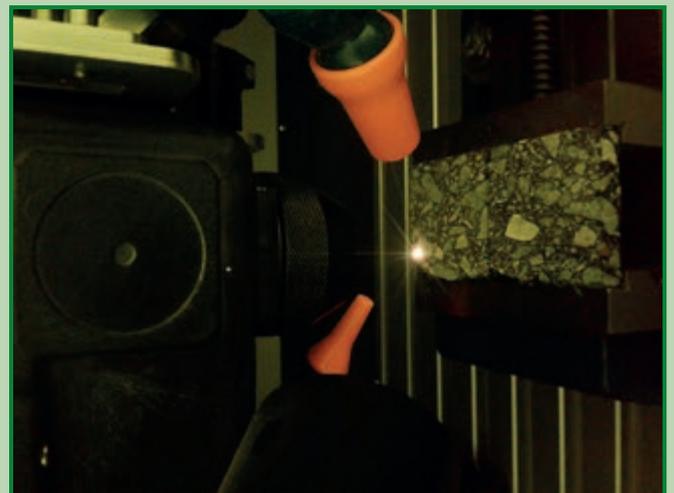


Bild 3: Laserschuss auf eine Betonprobe  
Quelle: Götz (IAB Weimar)

**Projektlaufzeit**

1. 2. 2021 – 31. 7. 2024

FKZ 033R259

**Kontakt**

IAB Weimar gGmbH  
Über der Nonnenwiese 1  
99428 Weimar  
Dr.-Ing. Barbara Leydolph  
+49 (0)3643 8684-145  
b.leydolph@iab-weimar.de

## Zielstellung

Die Erzeugung nahezu vollständig mineralischer Stoffkreisläufe für hybride Deckenelemente unter Substitution von Polystyrol-Hartschaum durch mineralische Ersatzbaustoffe stellt die zentrale Zielstellung des Projektes dar.

## Ergebnisse

Durch die Integration von großflächigen Polystyrol-Verdrängungskörpern in Deckensysteme, lassen sich die konstruktiven Vorteile einer Flachdecke mit den statischen Vorzügen einer Haupt-Nebenträger-Struktur kombinieren. Aufgrund des kraftschlüssigen Verbundes zwischen den Dämm-Elementen und dem angrenzenden Beton entstehen jedoch nach Ablauf der Gebäudenutzung schwer zu trennende Verbundabfälle. Als Alternative zu den Polystyrol-Elementen wird im Projekt ein mineralisierter Schaum entwickelt, welcher sich aufgrund seines im Vergleich zum Stahlbeton geringen Gewichts (ca. 500 kg/m<sup>3</sup>) als Verdrängungskörper eignet und in seiner technischen Leistungsfähigkeit den herkömmlichen Polystyrol-Hartschäumen überlegen ist. Durch den Einsatz von rezykliertem Brechsand als Komponente des Mineralschaums lässt sich ein breites Anwendungsfeld für die aktuell nicht genutzten Recyclingpotenziale öffnen. Durch den Austausch der polystyrolbasierten Verdrängungskörper soll ein hybrides Deckenelement mit einer unteren und oberen Betonschale aus Normalbeton und einer vollflächigen Kernschicht aus Mineralschaum entstehen (siehe Bild 1).

Zur Beschreibung des Trag- und Verformungsverhaltens der Sandwichhybriddecke werden Berechnungsmodelle für die einzelnen Schichten erstellt, welche anschließend miteinander gekoppelt werden. Hierzu sind die mechanischen Eigenschaften der Ausgangsstoffe sowie ihr Zusammenwirken in der Gesamtstruktur zu erforschen. Aus diesem Grund wurden im Projektverlauf zahlreiche Mischungsentwürfe mit unterschiedlichen Trockenrohdichten entwickelt, hergestellt und auf ihre mechanischen Eigenschaften untersucht. Zur rechnerischen Quantifizierung wurde das mechanische Verhalten des Mineralschaums anhand der ex-

# MIN-LOOP

## Substitution polystyrolbasierter Hartschäume durch zementgebundenen Mineralschaum aus rezykliertem Brechsand in Sandwichhybriddecken für rein mineralische Stoffkreisläufe im Hochbau

perimentellen Untersuchungen approximiert (siehe Bild 2). Es wurden Ingenieurmodelle zur nichtlinearen Berechnung der Schnitt- und Verformungsgrößen der Betonschalen und der Kernschicht entwickelt. Die numerischen Modelle wurden hierbei mittels Finite-Elemente-Berechnungen verifiziert (siehe Bild 3).

Während des gesamten Projektverlaufes wurden weiterhin die ökobilanziellen Einflüsse auf Baustoff-, Bauteil- sowie auf Gebäudeebene untersucht. Die Bilanzierungsergebnisse zeigen, dass sich mittels Substitution der PS-Elemente durch Mineralschaum eine deutliche Einsparung von nicht erneuerbarer Primärenergie sowie eine Senkung des Treibhauspotenzials erreichen lässt.

## Ausblick

Im verbleibenden Projektverlauf werden die Ingenieurmodelle durch experimentelle Untersuchungen validiert sowie die Reversibilität des Deckenelementes untersucht.

### Projektlaufzeit

1. 2. 2021 – 31. 1. 2024

FKZ 033R261

### Kontakt

RPTU Kaiserslautern  
Fachbereich Bauingenieurwesen  
Fachgebiet Massivbau & Baukonstruktion  
Prof. Dr.-Ing. Matthias Pahn / Felix Ruppert, M.Sc.  
Paul-Ehrlich-Straße 14  
67663 Kaiserslautern  
+49 (0)631 205-3083  
matthias.pahn@bauing.uni-kl.de

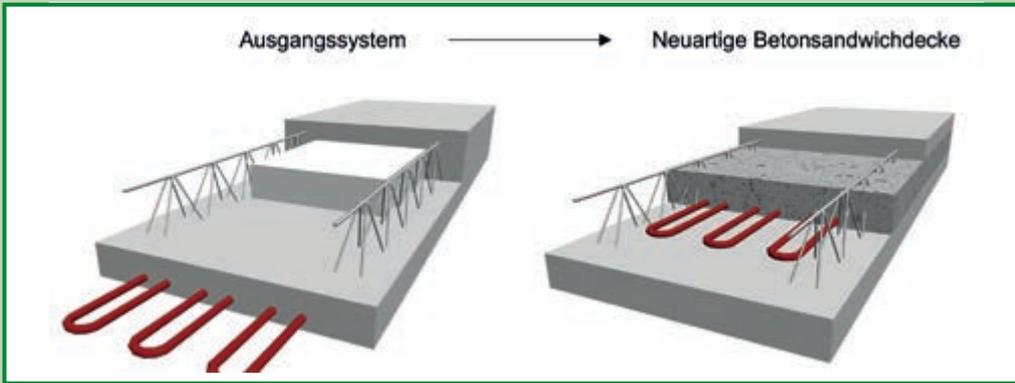


Bild 1:  
Prinzipische Skizze der hybriden  
Betonsandwichdecke  
Quelle:  
Felix Ruppert

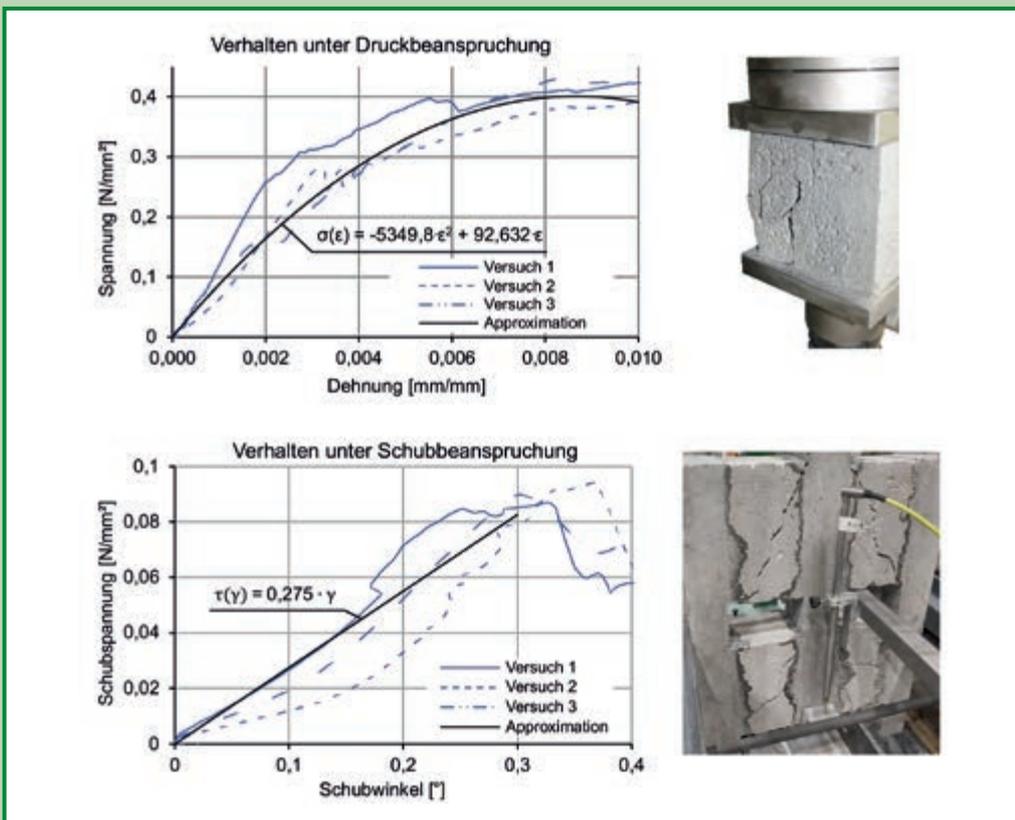


Bild 2:  
Ergebnisse der mechani-  
schen Untersuchungen  
Quelle:  
Felix Ruppert

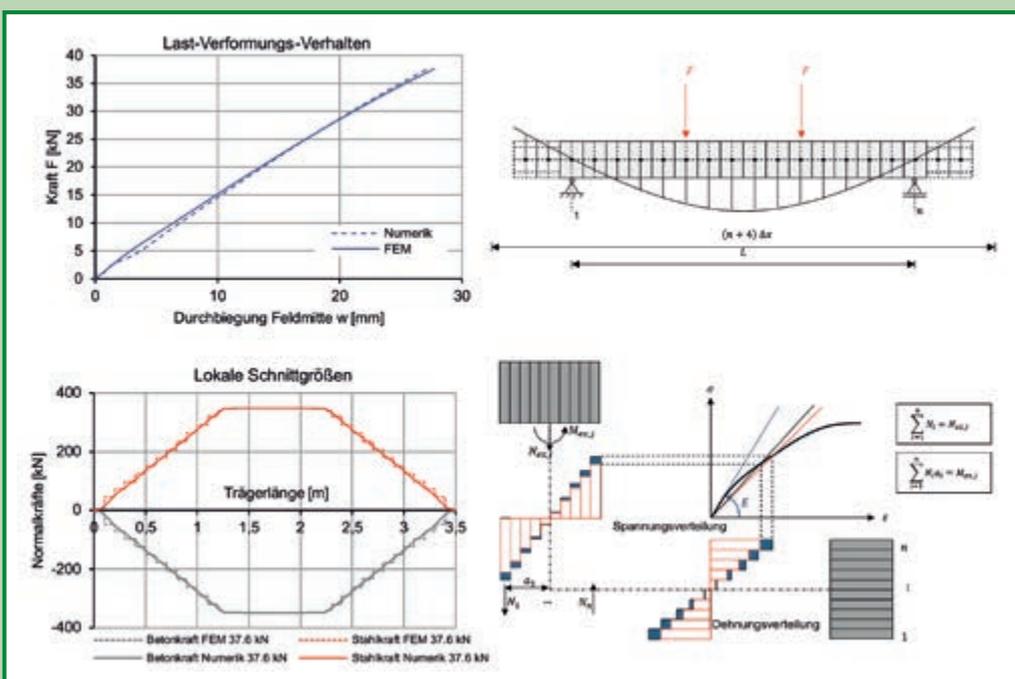


Bild 3:  
Ergebnisse der numerischen  
Untersuchungen  
Quelle:  
Felix Ruppert

## Zielstellungen

Inwieweit lassen sich ziegelhaltige Recyclingbaustoffe (Bild 1) als Hauptbestandteil im Zement verwerten? Interdisziplinär und branchenübergreifend untersucht R-ZiEMENT, wie sich ressourceneffiziente Zemente mit ziegelhaltigen Recyclingbaustoffen und verringertem Klinkeranteil herstellen und im Beton anwenden lassen.

Wie können Recyclingstoffströme mit Ziegel angereichert werden? Welche Verwertungsmöglichkeiten ergeben sich aus Ziegelschleifstaub? Wie sollten ziegelhaltige Stoffströme zusammengesetzt sein und wie sind sie aufzubereiten? Welche Eigenschaften entstehen im Mörtel und Beton, wenn ziegelmehlhaltige Zemente angewendet werden?

Auf diese Fragen gibt das Projekt Antworten und verknüpft damit die Kreislaufwirtschaft zwischen den produzierenden Industriezweigen Ziegel, Baustoffrecycling, Zement und Beton.

## Ergebnisse

Die Untersuchungen der Stoffströme der Recycling- und Ziegelwerke haben ergeben, dass die Ziegelanteile eines Stoffstroms ebenso variieren können wie die Reaktivität der entsprechenden Ziegelbestandteile. Je nach chemisch-mineralogischer Zusammensetzung und Brenntemperatur eines Ziegelbestandteils zeigten sich in den Untersuchungen der Hydratationswärme (ASTM C1897-20) von Ziegel- und Mauerwerksbruch in Bindemittelpasten zum Teil deutliche Unterschiede in der puzzolanischen Reaktivität. Auch der Ziegelanteil eines RC-Stoffstroms bzw. einer RC-Baustoffprobe führte zu unterschiedlichen Reaktivitäten.

Mit Blick auf Schad- und Störstoffe wurden an den ziegelhaltigen Recyclingbaustoffen Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit durchgeführt, die sich zunächst an den Empfehlungen der LAGA sowie an den Kriterien zur Verwendung von siliziumreicher Flugasche und Kesselsand in Betonbauteilen (DAfStb-Richtlinie) orientierten. Mit dem Vorliegen der Produktnorm EN 197-6 für klinkereffiziente Zemente mit rezyklierten Feinstoffen sind die in den Prüfplänen des DIBt geforderten Höchstwerte nach DIN 4226-101 einzuhalten.

Je nach stofflicher und granulometrischer Zusammensetzung ressourceneffizienter Zemente wird neben der Druckfestigkeit auch die Gefügeentwicklung beeinflusst. Diese Effekte entscheiden über die Anwendungsmöglichkeiten im Beton und damit darüber, wie weit der Klinkeranteil reduziert, CO<sub>2</sub>-Emissionen verringert und natürliche Ressourcen eingespart werden könnten.

# R-ZiEMENT

## Ziegelhaltige Recyclingbaustoffe als Rohstoff für ressourceneffiziente Zemente in dauerhaften Betonen

Die R-Zemente mit einem RC-Anteil von 30 M.-% in Kombination mit 70 M.-% CEM I 52,5 R erzielten Normfestigkeiten zwischen 58 MPa und 68 MPa. Die im R-Zement eingesetzten RC-Materialien aus Ziegel- oder Mauerwerksbruch wiesen dabei Feinheiten  $\geq 5000 \text{ cm}^2/\text{g}$  (Blaine) sowie variierende Reaktivitäten (entsprechend einer Hydratationswärme von ca. 30 J/g bis 220 J/g) auf. Ein Zusammenhang zwischen der Hydratationswärme und der Druckfestigkeit bestand nicht (Bild 2).

Zur Untersuchung zulassungsrelevanter Betoneigenschaften wurde z. B. der Frostwiderstand mit dem Würfelverfahren geprüft. Die Druckfestigkeiten der Betone mit einem Wasserzementwert  $w/z = 0,60$  erreichten Werte zwischen 36,5 MPa und 42,0 MPa. Unabhängig vom RC-Material im Zement wurde das DIBt-Bewertungskriterium für die Abwitterungen nach 100 Frost-Tau-Wechseln  $\leq 10 \text{ M.-%}$  eingehalten (Bild 3).

## Ausblick

Basierend auf den Ergebnissen der Laborversuche sollen in großtechnischen Betriebsversuchen ziegelhaltige R-Zemente mit einem Klinkerfaktor von ca. 70% hergestellt werden. Dabei ist sowohl eine gemeinsame Mahlung eines CEM II/B-Q bzw. CEM II/B-F sowie eine getrennte Mahlung mit anschließendem Mischen von Klinker, Kalkstein und gesiebttem Ziegelschleifstaub zu CEM II/B-M (Q-LL) vorgesehen. Abschließende Dauerhaftigkeitsprüfungen und ökobilanzielle Berechnungen sollen den Weg zur Einführung dieser R-Zemente in die Baupraxis sowie Möglichkeiten einer Produktentwicklung hin zu deutlich klinkerreduzierten R-Zementen vorbereiten.

### Projektlaufzeit

1. 2. 2021 – 31. 7. 2024

FKZ 033R263

### Kontakt

Dr. Christoph Müller, Katrin Severins  
VDZ Technology gGmbH  
Toulouser Allee 71  
40476 Düsseldorf  
+49 (0)211 4578 253  
katrin.severins@vdz-online.de



Bild 1:  
Ziegelhaltige Recyclingbaustoffe aus unterschiedlichen Aufbereitungsstufen: als Ausgangsstoff, als Recyclingbrechsand und als Recyclingmehl  
Quelle:  
VDZ Technology gGmbH/  
Julia Vogel

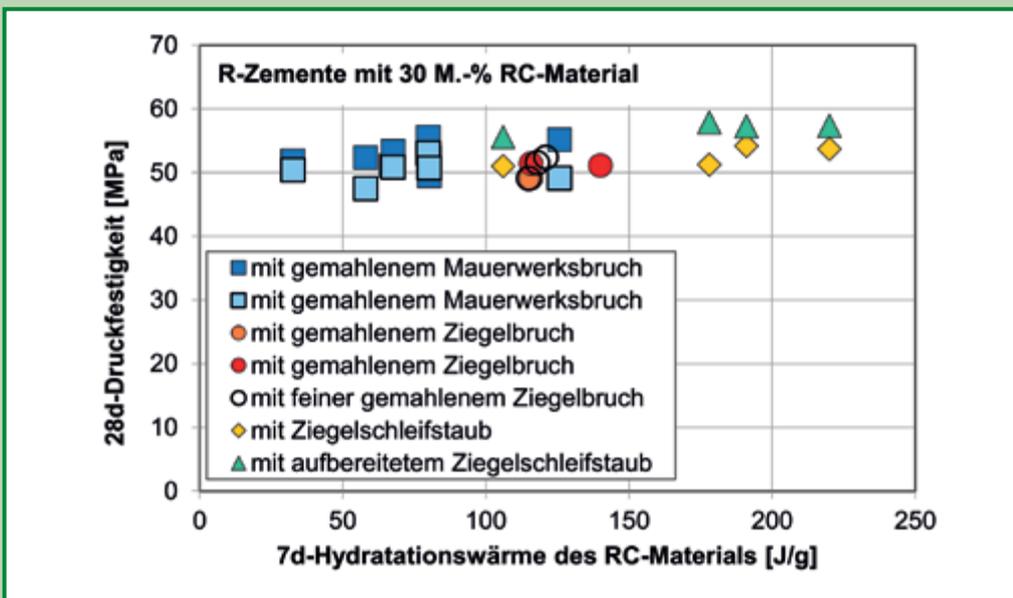


Bild 2:  
Einfluss der Reaktivität des RC-Materials auf die Normfestigkeit von R-Zementen mit einem RC-Anteil von 30 M.-% in Kombination mit 70 M.-% CEM I 52,5 R; Druckfestigkeit gemäß EN 196-1 (Prüfalter 28 Tage); Hydratationswärme gemäß ASTM C1897-20 (Prüfalter sieben Tage) zur Einordnung der puzzolanischen Reaktivität des RC-Materials im Zement  
Quelle:  
VDZ Technology gGmbH/  
Katrin Severins

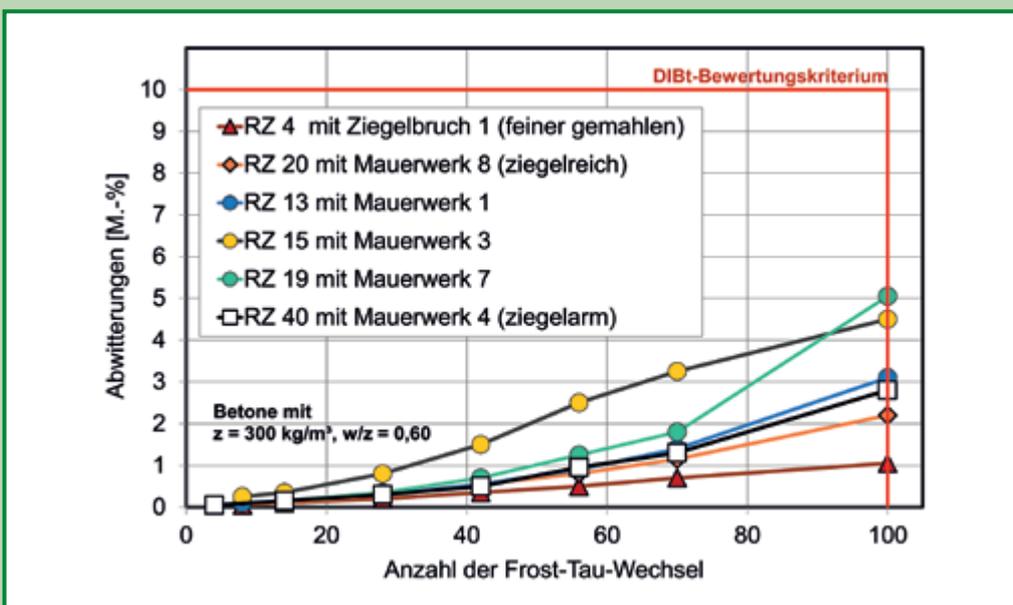


Bild 3:  
Frostwiderstand der Betone im Würfelverfahren, Abwitterungen der Betone mit einem Zementgehalt  $z = 300 \text{ kg/m}^3$  sowie einem Wasserzementwert  $w/z = 0,60$  in Abhängigkeit der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel, Anwendung von R-Zementen mit einem RC-Anteil von 30 M.-% in Kombination mit 70 M.-% CEM I 52,5 R  
Quelle:  
VDZ Technology gGmbH/  
Katrin Severins

## Zielstellung

Ziel des Projekts REALight ist die Entwicklung einer Referenzanlage zur Herstellung von Leichtgranulaten (lightweight aggregates, LWA) aus mineralischen Bau- und Abbruchabfällen. Ausreichend große Mengen an LWA für Applikationstests sind zu erzeugen. Daneben sind Demonstratoren für die praxisnahe Erprobung herzustellen. Auch soll die Technologie hinsichtlich der Nutzung weiterer Einsatzstoffe sowie zwecks Gipsrückgewinnung erweitert werden – als Voraussetzung zur Übertragung der Produkt- und Verfahrensidee in die Praxis und als Nachweis für die Machbarkeit der Sulfatabtrennung und -rückgewinnung aus gipshaltigem Material. Gegenstand des Projekts sind zudem Untersuchungen zur Verbreiterung der Rohstoffbasis durch Einkopplung spezifischer Stoffströme.

## Ergebnisse

Als Rohstoffe wurden hauptsächlich bisher ungenutzte oder auf sehr niedrigem Niveau eingesetzte mineralische Bauabfälle wie gemischter Bauschutt und Ziegelbruch eingesetzt. Um die Rohstoffbasis zu verbreitern, wurde in einem Rohstoffassessment die Eignung anderer Materialien untersucht: Aschen, Schlämme, Brechsande und weitere Reststoffe.

Die bautechnischen Eigenschaften der LWA, ihre umweltanalytischen Eigenschaften und die Beton- bzw. Mörtelkennwerte wurden fortlaufend ermittelt. Zum Blähverhalten von Rohstoffmischungen erfolgten zudem chemisch-physikalische Untersuchungen. Mögliche Blähmittel verschiedener Herkunft kamen zum Einsatz. Ansätze zur Identifikation neuer, wirtschaftlicher Blähmittel wurden gefunden.

In einer Pilotanlage des Instituts für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH erfolgten Versuchskampagnen zur Herstellung der LWA (Bild 1). In einem mehrstufigen mechanischen Prozess, bestehend aus Brechen, Sieben, Mahlen, Blähmittelzugabe, Homogenisieren und finalem Granulieren, wurden Grüngranulate hergestellt. Im Anschluss erfolgte im Drehrohrofen eine thermische Behandlung der Granulate, die zur Volumenzunahme bei gleichzeitiger Verfestigung führt. Die Sulfatabtrennung durch thermische Zersetzung bildet die Grundlage der REA-Gips-Gewinnung. An der Anlage wurden ein Nasswäscher und eine stationäre Gasanalyse installiert. Die grundsätzliche Machbarkeit der Sulfatabtrennung konnte nachgewiesen werden. Die in der Pilotanlage hergestellten LWA wurden den Projektpartnern für die Materialprüfungen und die Applikationstests zur Verfügung gestellt.

Die Beton und Naturstein Babelsberg GmbH sowie die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) entwickelten mit LWA der Körnungen 0 – 4 mm

# REALight

## Leichtgranulate und REA-Gips aus feinkörnigen sulfatbelasteten Bau- und Abbruchabfällen und industriellen Nebenprodukten

bzw. 4 – 8 mm Rezepturen für Leichtbetone mit dem CO<sub>2</sub>-armen Bindemittel Celitement. Der Leichtbeton weist bei Prüfung von Betonwürfeln mit 150 mm Kantenlänge eine Trockenrohddichte von 800 kg/m<sup>3</sup>, eine Druckfestigkeit von 10,8 MPa und eine Gesamtporosität von 63,5 % auf. Das angestrebte Ziel der Herstellung eines Infraleichtbetons wurde damit erreicht. Als Demonstratoren wurden Fassadenelemente aus diesem Infraleichtbeton hergestellt (Bild 2).

Die OPUS Denkmalpflege GmbH entwickelte leichte Füllmörtel, bestehend aus feinkörnigen, gebrochenen Leichtgranulaten der Körnungen 0 – 0,5 mm, 0,5 – 1 mm, 1 – 2 mm und 2 – 4 mm. Für die denkmalgerechte Restauration Cottaer Sandsteine sind, abgestimmt auf die Füllmörtel, leichte Deckmörtel der Körnung 0 – 0,5 mm entwickelt worden. Das zweistufige Mörtelsystem soll zum Auffüllen größerer Fehlstellen dienen. Bild 3 zeigt ein Prisma aus Deck- und Füllmörtel auf Kalkbasis.

## Ausblick

Die Eignung heterogenen ziegelhaltigen Bauschutts als Ausgangsstoff zur Herstellung leichter Gesteinskörnungen wurde im Technikumsmaßstab nachgewiesen. Das Projekt REALight stellt einen weiteren Schritt für das Scale-Up der Technologie dar. Erstmals wurde auch die Möglichkeit der Sulfatentfrachtung nachgewiesen. Zur technischen Umsetzung der Gipsrückgewinnung aus dem Prozess sind weitere Arbeiten notwendig. Außerdem sind weitere Untersuchungen an verschiedenen Rohstoffmischungen zum Blähverhalten von Interesse, um wirtschaftliche Blähmittel zu identifizieren und den Herstellungsprozess zu optimieren.

### Projektlaufzeit

1. 2. 2021 – 31. 1. 2024

FKZ 033R257

### Kontakt

Bauhaus-Universität Weimar  
Professur Werkstoffe des Bauens  
Dipl.-Ing. Alexander Schnell  
Coudraystr. 11  
99423 Weimar  
+49 (0)3643 58-4608  
alexander.schnell@uni-weimar.de



Bild 1:  
Leichtgranulate am Ofen-  
auslass des Drehrohrofens  
Foto:  
IAB Weimar gGmbH

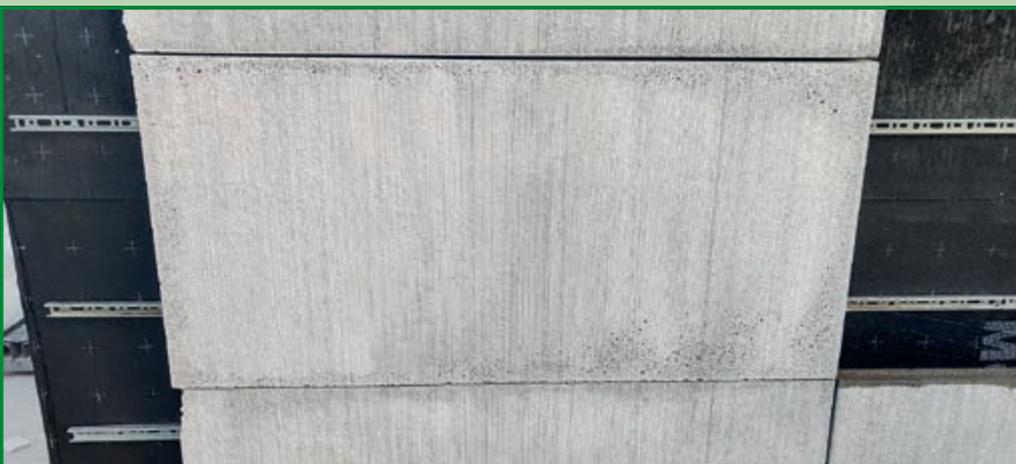


Bild 2:  
Leichtbetonfassaden-  
platten aus Infralichtbeton  
als Demonstrator  
Foto:  
Beton- und Naturstein  
Babelsberg GmbH



Bild 3:  
Restauriermörtel  
für die Denkmalpflege  
Foto:  
OPUS Denkmalpflege GmbH

## Zielstellung

Das Ziel des Projekts war es, einen sicheren Gesamtprozess im schadstoffbelasteten Baubestand zu ermöglichen – von der Erfassung über die Sanierung und Ausschleusung von Asbest bis hin zur Erzeugung sicherer Recyclingmaterialien (RCM). Entsprechende Branchen waren im Konsortium vertreten.

## Ergebnisse

Die Anwendungen neuer Untersuchungsmethoden und Probenahmestrategien, insbesondere der VDI 6202 Blatt 3 zur systematischen Erkundung und Bewertung von Asbest in baulichen und technischen Anlagen und der VDI 3876 zum Messen von Asbest in Bau- und Abbruchabfällen zeigten, dass Asbest im Bestand sowie im Bauschutt sicher und systematisch nachgewiesen werden kann.

Asbest hat in einer Vielzahl von Bauprodukten Anwendung gefunden. Dieses können konkret erfassbare Bauprodukte wie leichte Platten oder Asbestzementplatten sein, aber auch flächig aufgetragene Baustoffe wie Putze, Klebstoffe oder Spachtelmassen. Letztere können bei Renovierungsarbeiten durch geringe Asbestfaseranteile zu großen Raumluftbelastungen beitragen und wie alle anderen Asbestprodukte zu unterschwelligen und grenzwertrelevanten Belastungen der Bauabfälle führen. Die Analysen mittels Rasterelektronenmikroskop als Zählverfahren zeigen dabei auch die Spurenbelastungen im Bauschutt immer wieder klar auf und weisen auf die vorab ungenügend ausgeführte Entfrachtung hin.

Auch optisch sind einige Asbestbauprodukte im Haufwerk schnell erkennbar und behindern die Weiterverwendung des Wirtschaftsgutes Recyclingmaterial. Prüfungen haben gezeigt, dass je größer das Haufwerk, desto häufiger sind schon relativ geringe Stückkonzentrationen an der Oberfläche sichtbar. Diese führen dann zum Ausschluss aus dem Stoffkreislauf.

# RECBest

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

Die Erkennbarkeit von Asbestbauprodukten variiert sehr stark, sowohl bei intakten Materialien im Bauwerk als auch an zerstörten Materialien im Haufwerk. Die Auswahl von Materialien zur Beprobung und Analyse ist dabei auf die visuelle Bestimmung als Asbestverdachtsmaterial angewiesen. Für den prüfenden Sachverständigen wurde daher eine Bestimmunggrundlage mit den charakteristischen Merkmalen an zahlreichen Beispielen erstellt.

Da der Beton bzw. der Stahlbeton einen erheblichen Anteil am Bauschutt aufkommen bildet und zudem ein wichtiges Wirtschaftsgut im Stoffkreislauf darstellt, wurden zur Erkundung von asbesthaltigen Abstandhaltern nicht-invasive Verfahren, wie die Betonradiographie erprobt. Diese kann erste Hinweise auf die Verwendung potenziell asbesthaltiger Spannhülsen liefern. Visuelle Prüfungen sind in günstiger Lage auch an der Oberfläche möglich. Nach einem Abtrag der Oberflächen wird die vollständige Ortung und die gezielte Entfernung asbesthaltiger Abstandhalter möglich (Bild 1).

Zur selektiven Entfernung wurde auch ein Hochdruckstrahlverfahren entwickelt, das Spannhülsen in wässriger Suspension direkt erfasst, absaugt und dabei die Stahlbewehrung sowie den umgebenden Beton unzerstört zurücklässt. So ist es möglich, asbestfreies RCM zu erzeugen und die Asbest-Mineralstoffdeponien trotz der Vorgaben der neuen Vollzugshilfe zur Entsorgung asbesthaltiger Abfälle (LAGA M-23 von 05/2023) weiterhin zu entlasten.

Nicht nur vorab im Bestand, sondern auch nach dem Abbruch im Haufwerk kann es notwendig sein, asbesthaltige Abstandhalter sicher zu erkennen und zu entfernen. Mit der Fotogrammetrie wurden zerkleinerte Materialien optisch charakterisiert und die Wiedererkennung der Bruchstücke durch KI-Verfahren mit über 99% in ersten Serien bestätigt (Bild 2).

Bei der ökonomischen Betrachtung der *end-of-life*-Phase von Asbest bzw. asbesthaltigen Baumaterialien wird deutlich, dass der selektive Rückbau inklusive Ausschleusung der asbesthaltigen Materialien aus dem Stoffkreislauf dann lohnenswert ist, wenn man die Wiederverwertung der entfrachteten Materialien in die Bilanzierung einbezieht.

## Fazit und Ausblick

Die Erkenntnisse bzw. Ergebnisse des Forschungsprojektes fanden bereits Berücksichtigung in Richtlinien und werden in noch laufenden Richtlinienengremien einbezogen. Eine Studie im Auftrag des BMDV zur Bearbeitung von Straßenbaubrücken aus Stahlbeton mit asbesthaltigen Abstandhaltern zur Vorbereitung eines Leitfadens baut auf Ergebnissen aus RECBest auf. Es sind Publikationen und zahlreiche Fachbeiträge auf Kongressen entstanden. Die Machbarkeit der

dringend notwendigen Ausschleusung von Asbest aus dem Stoffkreislauf ist in technischer sowie wirtschaftlicher Hinsicht demonstriert worden.

Weiterer Entwicklungsbedarf besteht akut im Bereich der Trenntechnik und der instrumentellen *live* Erkennung. Hier sind bereits weitere Projekte beabsichtigt. Voraussetzung hierfür ist der dringend benötigte rechtliche Rahmen für die Forschungstätigkeit mit Asbest, in Form der erwarteten Novellierung der Gefahrstoffverordnung.

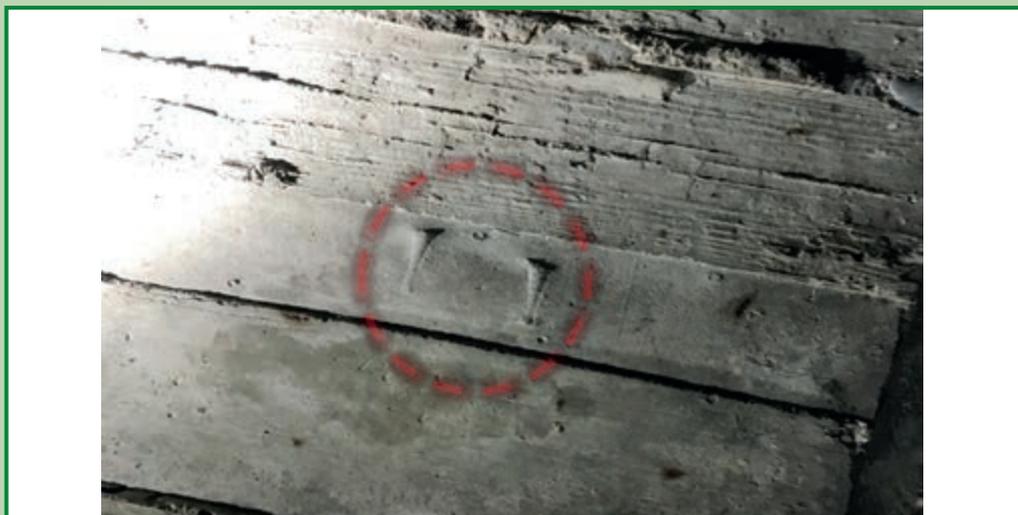


Bild 1:  
Visuell sichtbarer Abstandhalter an der Unterseite einer Stahlbetondecke  
Quelle:  
Wessling GmbH

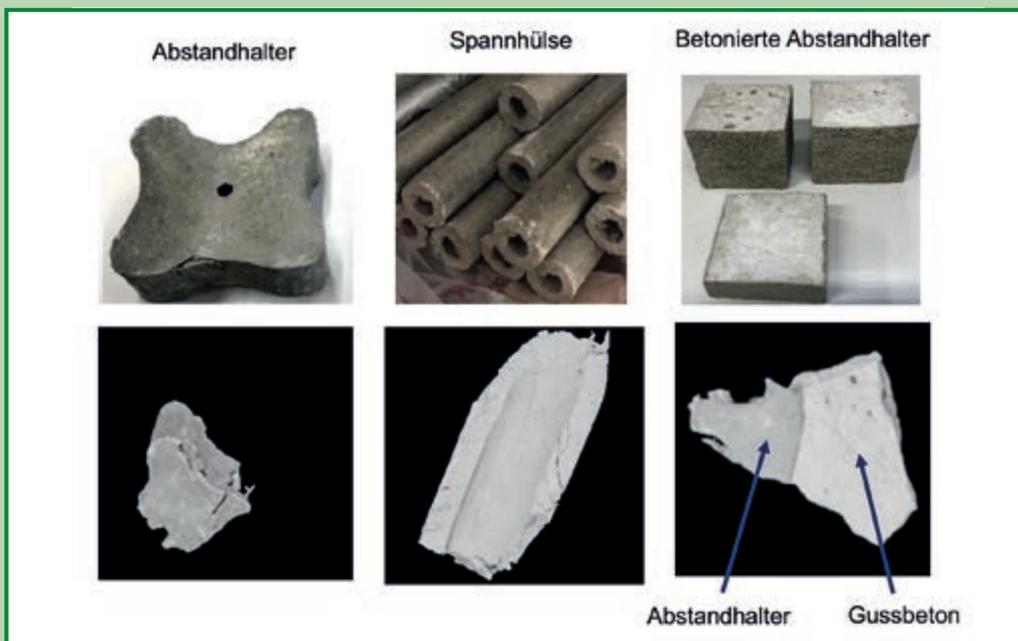


Bild 2:  
Beispielhafter Datensatz unterschiedlicher Komponenten aus Stahlbetonabbruchmaterial mit potenziell asbesthaltigen Hilfsbauteilen zum Trainieren einer Bilderkennungssoftware  
Quelle:  
TU Berlin, MVTA

### Projektlaufzeit

1. 3. 2021 – 30. 9. 2023

FKZ 033R268

### Kontakt

Dr. Martin Hönig  
WESSLING GmbH  
Kohlenstraße 51–55  
44795 Bochum  
+49 (0)2346897510  
martin.hoenig@wessling.de

## Zielsetzung

Die Schließung des Baustoffkreislaufs im Bauwesen und insbesondere im Betonbau wird durch stark ausgeprägte Streuungen der Materialeigenschaften von Rezyklaten (im konkreten Fall von rezyklierten Gesteinskörnungen aus rezyklierbarem Bauschutt) stark behindert. Materialschwankungen müssen durch hohe Sicherheitspuffer ausgeglichen werden, was die Verwendung dieser Stoffe unwirtschaftlich macht und ökologisch sehr nachteilig ist. Zielsetzung des Projekts ReCyCONtroll ist es, die Ressourceneffizienz bei der Herstellung von Beton signifikant zu steigern, indem die technischen Voraussetzungen geschaffen werden, um bislang aufgrund zu großer Materialstreuungen ungeeignete Rohstoffe einzusetzen und aus Qualitäts-sicherungsgründen erforderliche große Sicherheitspuffer in der Betonzusammensetzung (i.d.R. hohe Zementgehalte) reduzieren zu können. Dies soll durch die Einführung automatisierter, selbstlernender Prozessüberwachungs-, -steuerungs- und -regelungsmethoden bei der Betonherstellung erfolgen.

## Ergebnisse

Im Zentrum der Arbeiten des Projekts ReCyCONtroll stand die Entwicklung berührungsfreier Messsysteme und selbstlernender Prozesssteuerungs- und Regelungsmethoden für die Betonherstellung, die es gestatten, die nachteiligen granulometrischen und stofflichen Schwankungen der Betonausgangsstoffe – und hier insbesondere der Rezyklate – zu erfassen und darauf aufbauend die Eigenschaften des Endprodukts Beton durch eine Aussteuerung der Betonzusammensetzung sowie der Frischbetoneigenschaften während des Mischvorgangs durch Zugabe speziell abgestimmter Additive vorzunehmen. Wesentliche Elemente sind Techniken zur online-basierten Erfassung der Ausgangsstoff- und der Frischbetoneigenschaften mittels sog. Computer Vision- bzw. Deep-Learning-basierter Methoden (Bild 1).

Für die Methodenentwicklung war es zunächst notwendig eine Charakterisierung marktüblicher fraktionierter Rezyklate unterschiedlicher stofflicher Zusammensetzung (Betonbruch, Mauerwerksbruch, natürliche Gesteinskörnung) vorzunehmen und übliche Schwankungsbereiche der Eigenschaften zu identifizieren. Darauf aufbauend wurde eine Quantifizierung des Einflusses der Eigenschaftsschwankungen (Korngrößenverteilung, Materialzusammensetzung) auf die Frischbetoneigenschaften (Konsistenz, rheologischen Eigenschaften, etc.) vorgenommen.

# ReCyCONtroll

## Selbstlernende Steuerungstechniken für die automatisierte Produktion robuster Ressourcenschutzbetone – Schlüssel für die umfassende Verwertung mineralischer Stoffströme

Die sensorgestützte Erfassung granulometrischer Ausgangsstoffschwankungen – hier insbesondere der Gesteinskorneigenschaften – erfolgt mittels optischer Sensorik, die auf dem Zulieferband der Gesteinskörnung installiert wird und somit in der Lage ist, die Gesamtmenge der tatsächlich für den jeweiligen Mischungsentwurf verwendeten Gesteinskörnung zu erfassen. Ein Deep-Learning-basierter Auswertalgorithmus ermittelt dabei kontinuierlich und hochpräzise die Korngrößenverteilung, Kornform und stoffliche Zusammensetzung aus den aufgenommen Bilddaten. Im Vergleich zu klassischen Methoden (Siebung) zur Ermittlung der Korngrößenverteilungskurven, welche üblicherweise stichprobenhaft ermittelt werden, erzielt das entwickelte Verfahren Ergebnisse mit mittleren absoluten Abweichungen von unter 2 % für die prädierten Massenanteile der einzelnen Korngrößenfraktionen.

Um darüber hinaus den Übergang von einer reinen Qualitätserfassung hin zu einer Qualitätsregelung zu ermöglichen, werden zum einen Algorithmen benötigt, die den Beton auf Basis der inline ermittelten Schwankungen der Gesteinskorneigenschaften aussteuern. Zum anderen bedarf es Methoden, die das Ergebnis der Regelung, d. h. der Frischbetoneigenschaften, präzise erfassen. Hierzu wird mithilfe von videooptischen Systemen mit angeschlossener digitaler Bildauswertung das Strömungsverhalten des Betons im Mischer erfasst und mittels Deep-Learning-basierter Auswertalgorithmen in rheologische Kenngrößen (Konsistenz, Fließgrenze, plastische Viskosität) überführt. Speziell entwickelte bauchemische Additive für die Kopplung mit den entwickelten Auswertalgorithmen ermöglichen durch deren Zugabe eine gezielte Aussteuerung der rheologischen Eigenschaften des Betons. Da die Rheologie des frischen Betons auch während dieser Additivzugabe durch die Sensoren erfasst werden kann, besteht die Möglichkeit, iterativ selbstlernende Algorithmen zur Aussteuerung der Betoneigenschaften einzusetzen und damit eine digitale Überwachung des Produktionsprozesses zu ermöglichen.

Die zuvor beschriebenen Methoden zur sensorbasier-

ten Prädiktion der Ausgangsstoffeigenschaften und rheologischen Kennwerte des Frischbetons sind im Projektverlauf in eine Pilotmischanlage im Technikum des Instituts für Baustoffe der Leibniz Universität übertragen worden (Bild 2). Hier gelingt es bereits im jetzigen Entwicklungsstadium, eine präzise Prädiktion der Ausgangsstoff- und Frischbetoneigenschaften vorzunehmen.

Im weiteren Projektverlauf sollen die zuvor beschriebenen Methoden im Rahmen von großtechnischen Untersuchungen zum Einsatz kommen. Hierfür wird das Transportbetonwerk eines Projektpartners mit der entsprechenden Sensortechnik ausgestattet. Dies stellt den erfolgreichen Übertrag der entwickelten Techniken vom Labormaßstab hin zum praxisrelevanten Einsatz bei der Betonherstellung dar.

## Ausblick

Durch das breit angelegte Spektrum an beteiligten Industrie- und Forschungspartnern sowie dem institutionellen Bauherrenpartner können im Projekt alle für diese Technologie zu erwartenden Probleme adressiert und berücksichtigt werden. Dadurch ist auch eine direkte und zielgerichtete wirtschaftliche Umsetzung der Projektergebnisse in der Praxis möglich. Der Einsatz automatisierter, selbstlernender Prozessüberwachungs- sowie -regelungsmethoden bei der Betonherstellung stellt auch wissenschaftlich eine hoch innovative Neuerung dar. Die daraus resultierenden Erfolgsaussichten zur Generierung neuen Wissens sind als äußerst hoch einzuschätzen. Eine Übertragbarkeit der erarbeiteten Steuerungstechniken auf andere Stoffströme ist in hohem Maße zu erwarten.

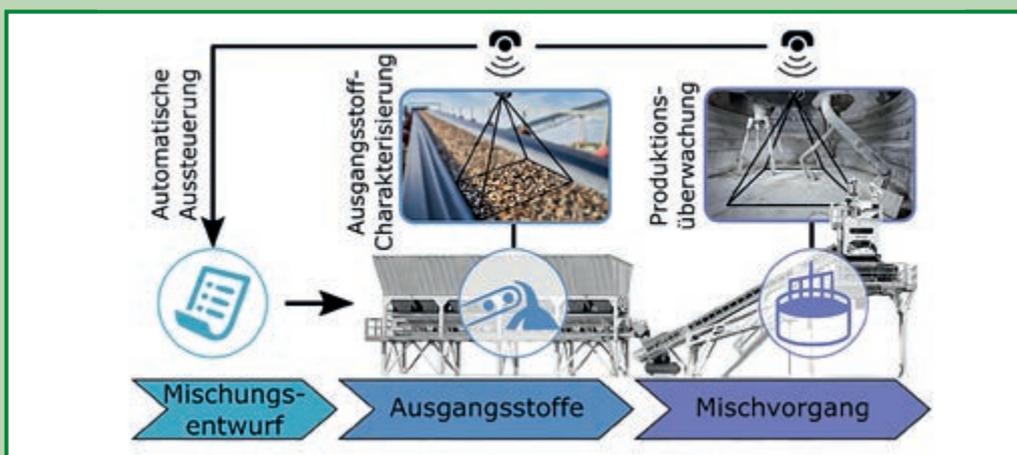


Bild 1:  
Computer Vision basiertes  
Konzept zur automatischen  
Qualitätsregelung bei der  
Betonherstellung  
Quelle:  
Institut für Baustoffe



Bild 2:  
Sensorgestützte Pilotmisch-  
anlage im Technikum der  
Leibniz Universität Hannover  
Quelle:  
Institut für Baustoffe

### Projektlaufzeit

1. 5. 2021 – 31. 12. 2024

FKZ 033R260

### Kontakt

Leibniz Universität Hannover,  
Institut für Baustoffe (IfB) und Institut für  
Photogrammetrie und GeoInformation (IPI)  
30167 Hannover  
Prof. Dr. Michael Haist  
+49 (0)511 762 - 37 22  
haist@baustoff.uni-hannover.de

## Zielstellung

Im Projekt RekoTi wird ein Ressourcenplan für den kommunalen Tiefbau entwickelt, der Kommunen die Möglichkeit gibt Ressourcenpotenziale bei Brücken, Kanalisation und Verkehrsflächen zu erkennen. Im Projekt werden das anthropogene Materiallager ermittelt, alternative Bauweisen und Verfahren untersucht, kommunale Prozesse analysiert, Managementansätze weiterentwickelt und die Ergebnisse in einer digitalen Toolbox inklusive digitalem Leitfaden zusammengefasst, siehe Bild 1.

## Ergebnisse

Für die drei genannten Infrastrukturanlagen wurde das kommunale anthropogene Materiallager der Beispielmkommune abgeschätzt. Bei Brücken sind die drei Bauteilgruppen Überbau, Unterbau und Gründung jeweils in Typenvertreter eingeteilt worden. Jedem Typ wurden auf Basis empirischer Untersuchungen Formeln zur statistischen Massenabschätzung zugeordnet. Betreffs Kanalisation und Verkehrsflächen wurden Konstruktionsdatenbanken aufgebaut, die mittels weniger Basisattribute eine Massenabschätzung ermöglichen. Berücksichtigt wurden hierzu die Haltungen und Schächte (Kanalisation) bzw. Fahrbahnen und ihre Nebenanlagen, wie Geh- und Radwege (Verkehrswege).

Mit der Versuchsstrecke „Kanalstraße“ wurde das Ziel verfolgt, Kenntnisse über die Einsatzmöglichkeiten und Ressourceneinsparpotenziale alternativer Bauweisen zu erlangen. Anhand von sechs Versuchsfeldern erfolgte die Untersuchung des Einsatzes von Asphaltgranulat in einer Asphaltdeckschicht aus Splittmastixasphalt (SMA). Hierbei wurden drei Versuchsfelder in temperaturabgesenkter Bauweise erstellt. Dies ist derzeit in den Regelwerken für SMA nicht vorgesehen und wird daher kaum umgesetzt. Die Kontrollprüfungen zeigten, dass eine den aktuellen Regelwerksanforderungen entsprechende Einbauqualität erreicht wurde. Abhängig vom Asphaltgranulatanteil im SMA (0, 20 und 50 M.-%) ergaben sich Einflüsse auf die Herstellung und den Einbau (z. B. in Bezug auf Mischzeiten und Walzeneinsatz) des Asphaltes. Die Ausführung der temperaturabgesenkten Asphaltdeckschicht aus SMA mit einem Asphaltgranulatanteil von 20 M.-% war unter den Randbedingungen der Praxis weitgehend problemlos handhabbar. Insgesamt zeigt die Versuchsstrecke u. a. Einsparpotenziale bei der Verwendung von Primärrohstoffen und dem Energiebedarf bei der Asphaltproduktion auf.

Daneben wurden im Bereich der Brücken insbesondere Schnellbauweisen wie Bewehrte Erde oder Fertigteilkonstruktionen analysiert, sowie für die Kanalisation geschlossene Bauweisen dem Flüssigbodenverfahren als offene Bauweise gegenübergestellt. Insgesamt

# RekoTi

## Ressourcenplan kommunaler Tiefbau

wurden so Alternativen inklusive Anwendbarkeitskriterien und Ressourceneinsparpotenziale aufgezeigt.

Bei der Weiterentwicklung eines Straßenerhaltungsmagementsystems wurden umweltbezogene Aspekte in die Entscheidungsfindung einbezogen. Die bislang verfügbaren Ökobilanz-Datensätze decken nicht die notwendige Detailtiefe ab, weshalb bei der Weiterentwicklung lediglich der Materialbedarf als umweltrelevanter Aspekt berücksichtigt wurde. Hierbei konnte aufgezeigt werden, dass die jeweils verfolgte Zielsetzung (Ressourcen- oder monetäre Effizienz) Auswirkungen auf den Ressourcen- und monetären Aufwand sowie auf die Zustandsentwicklung der Verkehrsflächen hat.

Die prototypisch entwickelte digitale RekoTi-Toolbox basiert auf der GIS-Software QGIS und unterstützt Kommunen im netzweiten Infrastrukturassetmanagement. Initial auf Münster fokussiert, verarbeitet sie die diversen, für die Infrastrukturanlagen Brücke, Kanalisation und Verkehrsfläche vorliegenden Daten. Die Toolbox bestimmt dabei das kommunale anthropogene Materiallager GIS-basiert, indem Bestandsdaten mit externen Quellen verknüpft werden. Abb. 2 illustriert dies exemplarisch anhand der berechneten Werte für die Kanalhaltungen. Weiter können Materialhotspots identifiziert sowie Objekt- und Netzinformationen unterschieden und editiert werden. Hinzu kommt die Integration von Daten aus verschiedenen externen Infrastrukturmanagementsystemen, welches die Anzeige der zeitlichen Materialverfügbarkeit und entstehenden Kosten im Zusammenhang mit geplanten Maßnahmen ermöglicht. Die Anwendung soll zudem eine Schnittstelle für die BIM-basierte Maßnahmenplanung bereitstellen und auf diese Weise die Abfrage und Integration von modellbasierten Ressourcendaten ermöglichen. Durch die verschiedenen Anwendungsszenarien und die Integration unterschiedlicher Datenquellen ist die RekoTi-Toolbox als ein Baustein zur Optimierung des kommunalen Infrastrukturassetmanagements anzusehen.

## Ausblick

Die Veröffentlichung aller Ergebnisse erfolgt in Form eines digitalen Leitfadens über die Projekthomepage <https://www.fh-muenster.de/rekoti/index.php>.

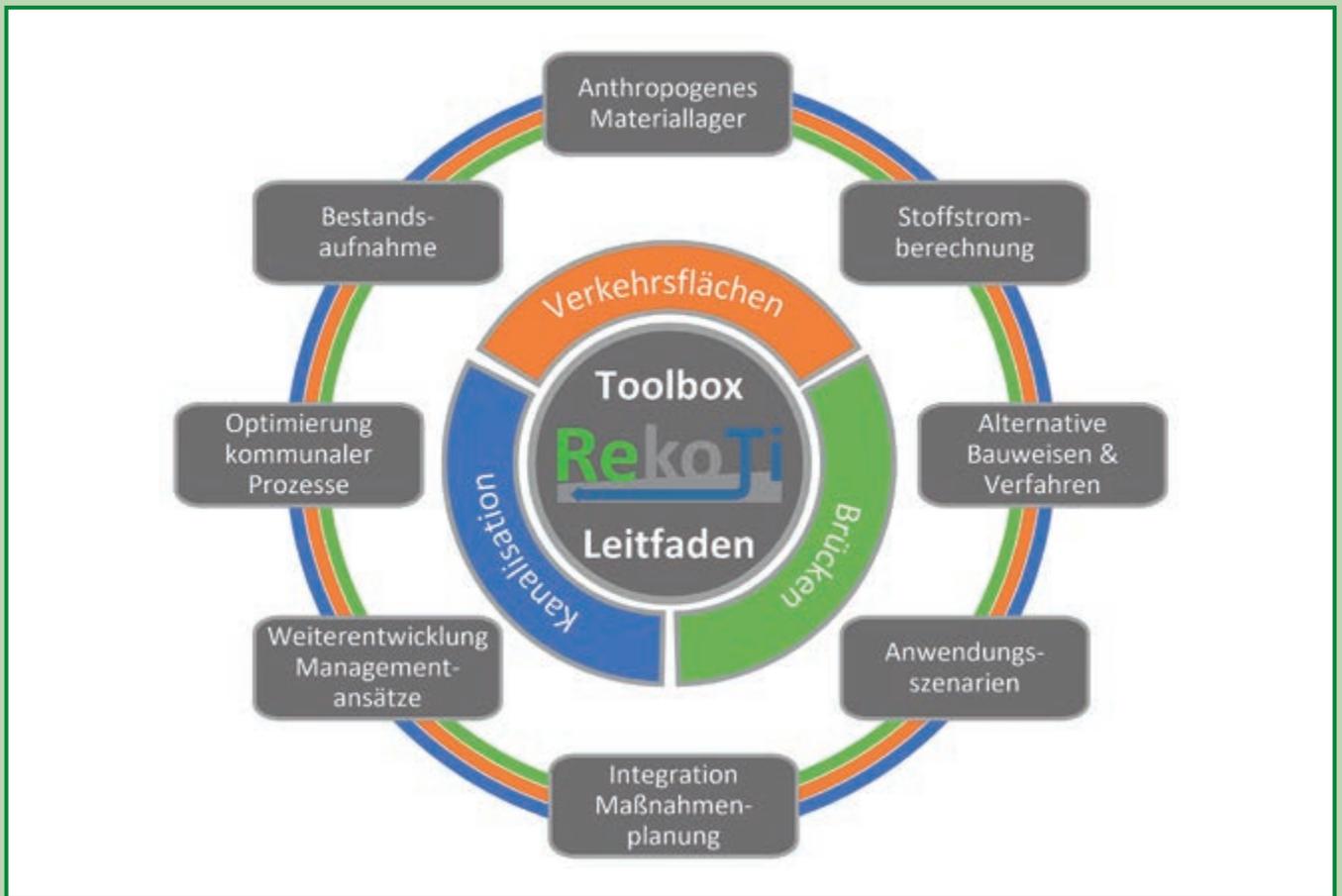


Bild 1: Bestandteile und Einflussgrößen des digitalen RekoTi-Leitfadens sowie der RekoTi-Toolbox  
 Quelle: Jonas Maibaum, Ruhr-Universität Bochum



Bild 2: Prototypische Darstellung der GIS-basierten Bestimmung des anthropogenen Materiallagers für die Kanalhaltungen mit der RekoTi-Toolbox  
 Quelle: Jonas Maibaum, Ruhr-Universität Bochum

### Projektlaufzeit

1. 2. 2021 – 31. 10. 2024

FKZ 033R264

### Kontakt

Leitung:  
 FH Münster  
 Prof. Sabine Flamme  
 Corrensstraße 25, 48149 Münster

Ansprechpartnerin:  
 Franziska Struck M.Sc.  
 +49 (0)251 83 65 278  
 f.struck@fh-muenster.de

## Zielstellung

Im Projekt REMINTA sollen metall- und mineralhaltige Rückstände aus den Bergeteichen des Erzbergwerks Rammelsberg aufbereitet und nutzbar gemacht werden. Erstmals wird versucht aus in Tailings lagernden Bergbaurückständen mineralische Rohstoffe für die Bauindustrie zu gewinnen. Ziel ist die Entwicklung eines Gesamt-Verwertungskonzepts für die Teiche am Goslarer Bollrich unter Berücksichtigung aller Aspekte der Nachhaltigkeit.

## Ergebnisse

In neu entwickelten Verfahren wurden die abgelagerten Rückstände zunächst in verschiedene Fraktionen geteilt. Biolaugung und chemische Laugung der Fraktionen ermöglichen anschließend eine höherwertige Verwertung. In mehreren Flotationsstufen wird das Bergeteichmaterial in drei Hauptgruppen aufgeteilt:

- wertmetallreiche Sulfid-Fraktion (ca. 15–20 % der Ausgangsmasse), in der je nach betrachtetem Element ca. 75 %–95 % der Zielwertstoffe enthalten sind
- eine Baryt-Fraktion (20–25 %), in der sich knapp 80% des Baryts befindet
- eine Fraktion mit der verbleibenden Mineralik (55–65 %).

Die wertmetallreiche Fraktion kann über hydrometallurgische Prozesse zu Vorprodukten für die Metallgewinnung verarbeitet werden. Entsprechende Routen werden wie im Vorprojekt REWITA in diesem Projekt aufgezeigt.

Das Hauptaugenmerk des Projekts REMINTA lag aber auf der Aufbereitung der Mineralikfraktion. Diese erfordert die Einhaltung der gesetzlichen Grenzen für Störstoffe und der Qualitätsmerkmale des erzeugten Baustoffs. Eine Flotation, kombiniert mit einer biologischen und chemischen Laugung, reduziert die Menge an Störstoffen in der Mineralikfraktion erheblich, so dass eine Verwendung als Zement-Zuschlagstoff erreichbar sein kann. Mittels Biolaugung gelang es einen Großteil des Bleis abzutrennen. Hierfür wurden Hefen beziehungsweise die von ihnen gebildeten Tricarbonsäuren eingesetzt.

Für die nachfolgende chemische Laugung wurde die Verwendung von Schwefelsäure und Wasserstoffperoxid untersucht. So konnten aus der Mineralik-Fraktion nochmals je nach Element zwischen 60 und 99 % der Störstoffe abgetrennt werden. Beispielsweise sank der Mangan-Gehalt von 1,2 % auf unter 0,015 %.

# REMINTA

## REcycling MINeralischer Fraktionen aus TAILINGS

Anwendungsgebiete für das aufbereitete Material sind mineralische Ersatzbaustoffe, Deponiebau, Zement-Zuschlagstoff und die Grobkeramik. Der konkrete Einsatz hängt vom Einzelfall und den jeweiligen Grenzwerten ab. Im Projekt wurden insbesondere der Zement- und Grobkeramik-Einsatz untersucht. Eine abschließende Bewertung, auch für eine Pilotierung, erfolgt noch.

Die Entwicklung eines angepassten Labor-Management-Systems unterstützt den Übergang von der Laborforschung in die Umsetzung. Digitalisierung der Aufbereitungsprozesse und die Verknüpfung der Daten führten zu einem Prozess-Simulations-Tool. Hiermit können aus den in der Forschung erstellten Labordaten gezielt Zusammenhänge aufgezeigt werden. Das Simulations-Tool dient gleichzeitig als Grundlage für die begleitende LCA-Analyse. Hierbei wurde das gesamte entwickelte Aufbereitungskonzept einer ökologischen Bewertung unterzogen. Ungeachtet von Skaleneffekten, der Vorteilhaftigkeit einer kontinuierlichen Prozessgestaltung sowie der chemischen Zusammensetzung der aufbereiteten Mineralikfraktion konnte schon jetzt in Berechnungen gezeigt werden, dass große positive ökologische Auswirkungen bei Verwendung dieser Fraktion als Sekundärrohstoff zu erwarten sind.

Neben den technischen Erkenntnissen ist für eine spätere Nutzung die Wahrnehmung der Materialien in der Baustoffindustrie wichtig. In Expertengesprächen sowie einem Workshop wurden sieben zentrale Hemmnisse identifiziert: Kosten, Standortabhängigkeit, rechtliche Rahmenbedingungen, Stoffeigenschaften, Verfügbarkeit & Planbarkeit, Offenheit in Behörden und ein schlechtes Image des Materials.

Schließlich ist es für ein Rückbauprojekt auch relevant Themen, die die lokale Bevölkerung mit den Bergeteichen verbindet, zu adressieren und einzubeziehen.

## Ausblick

Nach Projektende soll in einer Pilotierungsphase der Rückbau des Bergeteiches großtechnisch dargestellt und so der Sprung vom Labormaßstab in den industriellen Maßstab ermöglicht werden. Der im Projekt erstellte Leitfaden soll langfristig dazu dienen Hinweise, Methoden und Verfahren aufzeigen, die allgemein einen Rückbau von vergleichbaren Bergeteichen ermöglichen.



Bild 1: Projektmitarbeitende auf dem Dach des Zementwerkes in Höver  
Quelle: CUTEC



Bild 2:  
Keramikproben aus aufbereiteter Mineralik-Fraktion: RMT1 Referenzprobe; RMT 1.1 und 1.2 mit je 15 % REMINTA-Material  
Quelle: Geiger, Felix von Aulock

**Projektlaufzeit**

1. 2. 2021 – 31. 7. 2024

FKZ 033R266

**Kontakt**

Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann  
Walther-Nernst-Straße 9  
38678 Clausthal-Zellerfeld  
+49 (0)5323 72-2735  
daniel.goldmann@tu-clausthal.de

## Zielstellung

Die Bauwirtschaft hat eine hohe Nachfrage nach mineralischen Rohstoffen. Gleichzeitig entstehen in anderen Industriezweigen mineralische Nebenprodukte wie Schlacken oder Aschen. Im Sinne einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft ist es Ziel, diese als Sekundärrohstoff in Baustoffen einzusetzen.

Die Zementherstellung ist für 5 bis 8 % der weltweiten anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich. Alternative Bindemittel, in denen Zementklinker teilweise oder vollständig zum Beispiel durch Schlacken substituiert wird, gewinnen daher mehr und mehr an Bedeutung, da ihr ökologischer Fußabdruck deutlich kleiner ausfällt.

Schlacken entstehen als Nebenprodukt bei der Herstellung von Metallen, wie die Hochofenschlacke bei der Erzeugung von Roheisen oder die Elektroofenschlacke bei der schrottbasierten Stahlherstellung. Die Schlacken unterscheiden sich sowohl chemisch als auch mineralogisch deutlich.

Im Rahmen des Projekts SABINE wurde untersucht, wie Elektroofenschlacken zu behandeln, aufzubereiten und zu aktivieren sind, um auch sie als alternatives, d. h. alkalisch aktiviertes Bindemittel in Baustoffen verwenden zu können. Bei alkalisch aktivierten Bindemitteln initiiert die Zugabe eines hochalkalischen Aktivators zu einem Präkursor in Form von Schlacke, Asche oder auch Gesteinsmehl eine Festigkeitsentwicklung.

## Ergebnisse

Im Rahmen von SABINE wurde die alkalische Aktivierbarkeit von Elektroofenschlacken in einem typischen Mörtelsystem untersucht. Verwendet wurden sowohl prozesstypische Schlacken mit einem hohen kristallinen Anteil als auch amorphe, durch Wassergranulation behandelte Schlacken, die nach dem Stand der Technik aber noch nicht industriell verfügbar sind.

Erwartungsgemäß entwickelten die untersuchten Mörtel mit amorpher Elektroofenschlacke mit bis zu 50 MN/m<sup>2</sup> im Referenzalter von 28 Tagen eine deutlich höhere Festigkeit als beim Einsatz kristalliner Schlacke, hier waren es bis zu ca. 20 MN/m<sup>2</sup>. Damit zeichnet sich ab, dass Elektroofenschlacke für die im Rahmen des Projekts SABINE fokussierten geotechnischen Baustoffe potenziell geeignet ist.

# SABINE

## Stahlwerksschlacke als Bindemittel für geotechnische Baustoffe

Es zeigte sich jedoch auch, dass die konkrete mineralogische Zusammensetzung einen maßgeblichen Einfluss auf die Aktivierbarkeit und damit die Festigkeit hat. Kristalline Schlacken zeigen diesbezüglich deutlich größere Schwankungen als amorphe. Bei kristallinen Schlacken ist nicht nur in Einzelfällen nahezu keine Festigkeitsentwicklung zu verzeichnen.

Für eine großtechnische Nutzung kommt daher auf Grundlage der Erkenntnisse aus SABINE aktuell nur amorphe Elektroofenschlacke infrage. Erste hierfür erforderliche Wassergranulationsanlagen sind in der Projektierung.

## Ausblick

Aufbauend auf dem erfolgten Nachweis der grundsätzlichen Machbarkeit ist das untersuchte Mörtelsystem mit alkalisch aktivierter Elektroofenschlacke als Bindemittel unter Berücksichtigung der Aspekte „baustofftechnologische Performance“ (insbesondere hinsichtlich Festigkeit und Verarbeitbarkeit), „Wirtschaftlichkeit“ und „CO<sub>2</sub>-Fußabdruck“ zu einer großmaßstäblichen praxistauglichen Lösung weiterzuentwickeln.

Darüber hinaus gilt es, die Ursachen, warum einige kristalline Elektroofenschlacken deutlich besser zu aktivieren sind als andere, genauer zu erforschen. Diese Erkenntnisse könnten dann dazu verwendet werden, die Behandlung der Schlacke im Stahlwerk entsprechend anzupassen und die Verwertbarkeit des Nebenprodukts Elektroofenschlacke zu verbessern.

### Projektlaufzeit

1. 2. 2021 – 31. 7. 2024

FKZ 033R262

### Kontakt

STUVA e.V.  
Dr.-Ing. Christian Thienert  
Mathias-Brüggen-Straße 41  
50827 Köln  
c.thienert@stuva.de  
+49 (0)221 5 97 95-0



Bild 1: Elektroöfen für die schrottbasierte Stahlherstellung  
Quelle: Georgsmarienhütte



Bild 2: Möglicher Einsatzbereich: Ringspaltmassen bei maschinellen Tunnelvortrieben  
Quelle: Klaus Helbig

## Zielstellung

Das Projekt SlagCEM strebt eine vollständige Verwertung von Linz-Donawitz-Schlacken (LDS), einem Nebenprodukt der Stahlherstellung, an. Zum einen soll Eisen aus der LDS zurückgewonnen, zum anderen ein hydraulisches Bindemittel auf Basis der erzeugten eisenarmen LDS für den Einsatz in der Zementindustrie produziert werden. Hierdurch sollen Primärrohstoffe eingespart und Treibhausgasemissionen in der Zementindustrie reduziert werden.

## Ergebnisse

Die Rückgewinnung des Eisens erfolgt über die Reduktion des oxidisch vorliegenden Eisens bei hohen Temperaturen aus der schmelzflüssigen LDS (Bild 1). Die reduzierte, eisenarme LDS enthält einen höheren Anteil an hydraulischen Mineralphasen.

Um den Hochtemperaturprozess zu überwachen, wurde im Rahmen des Projekts durch die Firma LTB ein Laser-Induziertes Breakdown Spektroskopie (LIBS)-Messsystem konzipiert und konstruiert, das darauf ausgelegt ist, schmelzflüssige Proben direkt an der Produktionslinie quantitativ zu analysieren (Bild 2). Um aussagekräftige Ergebnisse zu gewährleisten, wurden Schlackeproben in Schmelzversuchen am Lichtbogenofen der BAM erzeugt, die dazu dienen, eine valide Kalibrierung zu erstellen und die Messungen im Stahlwerk bei Arcelor Mittal Eisenhüttenstadt zu ermöglichen. Die Messtechnik zeichnet sich durch eine hohe Zeit- und gute spektrale Auflösung aus und ermöglicht eine weitgehende Eliminierung der Untergrundstrahlung der heißen Proben. Aufgrund der teilweise unregelmäßigen Topografien der Schlackeproben wurde neben einer Beobachtungskamera auch ein Profil-Liniensensor eingebaut, um den Messkopf präzise nachzuführen. Ein entscheidender Faktor für die Anwendbarkeit im industriellen Umfeld ist das robuste Design des Systems. Dies beinhaltet eine thermische Kapselung der Komponenten sowie eine aktive Kühlung.

Erste zementtechnische Untersuchungen an einer bei der BAM reduzierten LDS (V551) erfolgten am FEhS-Institut. Die Probe bestand zu 62 M.-% aus  $\beta$ - $C_2S$  und zu je 14 M.-% aus FeO und  $C_4AF$ . V551 wurde in der Kugelmühle auf  $3100 \text{ cm}^2/\text{g}$  nach Blaine gemahlen ( $d_{50\%} = 11 \mu\text{m}$ ). V551 substituierte zu 50 M.-% bzw. 25 M.-% Portlandzement CEM I 42,5 R und die Mischung wurde sowohl als Mörtel gemäß DIN EN 196-2 als auch bzgl. der Hydratationswärmewicklung gemäß DIN EN 196-11 geprüft. Als Referenz dienten die Werte des Portlandzements bzw. einer Kombination mit 50 M.-% Quarzsandmehl. Ergänzend wurden Wär-

# SlagCEM

## Portlandzement und Roheisen aus Stahlwerksschlacken

messungen an unbehandelter LDS durchgeführt, die mit unterschiedlichen Sulfatzugaben (2,5-2,0 M.-%  $SO_3$ ) kombiniert wurde.

Bereits bei der Verarbeitung des Frischmörtels zeigte sich ein schnelles Ansteifen, was eine unmittelbar nach Wasserkontakt einsetzende Reaktion belegt. Bei 50 % Substitution lagen die Festigkeiten nach 2 und 7 Tagen signifikant unter denen der Kombination mit Quarzsandmehl, zeigen also einen störenden Einfluss (Bild 3). Nach 28 und 91 Tagen entsprach der Aktivitätsindex dem der Kombination mit Quarzsandmehl. Auch bei 25 % Substitution war der Festigkeitsabfall größer als erwartet. Der Wärmeverlauf für die pure Schlacke ist, unabhängig vom Sulfatgehalt, äußerst gering und lässt keinen eigenen Festigkeitsbeitrag der V551 erwarten. Als Ursache des negativen Einflusses der V551 kommt entweder eine Behinderung der Klinkerreaktion oder die schnelle Bildung eines zwar versteifenden, aber nicht festigkeitsbildenden Reaktionsproduktgerüsts in Frage.

Die Ergebnisse zeigen, dass das bisher erzeugte Material keine klinkertypischen Eigenschaften aufweist und ohne weitere Maßnahmen nicht als Zementbestandteil geeignet ist. Eine ausreichende Qualität der reduzierten und modifizierten LDS für den Einsatz in der Zementindustrie ist jedoch wesentlich für eine sinnvolle industrielle Umsetzung des Verfahrens.

## Ausblick

Weitere Untersuchungen zur Ursache für das festigkeitsstörende Verhalten sind nötig, wie z. B. die Analyse der Porenlösungen. Des Weiteren müssen natürlich auch die Ergebnisse der ökobilanziellen Betrachtung des gesamten Prozesses positiv ausfallen.

**Projektlaufzeit**  
1. 2. 2021 – 31. 7. 2024

FKZ 033R254

**Kontakt**  
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)  
Richard-Willstätter-Straße 11  
12489 Berlin  
Dr. Christian Adam  
+49 (0)30-8104-5670  
christian.adam@bam.de



Bild 1: Abguss der reduzierten LDS im kleintechnischen Lichtbogenofen der BAM  
Quelle: BAM



Bild 2: Laser-Induziertes Breakdown Spektroskopie (LIBS)-Messsystem zur Messung schmelzflüssiger Proben  
Quelle: LTB

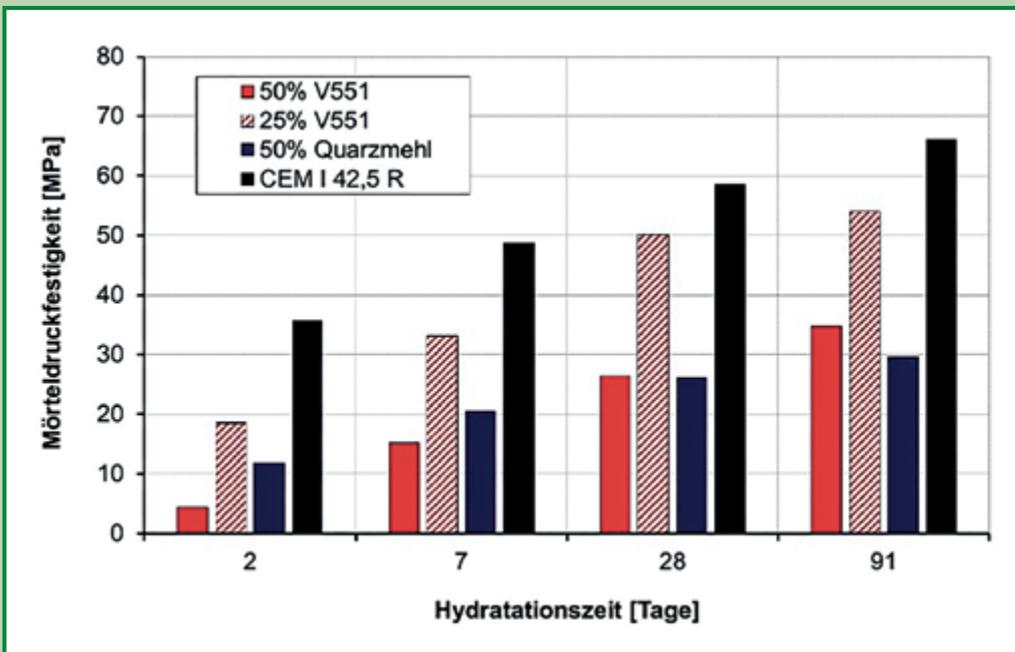


Bild 3: Festigkeitsentwicklung des mit 25 % und 50 % reduzierter LDS (V551) substituierter Zements nach DIN EN 196-2 im Vergleich zu einem CEM I 42,5 R und einem mit 50% Quarzmehl substituierten Zement  
Quelle: FEhS

## Zielstellung

Die Innovationskraft der Förderrichtlinie ReMin des BMBF durch Vernetzung der Zielgruppen und Transfer der Forschungsergebnisse zu stärken, verfolgt das Begleitforschungsprojekt TReMin. Denn eine hochwertige Nutzung mineralischer Reststoffe und deren Wiedereinsatz in der Bauindustrie als Sekundärrohstoffe (Recycling-Baustoffe) trägt in erheblichem Umfang zur Einsparung von Primärressourcen und damit auch zum Klimaschutz bei.

## Ergebnisse

Grundlage ist eine Bereitstellung von Bauprodukten definierter Qualität auf Basis der Anforderungen der anwendenden Industrie, verbunden mit der Rechtssicherheit für einen flächendeckenden Einsatz in öffentlichen wie privaten Bauvorhaben. Um dies großtechnisch, wirtschaftlich und rechtssicher in Zukunft umsetzen zu können, bedarf es der Schaffung einiger Voraussetzungen, die stoffstromübergreifend gelten und nachfolgend weiter konkretisiert werden:

### 1. Reinheit, Homogenität und kontinuierliche Verfügbarkeit ausgewählter Stoffströme

- Förderung innovativer Trenn- und Sortiertechnologien
- Förderung der Digitalisierung und Automatisierung bei der Aufbereitung mineralischer Reststoffe und Baurestmassen
- Festlegung verbindlicher und praktisch realisierbarer Grenzwerte unter Berücksichtigung der technischen Möglichkeiten der Aufbereitung und der zu erzielenden Materialeigenschaften
- Entwicklung kommunaler Ressourcen- und Materialkataster, ergänzt um eine Schadstoff-Datenbank
- Förderung von Technologien zur Aufbereitung der Feinfraktion von Hausmüllverbrennungs-Aschen
- Bereitstellung regionaler Aufbereitungsflächen (auch in Ballungsräumen)

### 2. Klare gesetzliche Stellung von Sekundär- gegenüber Primärrohstoffen

- Vorrangstellung von Sekundär- gegenüber Primärrohstoffen im öffentlichen Vergaberecht von Bund und Ländern
- Festlegung von Quoten in öffentlichen Bauten unter Berücksichtigung der verfügbaren Mengen
- Neugestaltung von AVV-Schlüsseln bei Gips- und Abbruchabfällen zur verbesserten Sammlung und Aufbereitung
- Keine höheren Umwelanforderungen an Sekundärrohstoffe als an Primärrohstoffe
- Eindeutige und praktikable Definition des Abfallendes von mineralischen Reststoffen und Baurestmassen

# TReMin

## Vernetzungs- und Transfervorhaben

- Anpassung bestehender Regelungen (DIN EN 206, LAGA Eckpunktepapier, DIN 1045) zur Förderung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen, wie Stahlwerksschlacken, etc. ...
- Zusammenführung bestehender Verordnungen und Gesetze zu sinnvollen Gesetzespaketen (Minimierung der Flut von Regelungen)

### 3. Umgang mit besonders gefährlichen Schadstoffen wie Asbest

- Festlegung gesonderter Regelungen zum Umgang mit Asbest zu Forschungszwecken
- Förderung der Entwicklung und des Einsatzes von Methoden zur „Realtime-Erkennung“ von Asbest in mengenmäßig großen Stoffströmen
- Unterstützung des Aufbaus von Datenbanken und Schulungskonzepten zur Schadstofferkennung
- Führung eines öffentlichen Bürgerdialogs gemeinsam durch Forschung und Politik

### 4. Berücksichtigung von Gips als (Sekundär-)Rohstoff

- Förderung der Aufbereitung gipshaltiger Baustoffe
- gemeinsame Anpassung der gegenwärtigen Standards der Gipsverbände an die aktuellen Verhältnisse im Gipsrecycling durch Wirtschaft, Wissenschaft und Gesetzgeber
- Erschließung eines möglichst breiten Anwendungsfeldes von Rezyklaten (z. B. Gipsfaserplatten)

### 5. Schaffung öffentlicher Akzeptanz für die Nutzung nachhaltiger Rohstoffe

- Förderung der Errichtung regionaler Demonstrationsanlagen zur Aufbereitung sowie zur Herstellung von RC-Baustoffen
- Förderung der Erstellung und Nutzung ökologischer Bewertungsmethoden wie LCA und EPD als Unterstützung für eine kreislaufgerechte Baupraxis.
- Verankerung kreislaufwirtschaftlicher Aspekte in Studium und Ausbildung
- Aufbau regionaler Logistiksysteme zur Herstellung nachhaltiger Baustoffe zu bezahlbaren Preisen

## Ausblick

Die Analyse des Transferpotenzials der einzelnen Projekte im Hinblick auf eine wirtschaftliche Skalierung in der Zukunft steht noch an. Zudem werden der weitere Forschungs- beziehungsweise Förderungsbedarf einzelner Verbundthemen ermittelt.

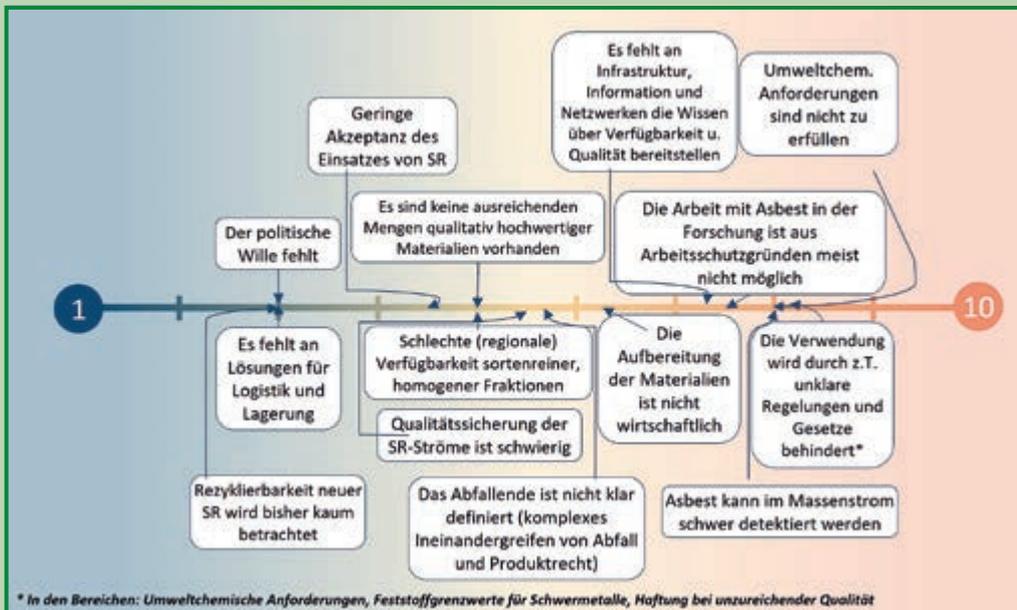


Bild 1:  
Hemmnisse, gewichtet von 1 (gering) bis 10 (hoch)  
Quelle: TReMin

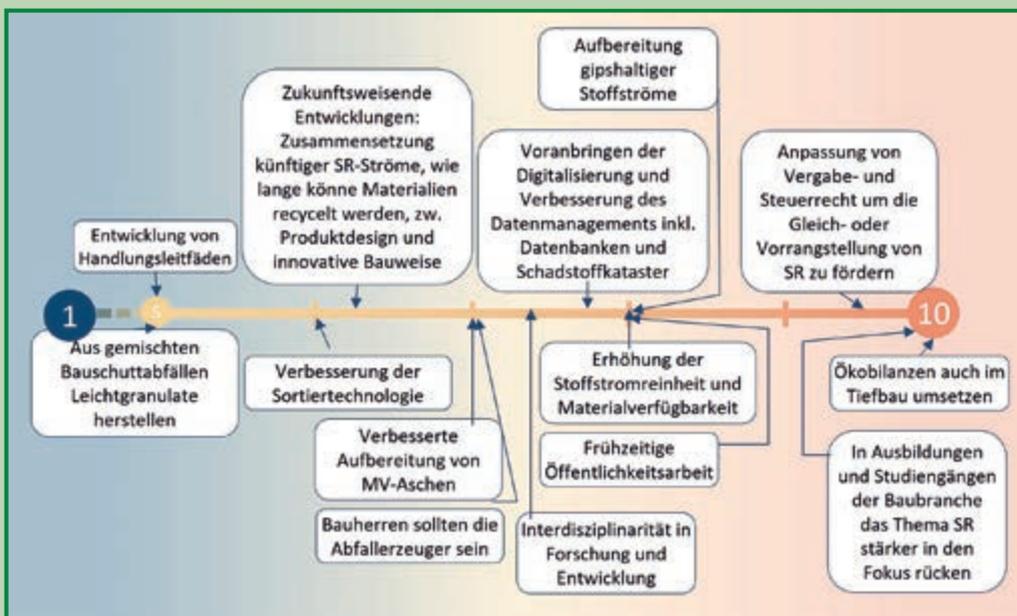


Bild 2:  
Handlungsempfehlungen, gewichtet von 1 (gering) bis 10 (hoch)  
Quelle: TReMin



Bild 3: ReMin-Workshop bei Fraunhofer IWKS in Alzenau 2023  
Foto: Andre Bertram, CUTEC

### Projektlaufzeit

1. 1. 2021 – 31. 12. 2024

FKZ 033R252

### Kontakt

Technische Universität Clausthal  
CUTEC Clausthaler Umwelttechnik  
Forschungszentrum  
Leibnizstraße 23  
38678 Clausthal-Zellerfeld  
Leitung:

Prof. Dr. mont. Dr. rer. nat. Michael Fischlschweiger  
+49 (0)5323 72-3871  
michael.fischlschweiger@tu-clausthal.de

Koordinator:

Dipl.-Ing. Andre Bertram  
+49 (0)5323 72-6201  
andre.bertram@cutec.de

# Abschließende Bewertung der Gesamtfördermaßnahme „BMBF-ReMin“

## a) Ausgangssituation und Zielsetzung

Mineralische Stoffströme fallen bei vielen industriellen und gewerblichen Arbeiten als Reststoffe oder Nebenprodukte an. In Abhängigkeit der Beschaffenheit des mineralischen Stoffstroms werden diese z. T. als Nebenprodukt eingesetzt, recycelt, verwertet oder entsorgt. Dabei ist der Einsatz dieser Reststoffe anstelle natürlicher Rohstoffe, beispielsweise als Ersatz- oder Zusatzstoff, Zuschlag oder Substitut für bestimmte Rohstoffkomponenten in Bauprodukte eine Möglichkeit zur ressourceneffizienten Nutzung. Diese muss dabei sowohl ökologisch vertretbar als auch ökonomisch zumutbar sein und den Forderungen gesetzlicher und abfallwirtschaftlicher Regelwerke genügen.

Mit der Fördermaßnahme „ReMin“ nahm das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) mineralische Stoffströme gezielt in den Fokus, um den Ausbau der Kreislaufwirtschaft in Deutschland weiter voranzutreiben. Im Mittelpunkt stand dabei die Bauwirtschaft mit ihrer hohen Nachfrage nach Rohstoffen und gleichzeitig großen Mengen an anfallenden mineralischen Stoffströmen in Form von Baurestmassen. Weitere betrachtete Stoffströme umfassten sowohl Schlacken metallurgischer Anlagen, Stäube und Aschen aus Müllverbrennungs- und Ersatzbrennstoff-Rostaschen als auch bergbauliche Rückstände. Die Aufbereitung und

erweiterte Nutzung als hochwertige Sekundärrohstoffe sollen in Zukunft einen erheblichen Beitrag zur Schonung natürlicher Ressourcen und zur Erhöhung der Versorgungssicherheit der Bauwirtschaft mit mineralischen Rohstoffen leisten.

Vor diesem Hintergrund wurden im Rahmen der Fördermaßnahme insgesamt 16 Projekt-Verbünde in den Sektoren „Bau- und Abbruchabfälle“, „Aschen, Schlacken und Bergbaureststoffe“ sowie „Bauen in der Kreislaufwirtschaft“ seitens des BMBF gefördert. Die Projekte konzentrierten sich dabei im Wesentlichen auf die Entwicklung von Technologien und Prozessen zur sortenreinen Aufbereitung der mineralischen Reststoffe und Baurestmassen, sowie dem Einsatz der dort erzielten Fraktionen als Sekundärrohstoffe in der Herstellung von Baumaterialien wie Zement und Beton. Die qualitative Bewertung der dadurch erzeugten sekundären Produkte und die ökologische und ökonomische Bewertung der im Labor- und Technikumsmaßstab beschriebenen Prozesse rundeten die Arbeit der einzelnen Verbünde ab (siehe Abbildung 1). Die Fördermaßnahme „ReMin“ reiht sich in das Gesamtsystem einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft ein. Dieses geht über die Inhalte der Fördermaßnahme hinaus und bezieht Aspekte der Digitalisierung und Automatisierung entwickelter Verfahren und Prozesse, sowie deren Aufskalierung und letztlich Umsetzung im industriellen Maßstab und Umfeld mit ein.

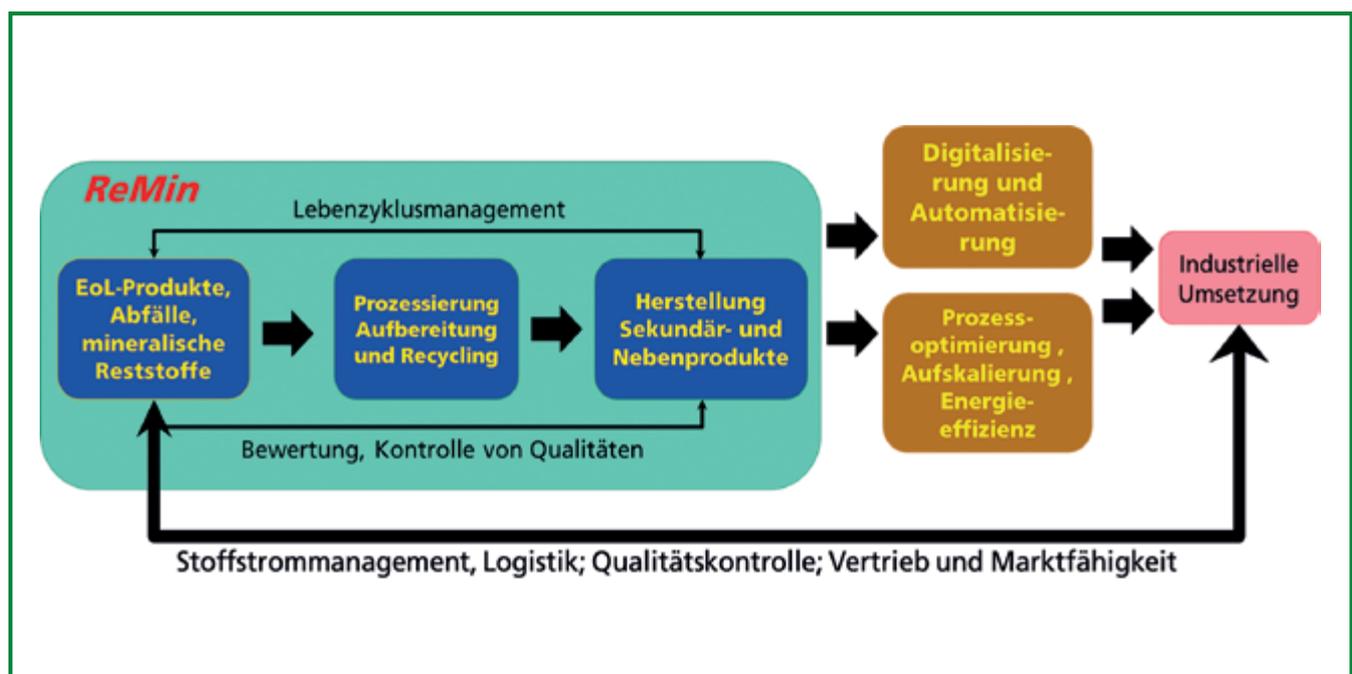


Abbildung 1: Einordnung der BMBF-Fördermaßnahme „ReMin“ in das Gesamtsystem einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft

## b) Programminhalte und Transferpotential

Die wissenschaftlich-technischen Schwerpunkte der in den Verbänden geleisteten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten lassen sich in nachfolgende Kategorien einteilen:

### 1. Prozessentwicklung auf Basis mechanischer und thermochemischer Verfahrenstechnik zur Aufbereitung mineralischer Restfraktionen und Baurestmassen

Die Grundlage der entwickelten Prozesse bildeten die sich aus der Aufbereitung fester mineralischer Primärrohstoffe ableitenden Verfahren der mechanischen Aufbereitung, die entsprechend ihrer Wirkungsweise auf das zu behandelnde Material in die Kategorien Zerkleinerung, Klassierung und Sortierung einzuteilen sind. Diese Verfahren haben den Vorteil, dass ihre Wirkprinzipien zum einen dem gegenwärtigen Stand der Technik entsprechen und zum anderen gegenüber Änderungen in der Zusammensetzung und temporären Schwankungen eine gewisse Robustheit aufweisen. Zudem sind sie im Bereich der Primärrohstoffe bereits für hohe Durchsätze erprobt, so dass sie auch im Sekundärbereich bei optimaler Einstellung der Prozessparameter mit überschaubarem Aufwand in den industriellen Maßstab skalierbar sind.

Abfallströme weisen wie Primärrohstoffe eine komplexe Zusammensetzung auf. Während Primärrohstoffe aber meist nur auf einen oder wenige Wertstoffe hin aufbereitet werden, können Abfallstoffe viele Bestandteile enthalten, die für eine ganzheitliche Verwertung später mögliche Wertträger sind. Die Rückgewinnung dieser Vielzahl an Wertträgern erfordert zumeist vielstufige Aufbereitungsprozesse. Zudem muss das unterschiedliche Materialverhalten der einzelnen Wertträger berücksichtigt werden. Eine zusätzliche Herausforderung ist dabei auch das Abtrennen möglicher Störstoffe und Kontaminanten. Im Rahmen der Fördermaßnahme wurde diesem Umstand durch den ergänzenden Einsatz innovativer mechanischer Aufbereitungstechnologien, wie beispielsweise der elektrodynamischen Fragmentierung (EDF) oder selektive Mahlverfahren, Rechnung getragen. Die EDF ist das gezielte Einbringen von Hochspannungsimpulsen in das zu behandelnde Material, wodurch dieses selektiv an seinen Verbundstellen aufgeschlossen und die einzelnen Fraktionen freigelegt werden konnte. Dies erleichterte den weiteren Prozess der sich anschließenden mechanischen Aufbereitungsprozesse, da die zu gewinnenden sekundären Fraktionen nun nahezu sortenrein frei nebeneinander vorlagen und weiterbehandelt werden konnten. Mithilfe spezieller Mahlverfahren konnten bisher nicht genutzte Feinfraktionen aufbereitet und Metalle abgetrennt werden. Auch hier

lagen mineralische und metallische Anteile so schlussendlich separat für eine weitere Nutzung vor.

Die im Rahmen der Fördermaßnahme behandelten mineralischen Stoffströme aus Schlacken, Aschen und unterschiedlichen Baurestmassen konnten durch die Projektverbände derart konditioniert werden, dass die Möglichkeit eines Einsatzes als Substitut in Produkten prinzipiell gegeben war. So wurden Substitute für Gesteinskörnungen und Zementbestandteile aus Hausmüllverbrennungsaschen und Stahlwerksschlacken gewonnen. Weiterhin kann ziegelhaltiger Bauschutt durch die in der Maßnahme entwickelten Verfahren für die Herstellung von Leichtgranulaten eingesetzt werden.

### 2. Einsatz aufbereiteter Reststoffe als Substitut in hochwertigen industriellen Produkten des Bauwesens

Damit ein mineralischer Reststoff als Substitut für einen natürlichen Rohstoff in Frage kommt, muss er mehrere Bedingungen erfüllen. Zum einen muss er technologische Qualitätsanforderungen, wie beispielsweise Druckfestigkeit oder Frostbeständigkeit, einhalten. Zum anderen dürfen bei seinem Einsatz möglicherweise einzuhaltende Richtwerte bezüglich freierwerdender Schadstoffe oder rechtlich verbindliche Grenzwerte nicht überschritten werden. Daher nahm die Betrachtung der Qualitäten der durch Aufbereitung erzeugten Sekundärfraktionen einen gewichtigen Teil im Rahmen der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der Projektverbände ein. Durch die Bestimmung charakteristischer Materialeigenschaften wie Festigkeiten oder Witterungsbeständigkeiten, konnten die Einflüsse von Schwankungen in den generierten Stoffströmen, sowie der eingesetzten Aufbereitungsverfahren in Bezug auf die für die weitere Verwertung zu erfüllenden Kriterien verstanden und herausgearbeitet werden. Hierdurch wurde verbundübergreifend ein Vielfaches an zusätzlichem Fachwissen generiert, dass sich über die Fördermaßnahme hinaus auf vielerlei weitere mineralische Stoffströme wie beispielsweise Erdaushub, Straßenaufbruch, Gießereisande oder auch Braunkohlenflugaschen übertragen lässt.

### 3. Entwicklung und Einsatz digitaler Methoden zur Herstellung qualitätsbasierter Sekundärwerkstoffe

Die Bauwirtschaft wird in Zukunft am Einsatz ressourcen-, flächen-, energie- und umweltschonender Sekundärbaustoffe nicht mehr vorbeikommen. Um diesen Grundsatz zu erfüllen, müssen diese gegenüber Baustoffen aus 100% Primärmaterial qualitativ vergleichbare Eigenschaften aufweisen. Dann steht ihnen zukünftig ein breites Anwendungspotential offen. Die betrachteten mineralischen Stoffströme fallen zudem jährlich im Bereich vieler tausender Tonnen an.

Daher stellt die Sicherung einer kontinuierlich gleichbleibenden Qualität von zur weiteren Verwertung erzeugter Fraktionen eine große Herausforderung dar. In Anbetracht eines hier zu erwartenden mengenmäßig ausufernden Probenmanagements kommen auch digitalen Methoden eine besondere Bedeutung zu. Die sensorgestützte Materialcharakterisierung mit anschließender Ausschleusung ergänzt durch selbstlernende Steuerungstechniken für die automatisierte Produktion ressourcenschonender Baustoffe ist dabei ein innovativer Ansatz.

So zum Beispiel zeigten die Arbeiten in ReMin, dass aus der Primärproduktion bekannte Sensortechniken auch auf die Aufbereitung sekundärer Stoffströme übertragbar sind. Zu nennen sind hier vor allem Techniken wie Nahinfrarotspektroskopie, Farberkennung und laserinduzierte Plasmaspektroskopie. Hinzu kam der Einsatz KI basierter hybrider selbstlernender Algorithmen, um Schwankungen in der Zusammensetzung aufzubereitender Stoffströme in situ auf dem Förderband zu identifizieren. Die Schwankungen können so in Bezug auf die weitere Verarbeitbarkeit gegenüber den nachfolgenden Prozessschritten effektiv angesteuert werden. Mit den in der Fördermaßnahme erzielten Ergebnissen ergibt sich so die Möglichkeit hochqualitative (Massen)Güter technologisch besser aufzuschließen, zu recyceln und/oder einer ressourceneffizienteren Verwertung zuzuführen. Durch den Einsatz digitaler Methoden zur Qualitätssicherung aufbereiteter sekundärer Stoffströme wird es zukünftig möglich sein, qualitativ gleichbleibende Sekundärbaustoffe zu erzeugen. Auch die Einhaltung produktspezifischer Anforderungen und Grenzwerte bei Zertifizierungsprozessen kann dann rückwirkend über die gesamte Prozesskette transparent und lückenlos nachgewiesen werden.

Die Fördermaßnahme ReMin hat insbesondere für den Bereich der mineralischen Reststoffe und Baurestmassen wichtige Beiträge geliefert, auf denen sich für den weiteren technologischen und prozesstechnischen Skalierungsprozess aufbauen lässt. Zudem lassen sich grundlegende Erkenntnisse über Detektionsgenauigkeiten von Sensoren, sowie über die Wirkungsweise selbstlernender Algorithmen auch auf andere mengenmäßig bedeutende Stoffströme wie beispielsweise Kunststoffe, Elektroaltgeräte, sowie technische Anlagen der Energiewende übertragen. Dies wiederum zeigt, dass sich unter dem Dach des BMBF Förderschwerpunkt FONA die Betrachtungen einzelner Stoffströme durch die Schaffung interdisziplinärer Bezüge über die Grenzen einzelner Fördermaßnahmen hinaus gegenseitig befruchten können und zukünftig in der praktischen Umsetzung gemeinsam genutzt werden sollten.

#### **4. Herstellung von Recyclinggips auf Basis alternativer sekundärer Rohstoffquellen**

Die Gipsindustrie arbeitet gegenwärtig intensiv daran, bei der Entwicklung, Herstellung und dem Inverkehrbringen von Gipsbaustoffen und Gipsprodukten vorrangig hochwertigen Recyclinggips einzusetzen und im weiteren Lebenszyklus eine ordnungsgemäße, schadlose und hochwertige Verwendung sicherzustellen. Vor dem Hintergrund des bis 2038 schrittweise angestrebten Ausstiegs aus dem Betrieb von Kohlekraftwerken stellen alternative Quellen zur Erzeugung von Recyclinggips einen wichtigen Baustein für die weiteren Aktivitäten der Gipsindustrie hierzulande dar. In ReMin wurden hierzu mehrere potentiell nutzbare Quellen betrachtet, die den schrittweisen Wegfall des REA-Gipses aus der Rauchgasentschwefelung zumindest teilweise kompensieren könnten. Unter anderem wurde ein Recyclingverfahren zur Aufbereitung von Gipsfaserplatten entwickelt, welches sich als technisch und ökonomisch umsetzbar erwies. Des Weiteren wurde die Rückgewinnung gipshaltiger Bestandteile aus mineralischen Bau- und Abbruchabfällen durch Sulfatabtrennung per thermischer Zersetzung entwickelt und anschließend qualitativ untersucht. Zuletzt wurden auch verschiedene in der Industrie anfallende Synthesegipse auf Ihre Wiederverwendbarkeit hin untersucht. Aus den entsprechenden Projekten konnten hier vielversprechende Ergebnisse bezüglich der Machbarkeit erzielt werden, die Anlass zur Hoffnung auf eine zukünftige wirtschaftliche und industrielle Umsetzung geben.

#### **5. neue Formen der digitalbasierten funktionellen Verwertung von Bau- und Abbruchabfällen auf Basis von Reuse und Remanufacturing**

Neben dem Recycling und der anschließenden stofflichen Wiederverwertung von Bau- und Abbruchabfällen rückt mit fortschreitender Digitalisierung auch die funktionelle Verwertung definierter Komponenten und Baugruppen ins Blickfeld. Bei dieser Variante zum selektiven Rückbau von altem Gebäudebestand wird die Gebäudestruktur zunächst auf potentiell nutzbare Teile hin digital abgescannt, und die identifizierten Baugruppen werden gezielt mechanisch aus dem Bauwerk herausgeschnitten. In Abhängigkeit der Qualität wird die Baugruppe mittels 3D Druck für eine weitere Nutzung restauriert, in das neu zu errichtende Bauwerk virtuell hineinmodelliert, sowie abschließend bautechnisch integriert. Innerhalb der Fördermaßnahme konnten hier wichtige grundlegende Erkenntnisse bezüglich der prinzipiellen Machbarkeit eines derartigen Konzeptes gesammelt werden. Da eine Ökobilanzierung hier Einsparpotenziale von bis zu 65% der Treibhausgase aufzeigen konnte, müssen diese Ansätze im Rahmen des „Digital Green Tech“ zukünftig weiter vertieft werden.

## c) Identifikation rechtlicher und praktischer Hemmnisse

Projektübergreifend wurden durch schriftliche Befragung und in Workshops in Bezug auf eine angestrebte industrielle Umsetzung rechtliche und praktische Hemmnisse identifiziert, deren Abbau für den flächendeckenden Ausbau der Kreislaufwirtschaft in den Bereichen der mineralischen Reststoffe und der Bau-restmassen zukünftig entscheidend sein wird.

Nachfolgende Themenfelder haben sich dabei zur weiteren Bearbeitung herauskristallisiert.

### c1) Praktische Hemmnisse

Bei nachfolgenden Themen besteht konkreter Handlungsbedarf:

- Digitalisierung und Automatisierung von Aufbereitungs- und Verarbeitungsprozessen
- Einführung digitalbasierter in situ Verfahren zur kontinuierlichen Kontrolle definierter Materialeigenschaften.
- Einführung standardisierter Prüfverfahren zum Auslagverhalten von Schlacken und Aschen in Bezug auf toxische Elemente (z. B. Cr(VI))
- Selektive Demontage von Bau- und Abbruchabfällen zur frühzeitigen Separation von Fremd- und Störstoffen

### c2) rechtliche Hemmnisse

Nachfolgende Themen wurden verbundübergreifend identifiziert:

- Schaffung von Qualitätsstandards für Sekundärbaustoffe nebst gesetzlichen Grundlagen
- Einsetzen zeitnah umsetzbarer Übergangsregelungen bis zum Abschluss des vollständigen Gesetzgebungsverfahrens
- Anpassung der Gefahrstoffverordnung in Bezug auf den Umgang mit Asbest beim Rückbau alter Gebäude
- Integration einer Pflicht zur Nutzung qualitätsbasierter Sekundärbaustoffe in die Verfassungen von Bund und Ländern

Diese und viele weitere Punkte wurden im Anschluss an einen mehrtägigen Workshop in einem Kommuniké verschriftlicht und anlässlich der zweiten ReMin-Statuskonferenz den anwesenden Vertretern von BMBF und BMUV übergeben.

## d) Zusätzlicher Forschungsbedarf

Für die weitere industrielle Umsetzung der in ReMin behandelten Forschungs- und Entwicklungsthemen ist es entscheidend, dass Prozesse und Technologien weiter in den industriellen Maßstab aufskaliert, sowie dabei parallel digitalisiert und automatisiert werden. Darüber hinaus muss sichergestellt werden, dass als Ausgangsmaterialien kontinuierlich definierte Stoffströme vorhanden sind und deren Aufbereitung und Verwertung im regionalen Raum ohne große Transportwege stattfinden kann. Dieser systemische Ansatz erweitert die ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft um die unternehmerische Transformation, in der die Prozesse und Produkte nun in den urbanen nationalen Kontext der produzierenden Wirtschaft integriert werden müssen.

Das sich daraus ergebende Prinzip des „Urban Mining“ wird seit Ende Juni 2024 in einem weiteren Förderauftrag des BMBF unter dem Titel **„Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Urban Mining: Erschließung anthropogener Lager als Rohstoffquelle“** adressiert. Neben einer wirtschaftlichen Erschließung ungenutzter Potentiale aus anthropogenen Lagern werden auch innovative Methoden zur ressourceneffizienten Planung und Bewirtschaftung anthropogener Lagerstätten in den Blick genommen.

## Fazit

Abschließend ist festzustellen, dass auf Basis der erzielten Ergebnisse und Erkenntnisse die Durchführung der Fördermaßnahme ReMin als erfolgreich zu erachten ist. Die insgesamt 16 geförderten Verbände zu Forschung und Entwicklung, sowie das Begleitforschungsprojekt konnten wichtige Erkenntnisse auf dem Weg zu einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft erzielen und damit einer modernen ökologischen Wirtschaft ein nennenswertes Stück näherkommen.

Ein Dank gilt an dieser Stelle dem BMBF als Fördergeber, sowie dem PTJ als durchführender Projektträger für die kompetente Begleitung der Projekte in fachlicher und betriebswirtschaftlicher Sicht. Darüber hinaus danken wir allen Beteiligten in den Projektverbänden aus Wirtschaft, Wissenschaft und den öffentlichen Institutionen für die engagierte Mitarbeit vor Ort.

# Kontakt Daten der Verbundpartner



ReMin-Stand des Begleitforschungsprojekts TReMin auf der BKMNA 2023 in Berlin  
Foto: Andre Bertram, CUTEC



Produkte des Projekts REALight  
Foto: Andre Bertram, CUTEC

## ASHCON

### Projektleitung

Prof. Dr.-Ing. Björn Siebert  
Technische Hochschule Köln  
Betzdorfer Str. 2  
50679 Köln  
+49 (0)221 8275 2708  
bjoern.siebert@th-koeln.de

### Verbundpartner

TH Köln  
Labor für Kolloidchemie  
Campusplatz 1  
51379 Leverkusen  
Prof. Dr. Jan Wilkens  
+49 (0)214-32831-4614  
jan.wilkens@th-koeln.de

TH Köln  
Projektstandort: metabolon  
Am Berkebach  
51789 Lindlar  
Prof. Dr. Christian Wolf  
christian.wolf@th-koeln.de  
+49 (0)2261-8196-6483

AiNT GmbH  
Cockerillstrasse 100 (DLZ)  
52222 Stolberg (Rhld.)  
Marius Hirsch M.Sc.  
+49 (0)2402 10215-11  
hirsch@nuclear-training.de

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP  
Standort Holzkirchen  
Fraunhoferstraße 10  
83626 Valley  
Norbert Leiss M.Eng  
+49 (0)8024 643-296  
norbert.leiss@ibp.fraunhofer.de

FH Münster IWARU  
Corrensstraße 25  
48149 Münster  
Dipl.-Ing. Gotthard Walter  
+49 (0)251 83-65258  
gwalter@fh-muenster.de

Fertigbeton Rheinland GmbH & Co. KG  
Am Langen Graben 32  
52353 Düren  
Frank Urbanek  
+49 (0)2421 8002-35  
f.urbanek@fbr-beton.de

METTEN STEIN+DESIGN GmbH & Co. KG  
Industriegebiet Hammermühle  
D-51491 Overath  
Dipl.-Ing. Guido Volmer  
+49 (0)2206 603-85  
guido.volmer@metten.de

RWTH Aachen - Institut für Bauforschung Aachen  
Schinkelstraße 3  
52062 Aachen  
apl. Prof. Dr.-Ing. Anya Vollpracht  
+49 (0)241 80 95-116  
vollpracht@ibac.rwth-aachen.de

## BAUSEP

### Projektleitung

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP  
Fraunhoferstraße 10  
83626 Valley  
Dr. Sebastian Dittrich  
+49 (0)8024 643209  
sebastian.dittrich@ibp.fraunhofer.de

### Verbundpartner

bvw Steinwerk Hamminkeln GmbH & Co. KG  
Industriestraße 2–6  
46499 Hamminkeln  
Marc Rettig  
+49 (0)2852 913156  
rettig@betonsteinwerke.de

Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum  
Leibnizstraße 23  
38678 Clausthal-Zellerfeld  
Sven Schulze  
+49 (0)5323 726271  
sven.schulze@cutec.de

KM GmbH für Straßenbau- und Umwelttechnik  
Weg am Kötterberg 51  
44807 Bochum  
Dr.-Ing. Klaus Mesters  
+49 (0)234 592924  
k.mesters@kmgmbh.com

Ludwig-Maximilians-Universität München  
Theresienstraße 41  
80333 München  
Dr. Amanda Günther  
+49 (0)89 21804276  
guenther@min.uni-muenchen.de

Stadtreinigung Hamburg AöR  
Bullerdeich 19  
20537 Hamburg  
Dipl.-Ing. Peter Rochnia  
+49 (0)40 2576 2010  
peter.rochnia@stadtreinigung.hamburg

thyssenkrupp MillServices & Systems GmbH  
Emschertalstraße 12  
46149 Oberhausen  
Dr. Michael Dohlen  
+49 (0)208 65605  
michael.dohlen@thyssenkrupp.com

## EMSARZEM

### Projektleitung

GKS-Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt GmbH  
Dr.-Ing. Ragnar Warnecke  
Hafenstraße 30  
97424 Schweinfurt  
+49 (0)9721 6580120  
ragnar.warnecke@gks-sw.de

### Verbundpartner

Blue Phoenix Deutschland GmbH  
Bataverstraße 25  
47809 Krefeld  
Dieter Kersting  
+49 (0)2151 52580  
d.kersting@cc-gruppe.com

REMEX GmbH  
Am Fallhammer 1  
40221 Düsseldorf  
Bernd Bissot  
+49 (0)211 171600  
bernd.bissot@remex.de

Dyckerhoff GmbH  
Biebricherstraße 68  
65203 Wiesbaden  
Sabine Mutke  
+49 (0)611 6760  
sabine.mutke@dyckerhoff.com

Loesche GmbH  
Hansaallee 243  
40549 Düsseldorf  
Dr. Winfried Ruhkamp  
+49 (0)211 53530  
winfried.ruhkamp@loesche.com

DK Recycling und Roheisen GmbH  
Werthausenstraße 182  
47053 Duisburg  
Holger Schneiders  
+49 (0)203 60810  
schneiders@dk-duisburg.de

VDZ Technology gGmbH  
Toulouser Allee 71  
40476 Düsseldorf  
Dr. Volker Hoenig  
+49 (0)211 45780  
volker.hoenig@vdz-online.de

Universität Duisburg Essen  
Forsthausweg 2  
47057 Duisburg  
Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Deike  
+49 (0)203 3791800  
ruediger.deike@uni-due.de

## FaBeR

### Projektleitung

apl. Prof. Dr.-Ing. Anya Vollpracht  
Institut für Baustoffforschung der  
RWTH Aachen University  
Schinkelstraße 3, 52062 Aachen  
+49 (0)241 809 5116  
vollpracht@ibac.rwth-aachen.de

### Verbundpartner

RWTH Aachen University:  
Institut für Baustoffforschung (ibac), Kontakt s. o.  
Institut für Textiltechnik (ITA)  
Otto-Blumenthal-Straße 1  
52074 Aachen  
Vanessa Overhage  
+49 (0)241 80 23443  
Vanessa.Overhage@ita.rwth-aachen.de  
Institut für Nachhaltigkeit im Bauwesen (INaB)  
Mies-van-der-Rohe-Str. 1  
52074 Aachen  
Anna Luthin  
+49 (0)241 80-22998  
anna.luthin@inab.rwth-aachen.de  
Lehr- und Forschungsgebiet Aufbereitung  
mineralischer Rohstoffe (AMR)  
Lochnerstraße 4–20 Haus C  
52064 Aachen  
Devrim Gürsel  
+49 (0)241 8097250  
guersel@amr.rwth-aachen.de  
Lehrstuhl für Technik und Organisationssoziologie  
(STO)

Holcim (Deutschland) GmbH  
Hannoversche Straße 28  
31319 Sehnde-Höver  
Kaleb Yared  
+49 (0)5132 927-408  
kaleb.yared@holcim.com

Mitsubishi Chemical Advanced Materials GmbH  
Betriebsstätte Wischhafen  
Stader Straße 55–63  
21737 Wischhafen  
Kerstin Anselmino  
+49 (0)4770 808 003 220  
kerstin.anselmino@mcam.com

Baumaschinen Beckschulte KG  
Lindenstraße 83  
53721 Siegburg  
Frank Beckschulte  
+49 (0)2241 66979  
f.beckschulte@baumaschinen-beckschulte.de

Fydro Glassfibreconcrete B.V.  
Morsestraat 9–11  
6716 AH Ede Niederlande  
Gijs Jansen  
+49 (0)318 648 320  
g.jansen@fydro.nl

Hering Bau GmbH & Co. KG  
Neuländer 1  
57299 Burbach  
Jens Geffert  
+49 (0)2736 27-0  
Jens.Geffert@hering-ac.com

PAGEL SPEZIAL-BETON GmbH & Co. KG  
Wolfsbankring 9  
45355 Essen  
Henning von Daake  
+49 (0)201 68 504 30  
vondaake@pagel.de

## FERTIGTEIL 2.0

### Projektleitung

Prof. Dr.-Ing. Oliver Tessmann  
Technische Universität Darmstadt  
Fachbereich Architektur  
DDU – Digital Design Unit – Digitales Gestalten  
El-Lissitzky-Straße 1  
64287 Darmstadt  
+49 (0)6151 16-22483  
tessmann@dg.tu-darmstadt.de

### Verbundpartner

Institut für Tragwerksentwurf (ITE)  
TU Braunschweig  
Pockelsstraße 4  
38106 Braunschweig  
Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft  
+49 (0)351 391 3571  
h.kloft@tu-braunschweig.de

Fachgebiet Entwerfen und Nachhaltiges Bauen (ENB)  
TU Darmstadt  
Fachbereich Architektur  
El-Lissitzky-Str.1  
64287 Darmstadt  
Prof. Dipl.-Ing. Christoph Kuhn  
+49 (0)6151 16 23459  
kuhn@enb.tu-darmstadt.de

THING TECHNOLOGIES GmbH  
Am Kronberger Hang 8  
65824 Schwalbach am Taunus  
Dr. Marc Gille-Sepelri  
+49 (0)151 17552601  
marc.gille@thing-it.com

FARO Europe GmbH  
Lingwiesenstraße 11/2  
70825 Korntal-Münchingen  
Steffen Kappes  
steffen.kappes@faro.com

## GipsRec2.0

### Projektleitung

MUEG Mitteldeutsche Umwelt- und Entsorgung GmbH  
Geiseltalstraße 1  
06242 Braunsbedra  
Dipl.-Ing. Jörg-Michael Bunzel  
+49 (0)34633 41 115  
joerg-michael.bunzel@mueg.de

### Verbundpartner

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)  
4.4 Thermochemische Reststoffbehandlung und Wertstoffrückgewinnung  
Richard-Willstätter-Straße 11  
12489 Berlin  
Dr.-Ing. Karin Weimann  
+49 (0)30 8104 5676  
karin.weimann@bam.de

Öko-Institut e.V.  
Rheinstraße 95  
64295 Darmstadt  
Dr. Matthias Buchert  
+49 (0)6151 8191 147  
m.buchert@oeko.de

## LIBS-ConSort

### Projektleitung

IAB Weimar gGmbH  
Über der Nonnenwiese 1  
99428 Weimar  
Dr.-Ing. Barbara Leydolph  
+49 (0)3643 8684-145  
b.leydolph@iab-weimar.de

### Verbundpartner

SECOPTA analytics GmbH  
Rheinstraße 15b  
14513 Teltow bei Berlin  
Dr. rer. nat. Christian Bohling  
+49 (0)3328 35403 00  
christian.bohling@secopta.de

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung  
Unter den Eichen 87  
12205 Berlin  
Prof. Dr. rer. nat. Sabine Kruschwitz  
+49 (0)30 8104-1442  
sabine.kruschwitz@bam.de

Technische Universität Berlin  
Straße des 17. Juni 135  
10623 Berlin  
Prof. Dr. rer. nat. Dietmar Stephan  
+49 (0)30 314 72 100  
stephan@tu-berlin.de

BTB Recycling-Hof GmbH  
Frank-Zappa-Straße 25  
12681 Berlin  
Reimar Breul  
+49 (0)30 9824700  
info@btb-bautransporte.de

T.B.R. Teltower Baustoffrecycling GmbH  
Teltower Damm 300  
14167 Berlin  
Niko Schumann  
+49 (0)3328 301968  
n.schumann@tbrgmbh.de

Gramm Fertigungstechnik GmbH  
Harjesstraße 12  
99867 Gotha  
Andreas Gramm  
+49 (0)3603 895350  
a.gramm@gramm-fertigungstechnik.de

## MIN-LOOP

### Projektleitung

Technische Universität Kaiserslautern  
Fachbereich Bauingenieurwesen  
Fachgebiet Massivbau & Baukonstruktion  
Prof. Dr.-Ing. Matthias Pahn / Felix Ruppert, M.Sc.  
Paul-Ehrlich-Straße 14  
67663 Kaiserslautern  
+49 (0)631 205-3083  
matthias.pahn@bauing.uni-kl.de

### Verbundpartner

Technische Universität Darmstadt  
Institut für Werkstoffe im Bauwesen  
Prof. Dr.-Ing. Albrecht Gilka-Bötzow/  
Conrad Ballschmiede, M.Sc.  
Franziska-Braun-Straße 3  
64287 Darmstadt

Wilhelm Röser Söhne GmbH & Co. KG  
Dr.-Ing. Frank Röser  
Felsenstraße 4  
73450 Neresheim-Dorfmerkingen

Innigration GmbH  
Thomas Friedrich  
Cusanusstraße 23  
54470 Bernkastel-Kues

Betonwerk Büscher GmbH & Co. KG  
Wolfgang Büscher  
Bült 54  
48619 Heek

ee concept GmbH  
Dr.-Ing. Martin Zeumer/  
Dipl.-Ing. Anne-Kristin Wagner  
Spreestraße 3  
64293 Darmstadt

## R-ZIEMENT

**Projektleitung**  
Christoph Müller, Katrin Severins  
VDZ Technology gGmbH  
Toulouser Allee 71  
40476 Düsseldorf  
katrin.severins@vdz-online.de  
+49 (0)211 4578 253

**Verbundpartner**  
Institut für Ziegelforschung Essen e. V.  
Am Zehnthof 197  
45307 Essen  
Alexander Winkel  
+49 (0)201 59 213 41  
winkel@izf.de

Leipfinger-Bader GmbH  
Ziegeleistraße 15  
84172 Vatersdorf  
Dr. Matthias Heigl  
+49 (0)8762 733 192  
Matthias.heigl@leipfinger-bader.de

Scherer & Kohl GmbH  
Rheinhorststraße 63  
67071 Ludwigshafen  
Stephan Kreßer  
+49 (0)621 67150 16  
Kresser.S@scherer-kohl.de

Spenner GmbH & Co. KG  
Bahnhofstraße 20  
59597 Erwitte  
Martin Franzke  
+49 (0)2943 986 333  
m.franzke@spenner-zement.de

## REALight

**Projektleitung**  
Bauhaus-Universität Weimar  
Professur Werkstoffe des Bauens  
Dipl.-Ing. Alexander Schnell  
Coudraystraße 11  
99423 Weimar  
+49 (0)3643 58-4608  
alexander.schnell@uni-weimar.de

**Verbundpartner**  
Institut für Angewandte Bauforschung Weimar  
gemeinnützige GmbH  
Über der Nonnenwiese 1  
99428 Weimar  
Dr. Barbara Leydolph  
+49 (0)3643 8684-145  
b.leydolph@iab-weimar.de

Bundesanstalt für Materialforschung  
und -prüfung (BAM)  
Unter den Eichen 87  
12205 Berlin  
Dr. Katrin Rübner  
+49 (0)30 8104-1714  
katrin.ruebner@bam.de

Technische Universität Clausthal  
Adolph-Roemer-Str. 2a  
38678 Clausthal-Zellerfeld  
Prof. Dr. Daniel Goldmann  
+49 (0)5323 72-2735  
goldmann@aufbereitung.tu-clausthal.de

T.B.R. Teltower Baustoffrecycling GmbH  
Teltower Damm 300  
14167 Berlin  
Gundula Schumann  
+49 (0)30 847888-0  
g.schumann@tbrgmbh.de

MENDIGER BASALT  
Schmitz Naturstein GmbH & Co.KG  
Ernst-Abbe-Straße 2  
56743 Mendig  
r.krings@mendiger-basalt.de

Beton und Naturstein Babelsberg GmbH  
Walter-Klausch-Straße 17a  
14482 Potsdam  
Manuel Vöge  
+49 (0)331 70433-0  
voege@bnb-potsdam.de

Sievert Baustoffe GmbH & Co. KG  
Mühlenschweg 3  
49090 Osnabrück  
Michael Schnittker  
+49 (0)201 8488-111  
m.kanig@sievert.de

Heidemann Recycling Thüringen GmbH & Co. KG  
Zur Sandgrube 35  
98673 Eisfeld  
Kennet Heidemann  
+49 (0)3686 391-0  
kh@hrt-eisfeld.de

OPUS Denkmalpflege GmbH  
Gartenfelder Straße 29–37, Gbd. 35  
13599 Berlin  
Matthias Chronz  
+49 (0)30 8951-845  
chronz@opus-denkmalpflege.de

IBU-tec advanced materials AG  
Hainweg 9–11, 99425 Weimar  
Dr. Thomas Wocadlo  
+49 (0)3643 864980  
wocadlo@ibu-tec.de

HanseGrand Klimabaustoffe e.K.  
Haaßeler Kamp 3, 27446 Selsingen  
Hans Pape  
+49 (0)4284 92685-0  
h.pape@hansegrand.de

## RECBest

### Projektleitung

Dr. Martin Hönig  
WESSLING GmbH  
Kohlenstraße 51–55  
44795 Bochum  
+49 (0)2346897510  
martin.hoenig@wessling.de

### Verbundpartner

Buhck Umweltberatung GmbH  
Liebigstraße 46  
22113 Hamburg  
Herr Robert Texter  
+49 (0)40 720066853  
rtexer@buhck.de

Kluge Sanierung GmbH  
Hülsermannshof 36  
47179 Duisburg  
Herr Christoph Hohlweck  
+49 (0)203 5004260  
christoph-hohlweck@kluge-sanierung.de

TU Berlin, FMVA  
Prof. Dr.-Ing. Harald Kruggel-Emden  
Ernst-Reuter-Platz 1  
10588 Berlin  
+49 (0)30 31426910  
kruggel-emden@tu-berlin.de

TU Berlin, FB Bauphysik und Baukonstruktion  
Prof. Dr.-Ing. Frank Ulrich Vogdt  
Gustav-Meyer-Allee 25  
13355 Berlin  
+49 (0)30 31472141  
bauphysik@tu-berlin.de

## ReCyCONtrol

### Projektleitung

Leibniz Universität Hannover,  
Institut für Baustoffe (IfB) und Institut für  
Photogrammetrie und GeoInformation (IPI)  
30167 Hannover  
Prof. Dr. Michael Haist  
+49 (0)511 7 62 - 37 22  
haist@baustoff.uni-hannover.de

### Verbundpartner

Master Builders Solutions Deutschland GmbH  
Dr-Albert-Frank-Strasse 32  
83308 Trostberg  
Dr. Oliver Mazanec  
oliver.mazanec@mbcc-group.com

Heidelberger Beton GmbH  
Berliner Straße 6  
69120 Heidelberg  
Dr. Egor Secieru  
Dr.Egor.Secieru@heidelbergcement.com

Pemat Mischtechnik GmbH  
Hauptstraße 29  
67361 Freisbach  
Thomas Stahl  
t.stahl@pemat.de

Bikotronic GmbH  
Im Hohen Acker 7  
67146 Deidesheim  
Frank Weilacher  
frank.weilacher@bikotronic.de

Bundesanstalt für Wasserbau (Unterauftragnehmer)  
Kußmaulstraße 17  
76187 Karlsruhe  
Dr. Frank Spörel  
frank.spoerel@baw.de

alcemy GmbH  
Choriner Straße 83  
10119 Berlin  
Leopold Spenner  
leopold.spenner@alcemy.tech

**Assoziierter Partner:**

Moß Abbruch-Erdbau-Recycling GmbH & Co. KG  
Ulanenstraße 66  
49811 Lingen (Ems)

**Unterstützung durch:**

HOCHTIEF AG, Frankfurt;  
INSENSIV GmbH, Bielefeld

## RekoTi

**Projektleitung**

Leitung:  
FH Münster  
Prof. Sabine Flamme  
Corrensstraße 25, 48149 Münster  
Ansprechpartnerin:  
Franziska Struck  
f.struck@fh-muenster.de  
+49 (0)251 83 65 278

**Verbundpartner**

FH Münster, Institut für Infrastruktur • Wasser  
• Ressourcen • Umwelt  
AG Ressourcen  
Prof. Flamme  
Corrensstraße 25  
48149 Münster  
+49 (0)251 83-65253  
flamme@fh-muenster.de

AG Infrastruktur  
Prof. Heimbecher  
Corrensstraße 25  
48149 Münster  
+49 (0)251 83-65150  
heimbecher@fh-muenster.de

AG Verkehrswesen/Straßenbautechnik  
Prof. Weßelborg  
Corrensstraße 25  
48149 Münster  
+49 (0)251 83-65208  
wesselborg@fh-muenster.de

Stadt Münster  
Amt für Mobilität und Tiefbau  
Günter Stücker  
Albersloher Weg 33  
48155 Münster  
+49 (0)251 492- 6630  
stuecker@stadt-muenster.de

Hochschule Karlsruhe  
Institut für Verkehr und Infrastruktur  
Prof. Stöckner  
Moltkestraße 30  
Gebäude B  
76133 Karlsruhe  
+49 (0)721 925-2652  
markus.stoeckner@h-ka.de

Prof. Holldorb  
Moltkestraße 30  
Gebäude B  
76133 Karlsruhe  
+49 (0)721 925-2629  
christian.holldorb@h-ka.de

Ruhr-Universität Bochum  
Lehrstuhl für Informatik im Bauwesen  
Prof. König  
Universitätsstraße 150 Gebäude IC 6-63  
44801 Bochum  
+49 (0)234 32- 23047  
koenig@inf.bi.rub.de

Hermann Dallmann Straßen- und Tiefbau  
GmbH & Co. KG, Bramsche  
Manuel Heitmann  
Heywinkelstraße 3  
49565 Bramsche-Engter  
+49 (0)5461 952-93  
m.heitmann@dallmann-bau.de

Thomas & Bökamp Ingenieurgesellschaft mbH  
Münster  
Henning Klöckner  
Im Derdel 13  
48161 Münster  
+49 (0)2534 610-119  
h.kloeckner@thomas-boekamp.de

## REMINTA

### Projektleitung

Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann  
Walther-Nernst-Straße 9  
38678 Clausthal-Zellerfeld  
+49 (0)5323 72-2735  
daniel.goldmann@tu-clausthal.de

### Verbundpartner

Technische Universität Clausthal  
Adolph-Roemer-Straße 2a  
38678 Clausthal-Zellerfeld  
Dr.-Ing. Kai Rasenack  
+49 (0)5323-72-6127  
kai.rasenack@tu-clausthal.de

Geocycle (Deutschland) GmbH  
Tropowitzstraße 5  
22529 Hamburg  
Germany  
Dr. Thorsten Haase  
+49 (0)5132 927-262  
thorsten.haase@geocycle.com

Helmholtz-Zentrum Dresden - Rossendorf e. V.  
Bautzner Landstraße 400  
01328 Dresden  
Dr. Katrin Pollmann  
+49 (0)351 260 2946  
k.pollmann@hzdr.de

Hochschule Harz  
Hochschule für angewandte Wissenschaften  
Friedrichstraße 57-59  
38855 Wernigerode  
Prof. Dr. Alena Bleicher  
+49 (0)3943 659 278  
ableicher@hs-harz.de

IBU-tec advanced materials AG  
Hainweg 9-11  
99425 Weimar  
Dr. Matthias Ommer  
+49 (0)3643-8649-49  
ommer@ibu-tec.de

pdv-software GmbH  
Im Schleeke 50  
38642 Goslar  
Tristan Niewisch  
+49 (0)5321 5732-22  
t.niewisch@pdv-software.de

Wilhelm Geiger GmbH & Co. KG  
Herzmanns 10  
87448 Waltenhofen  
Dr. Felix von Aulock  
+49 (0)8379 2348 -143  
felix.vonaulock@geigergruppe.de

## SABINE

### Projektleitung

STUVA e.V.  
Dr.-Ing. Christian Thienert  
Mathias-Brüggen-Straße 41  
50827 Köln  
+49 (0)221 5 97 95-0  
c.thienert@stuva.de

### Verbundpartner

MC-BAUCHEMIE MÜLLER GmbH & Co. KG  
Dr. Max-Fabian Volhard  
Am Kruppwald 1-8  
46238 Bottrop  
+49 (0)2041 101-217  
max-fabian.volhard@mc-bauchemie.de

FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e.V.  
Dr.-Ing. Andreas Ehrenberg  
Bliersheimer Straße 62  
47229 Duisburg  
+49 (0)2065 99 45-50  
a.ehrenberg@fehs.de

PORR GmbH & Co. KGaA  
Dr.-Ing. Thorsten Weiner  
Franz-Rennefeld-Weg 4  
40472 Düsseldorf  
+49 (0)211 15 92 23-415  
thorsten.weiner@a-porr.de

## SlagCEM

### Projektleitung

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung  
(BAM)

Richard-Willstätter-Straße 11  
12489 Berlin

Dr. Christian Adam  
+49 (0)30-8104-5670  
christian.adam@bam.de

### Verbundpartner

ArcelorMittal Eisenhüttenstadt  
Werkstraße 1  
15890 Eisenhüttenstadt

Dr. Frank Gehrmann  
+49 (0)3364 37 2045  
Frank.Gehrmann@arcelormittal.com

Technische Universität Berlin  
Gustav-Meyer-Allee 25 (Gebäude 13b)  
13355 Berlin, Germany  
Kevin Wendt  
+49 (0)30 314 72 109  
k.wendt@tu-berlin.de

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR e.V.)  
Linder Höhe  
51147 Köln  
Dr. Thomas Werner  
+49 (0)2203 601 5041  
Thomas.Werner@dlr.de

FEhS - Institut für Baustoff-Forschung e.V.  
Bliersheimer Str. 62  
47229 Duisburg  
David Algermissen  
+49 (0)2065-99 45 12  
d.algermissen@fehs.de

thyssenkrupp Industrial Solutions  
thyssenkrupp Allee 1  
45143 Essen  
Carsten Sachse  
carsten.sachse@thyssenkrupp.com

Öko-Institut e.V.  
Borkumstrasse 2  
13189 Berlin  
Alexandra Möck  
+49 (0)30 405085-302  
a.moeck@oeko.de

LTB Lasertechnik Berlin  
Am Studio 2c  
12489 Berlin  
Lutz Pfeifer  
+49 (0)30 912075-320  
lutz.pfeifer@ltb-berlin.de

## TReMin

### Projektleitung

Technische Universität Clausthal  
CUTEC Clausthaler Umwelttechnik  
Forschungszentrum

Leibnizstraße 23  
38678 Clausthal-Zellerfeld  
Leitung:

Prof. Dr. mont. Dr. rer. nat. Michael Fischlschweiger  
+49 (0)5323 72-3871  
michael.fischlschweiger@tu-clausthal.de

Koordination:  
Dipl.-Ing. Andre Bertram  
+49 (0)5323 72-6201  
andre.bertram@cutec.de

### Verbundpartner

Bundesanstalt für Geowissenschaften  
und Rohstoffe (BGR)  
Stilleweg 2  
30655 Hannover  
Marie Gentzmann, M.Sc.  
+49 (0)511 643 2839  
marie.gentzmann@bgr.de

Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe  
und Ressourcenstrategie IWKS  
Brentanostraße 2  
63755 Alzenau  
Dipl.-Ing. (FH) Thilo Brämer  
+49 (0)6023-32039-804  
thilo.braemer@iwks.fraunhofer.de

# Impressum

## **Herausgeber**

CUTEC Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum  
Leibnizstraße 23  
38678 Clausthal-Zellerfeld  
www.cutec.de

## **Ansprechpartner und Redaktion**

### **CUTEC Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum**

Dipl.-Geow. Henrike Franke  
henrike.franke@tu-clausthal.de  
Dipl.-Ing. Oliver Keich  
oliver.keich@tu-clausthal.de

## **Ansprechpartner**

### **Bundesministerium für Bildung und Forschung, BMBF**

Thomas Bartelt  
Referat 726 – Ressourcen, Kreislaufwirtschaft;  
Geoforschung  
E-Mail: thomas.bartelt@bmbf.bund.de

## **Ansprechpartnerin Projektträger Jülich**

Dr. Hannelore Katzke  
E-Mail: h.katzke@fz-juelich.de

## **Gestaltung**

Thomas Velte  
grafik-design | illustration  
thomasvelte-design.de

## **Bildnachweise**

Titel: ©Calado – stock.adobe.com  
S. 5: ©Countrypixel – stock.adobe.com  
Rückseite: Andre Bertram, CUTEC

## **Druck**

Oberharzer Druckerei  
Fischer & Thielbar GmbH  
Alte Fuhrherrenstraße 5  
38678 Clausthal-Zellerfeld

Stand Juni 2024  
1. Auflage, 100 Stück

[www.remin-kreislaufwirtschaft.de](http://www.remin-kreislaufwirtschaft.de)

Das dieser Publikation zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 033R252 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren der einzelnen Beiträge. Die Publikation ist nicht für den gewerblichen Vertrieb bestimmt.





ReMin-Abschlusskonferenz in Goslar