Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft

Bauen und Mineralische Stoffkreisläufe (ReMin)

Zwischenergebnisse

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

FONA
Forschung für Nachhaltigkeit

ReMin
Ressourceneffiziente
Kreislaufwirtschaft
Bauen und Mineralische Stoffkreisläufe

Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft

Bauen und Mineralische Stoffkreisläufe (ReMin)

Zwischenergebnisse

CUTEC

Clausthaler Umwelttechnik
Forschungszentrum

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 Baustoffsortierung zur Aufbereitung von Bau- und Abbruchabfällen für die Kreislaufwirtschaft

20 **MIN-LOOP**
Substitution polystyrolbasierter Hartschäume durch zementgebundenen Mineralschaum aus rezykliertem Brechsand in Sandwichhybrid-decken 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 Ressourcen-schutzbetone – 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 **Kontaktdaten der Verbundpartner**

50 **Impressum**

Willkommen bei ReMin

Die Förderrichtlinie „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Bauen und Mineralische Stoffkreisläufe (ReMin)“ ist eine Maßnahme zur Umsetzung des BMBF-Forschungskonzepts „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft“ und Teil der Strategie „Forschung für nachhaltige Entwicklung – FONA“. Ziel der Förderung ist es, den Ausbau der Kreislaufwirtschaft weiter voranzutreiben. Im Mittelpunkt stehen dabei 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

ASHCON

Einsatz von aufbereiteter Müllverbrennungsasche als Ausgangsstoff bei der Betonherstellung

Zielstellung

Durch die Verbrennung von Siedlungsabfällen fallen in Deutschland pro Jahr etwa 5,7 Mio. t Hausmüllverbrennungsaschen (HMVA) an. Ein Großteil davon gelangt bisher auf Deponien. Aus Gründen der Ressourceneffizienz und zur Einsparung von Deponievolumen sollten diese Aschen zukünftig bestmöglich in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden. Durch neue Verfahrenskombinationen und das innovative Aufbereitungsverfahren der elektrodynamischen Fragmentierung lassen sich stofflich komplex zusammengesetzte HMVA an Materialgrenzflächen zerlegen und anschließend in mehr oder weniger stofflich sortenreine Bestandteile sortieren. Neben Eisen- bzw. NE-Metallen, Glas und Organik werden weitere mineralische Bestandteile abgetrennt. Für diese mineralischen Sekundärrohstoffe sollen neue Verwertungswege entwickelt werden. Ziel ist die Substitution natürlicher Gesteinskörnung der Kornfraktion 2/8 mm in herkömmlichen Rezepturen für Transportbeton und Betonwerksteine. Durch die Verwertung dieser Sekundärrohstoffe werden diese dem Stoffkreislauf nicht entzogen und die Beanspruchung von Primärrohstoffen wird reduziert.

Von baustofftechnologischem Interesse sind die Eigenschaften dieser neuartigen Betone in Bezug auf Rheologie, Festigkeit, Einhaltung von Umweltanforderungen und Dauerhaftigkeit. Die Gewinnung und Aufbereitung von HMVA aus Deponien sowie Müllverbrennungsanlagen, die betontechnologische Entwicklung von Rezepturen für die Transportbeton- und Betonwerksteinindustrie bis hin zur großtechnischen Herstellung sind Gegenstand des aktuellen Forschungsprojektes ASHCON. Da für die Verwertung der fragmentierten HMVA in Beton Schadstoffgrenzwerte (z.B. Schwermetallkonzentration) unterschritten werden müssen, wird in dem Projekt ASHCON ebenfalls die Eignung eines zerstörungsfreien Neutronenanalyseverfahrens mittels realer Proben eruiert.

Zwischenergebnisse

Zu Beginn des Projektes erfolgte seitens der TH Köln die Entnahme von HMVA-Proben am Entsorgungszentrum Leppe in Lindlar-Remshagen sowohl aus ausgewählten Deponieabschnitten als auch aus „frisch" angelieferten Rostaschen der Müllverbrennungsanlagen in Bonn und Leverkusen der AVEA. Es wurden 12 Proben aus Deponieabschnitten und 12 Proben aus Anlieferungen von jeweils 300 kg sowie eine größere Sammelprobe genommen und auf die Kornfraktion 2/8 mm durch Siebung eingeengt. Die Menge der jeweiligen Proben wurde dadurch auf circa ein Drittel reduziert.

Nach Übersendung an das Fraunhofer IBP wurden die Proben durch elektrodynamische Fragmentierung aufbereitet. Dabei wird das Material entlang von Korngrenzen sortenrein voneinander getrennt. Prozessbedingt nimmt der Anteil der Fraktion > 2 mm zugunsten der Feinfraktion ab. Im Weiteren wurden Eisen- und Nichteisenmetalle aus der groben Fraktion aussortiert. Die Entfernung glasartiger Bestandteile aus der verbliebenen vorwiegend mineralischen Fraktion erfolgte durch das Sortierunternehmen Binder+Co aus Österreich.

Während des Fragmentierungs- und Sortierungsprozesses bei der Aufbereitung der HMVA-Proben erfolgten an der TH Köln ergänzend zum ursprünglichen Arbeitsplan baustofftechnologische Voruntersuchungen an fragmentierten Feinfraktionen < 2 mm (Bild 1). Hintergrund für diese Zusatzuntersuchungen war der gegenüber der ursprünglichen Annahme geringe Anteil von Metall in der Feinfraktion (Bild 2). In Untersuchungen an Standardmörteln wurden Fraktionen von natürlichem Sand durch feine, fragmentierte HMVA sukzessiv unter Berücksichtigung der Rohdichten substituiert.

Begleitend hierzu wurden im Rahmen einer systematischen Erhebung Informationen über die Mengen, Qualitäten und den aktuellen Verbleib der anfallenden HMVA zusammengestellt und ausgewertet. Ein weiterer Schwerpunkt waren Recherchen bei potenziellen Verwertern hinsichtlich der Spezifikation für die aufbereiteten Schlacken. Hierzu wurden Gespräche mit den jeweiligen Akteuren geführt sowie entsprechende Informationen auf der Basis von Literaturrecherchen zusammengestellt.

Ausblick

Seit November 2022 liegt die grobe Fraktion 2/8 mm des fragmentierten und sortierten Müllverbrennungsreststoffes vor, so dass aktuell baustofftechnologische Untersuchungen zu stofflichen Eigenschaften dieses Materials laufen und Rezepturen für Betonwerkstein und Transportbeton unter Einsatz dieses Materials entwickelt werden. In dem Zuge werden auch die geplanten Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit und den Umwelteigenschaften beginnen sowie Wege zur großtechnischen Umsetzung eruiert.

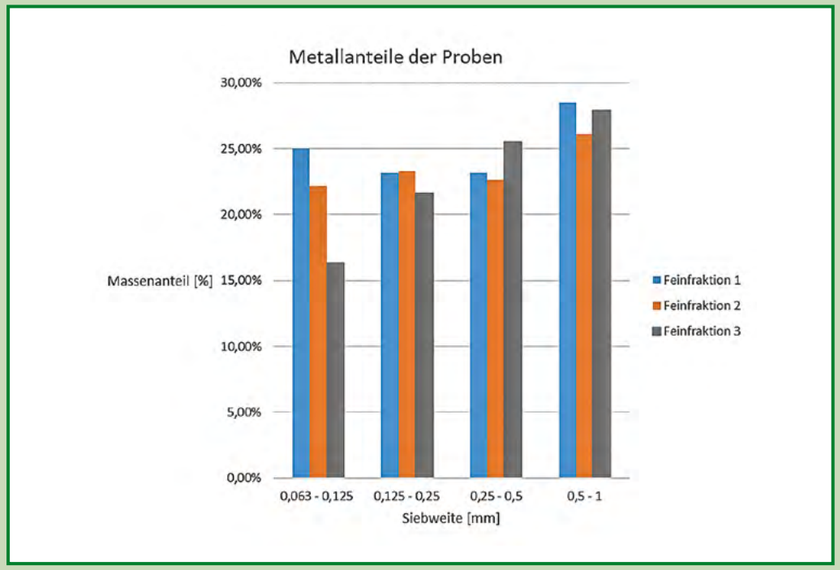

Bild 1:
Sieblinien von drei Teilproben fragmentierter Feinfraktion
Quelle:
Vitaliy Spektor, TH Köln

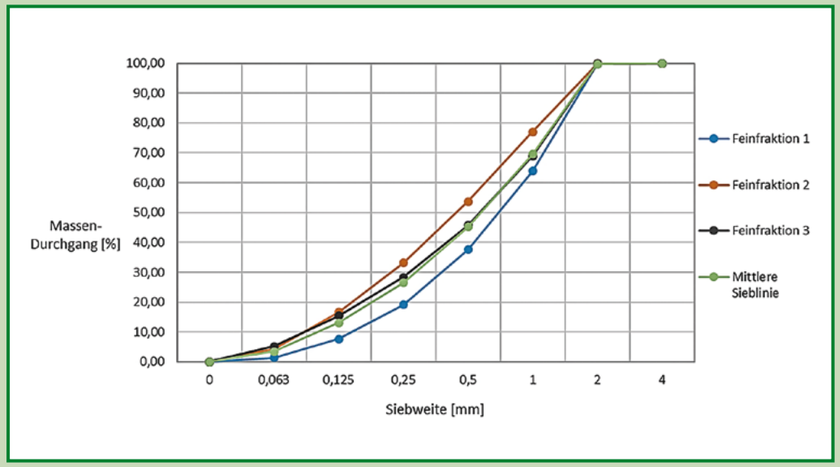

Bild 2:
Korngrößenspezifische Massenanteile von FE-Metallen in Teilproben der fragmentierten Feinfraktion
Quelle:
Vitaliy Spektor, TH Köln

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

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

BAUSEP

Separation von Aschen und Schlacken für die Herstellung ressourceneffizienter Bauprodukte

Zielstellung

Das übergeordnete Ziel des Projekts BAUSEP ist die Entwicklung und Produktion ressourceneffizienter Bauprodukte durch den Einsatz von Aschen und Schlacken sowie die Evaluierung der Ergebnisse. Konkret sollen hierfür Müllverbrennungsaschen (MVA) und Eisenhüttenschlacken aus der Eisen- und Stahlproduktion als Substitut für Primärgesteinskörnungen bereitgestellt und dadurch der Abbau natürlicher Gesteinsvorkommen sowie der Landschaftsverbrauch reduziert werden. Aus den Substituten sollen anschließend ressourceneffiziente Betonbauteile, wie Pflaster- und Verbundsteine, entwickelt werden und deren Nachhaltigkeit durch eine begleitende Ökobilanzierung und techno-ökonomische Analyse aufgezeigt werden. Ergänzende Untersuchungen zu technischen und rechtlichen Gesichtspunkten sollen zudem den zukünftigen Einsatz aufbereiteter Müllverbrennungsaschen und Eisenhüttenschlacken in handelsfähigen und vermarktbaren Bauprodukten beleuchten.

Zwischenergebnisse

Um die unterschiedlichen Nebenprodukte der Eisen- und Stahlproduktion abzubilden, wurden eine Konverterschlacke (LD-Schlacke), eine Hochofenschlacke (HOS) und eine Elektroofenschlacke (EOS) beprobt. Zudem sind eine Müllverbrennungsasche direkt nach der Nassaustragung und eine Asche nach etwa 8-monatiger Lagerung beprobt worden. Der Großteil der Aschen wurde vom Projektteam in einem mehrstufigen Prozess aus Ultraschallbehandlung, Wäsche und Brecher aufbereitet. Ein kleinerer Teil der Aschen wurde mit einem kommerziellen Verfahren (vgl. BMBF Projekt „EOP-WATECH“ (FKZ 033RK056A)) intensiv aufgereinigt. Ziel ist stets die Abtrennung von in bautechnischer Sicht störenden Stoffen. Dies sind im Wesentlichen Salze, Metall- und Glasfraktionen. Parallel dazu erfolgte die Aufbereitung der unterschiedlichen Schlacken durch Metallabscheidung und Brechen. Zuletzt wurden die Aschen und Schlacken per Siebung in Fraktionen mit unterschiedlicher Korngröße aufgeteilt. Diese Fraktionen bilden die Grundlage zur anteiligen Substitution von Sand und Kies aus der Originalrezeptur. Dabei bildet die optimale Einstellung der Sieblinie der eingesetzten Sekundärrohstoffe einen Schlüsselparameter für die Herstellung von Betonpflastersteinen. Durch Kombination einzelner Siebfraktionen der Schlacken konnte eine nahezu identische Sieblinie zur Originalrezeptur erstellt werden (Bild 1).

In Laborversuchen sind mit dem Proctor-Verfahren (Bild 2) erste Probekörper hergestellt werden. Dabei wurden Substitutionsraten für die primäre Gesteinskörnung (Sand & Kies) von bis zu 100% realisiert. Verglichen mit der Originalrezeptur, wiesen einige Probekörper mit Schlacke höhere Werte für die relevante Spaltzugfestigkeit auf. In Bild 3 ist ein gebrochener, industriell hergestellter Pflasterstein zu sehen, in welchem 50% der Kieskörnung (2/8 mm) durch entsprechende Körnung der Hochofenschlacke substituiert wurde. Somit konnte bereits die Übertragbarkeit der Labormischungen auf die industrielle Anlage erfolgreich nachgewiesen werden.

Ausblick

In den folgenden Monaten erfolgt die Rezepturentwicklung für die MV-Aschen. Nach der Herstellung im Labormaßstab, soll auch hier der Sprung in die industrielle Produktion erfolgen. Ein besonderer Fokus wird auf den Nachweis der Einsetzbarkeit der verwendeten Aschen und Schlacken gelegt. So werden die Aschen wie auch die Schlacken gemäß der zukünftig geltenden Ersatzbaustoffverordnung (EBV) auf ihr Auslaugungsverhalten per Perkolationsversuch hin untersucht. Der Nachweis wäre ein essentieller Schritt auf dem Weg zur Markteinführung entsprechender Produkte. Zudem wird im letzten Projektjahr auf Basis der bisher gesammelten Daten die techno-ökonomische Analyse abgeschlossen. Materialtechnisch erfolgt die Prüfung der Dauerhaftigkeit der hergestellten Bauprodukte sowie die Evaluierung der Rezyklierbarkeit.

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

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

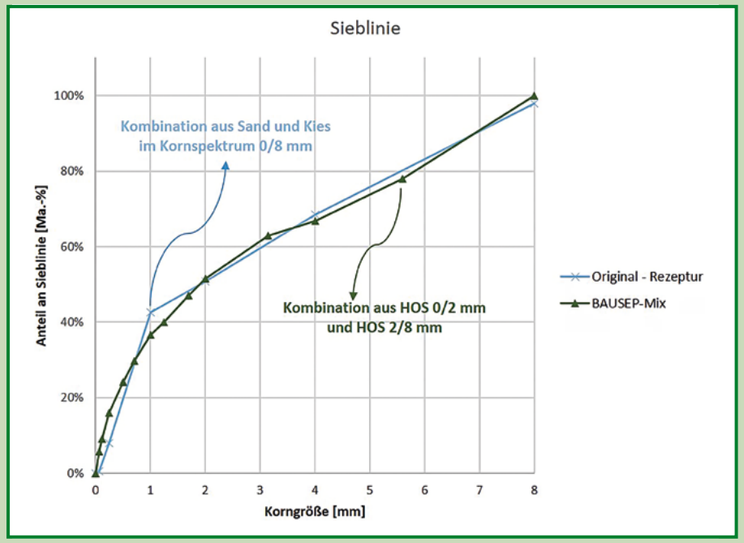

Bild 1:
Vergleich der Sieblinien aus der Originalrezeptur und einer „BAUSEP-Mischung“ mit Hochofenschlacke (HOS)
Quelle:
Fraunhofer IBP

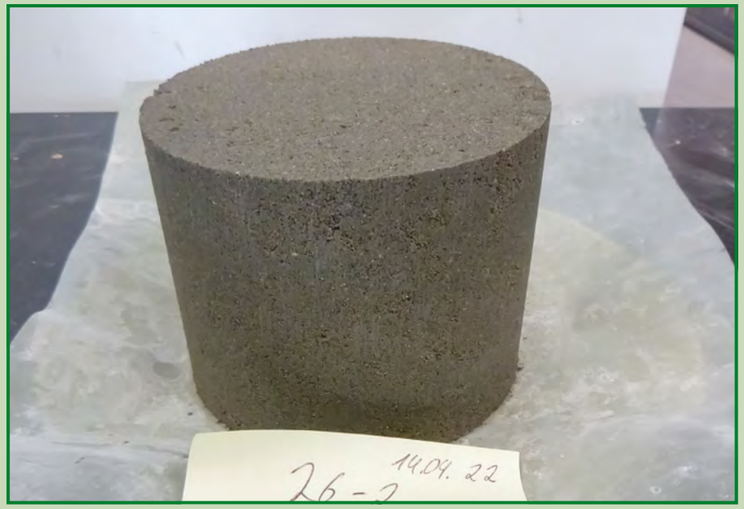

Bild 2:
Proctor-Probe einer Betonrezeptur mit 50% Substitution der groben Zuschlagskörnung (2/8 mm) durch Hochofenschlacke
Quelle:
Fraunhofer IBP

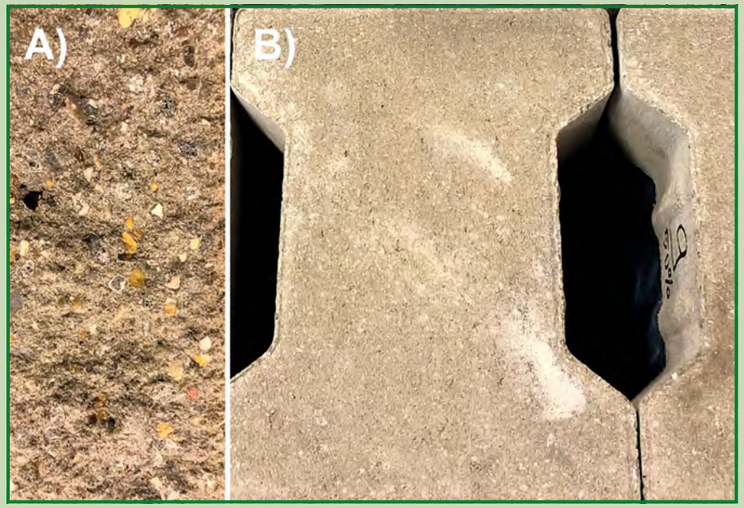

Bild 3:
A) Bruchfläche des BAUSEP-Steins mit einer 50%igen Substitution von Kies (2/8 mm) mit Hochofenschlacke (HOS, 2/8 mm);
B) industriell hergestellter „BAUSEP-Stein“ im „Doppel-T-Verbundpflaster“-Format mit einer Stärke von 8 cm
Quelle:
Fraunhofer IBP

EMSARZEM

Einsatz von MV-Schlacke als Rohstoff für die Zementherstellung

Zielstellung

In Deutschland werden ca. 25 Mio. t Siedlungs- und Gewerbeabfälle energetisch verwertet. Die dabei anfallende Gesamtmenge von ca. 6 Mio. t MV-Schlacke (Frischschlacke) enthält ca. 1,5 Mio. t einer Feinfraktion (< 3mm), aus der die Metalle heute nur bedingt wiedergewonnen werden können. Zu den wirtschaftlich interessanten Metallen in dieser Fraktion gehören Gold, Kupfer und Zinn, wobei Kupfer bei einer konservativen Betrachtung in einer Größenordnung von 0,3-0,4 % enthalten ist, was den Gehalten ärmerer Kupfererze entspricht, die heute auf der Welt abgebaut werden. Damit ist diese Fraktion unabhängig von Metallpreisschwankungen als Wertstoff zu betrachten. Da die Metalle überwiegend in Form kleiner Metall- oder Legierungspartikel vorliegen, die in der Regel mit mineralischen Bestandteilen der MV-Schlacke verwachsen sind, müssen die Feinschlacken zur Gewinnung dieser Metalle einem Prozess unterzogen werden, ähnlich wie bei der Aufbereitung von Erzen. Das primäre Ziel des Vorhabens EMSARZEM ist es, ein wirtschaftliches Verfahren zu entwickeln, mit dem aus der Feinfraktion die Metalle möglichst weitgehend durch Brechen, Mahlen, Sieben, magnetische Trennung, Wirbelstromtrennung und Waschen abgetrennt werden, so dass anschließend die verbleibende feingemahlene mineralische Restfraktion so sauber ist, dass sie als Rohstoff in der Zementproduktion eingesetzt werden kann.

Zwischenergebnisse

In diesem branchenübergreifenden Vorhaben arbeiten Unternehmen mit Erfahrungen entlang der gesamten Prozesskette mit den beteiligten Forschungsinstituten in einem neuartigen Ansatz zusammen, bei dem die Feinfraktion der MV-Schlacke bereits im Tonnenmaßstab gemahlen (Bild 1) wird.

Das Ergebnis des Mahlprozesses sind die drei unterschiedlichen Fraktionen: Sichterfeingut, Grieße und Reject (Bild 2), aus denen mit Methoden der modernen Trenntechnik die Metalle im Technikumsmaßstab aus der mineralischen Fraktion separiert und angereichert (Bild 3) werden.

Mit den bisherigen Ergebnissen wurden neue Erkenntnisse hinsichtlich der analytischen Bewertung der chemischen Zusammensetzungen der Fraktionen des Mahlprozesses und der Entfernung der Metalle aus der mineralischen Restfraktion gewonnen. Im Weiteren wird untersucht, zu welchen Anteilen die mineralische Restfraktion bei der Klinkerherstellung in der Zementindustrie eingesetzt werden kann.

Ausblick

In den bisherigen Untersuchungen wurde ein Prozess entwickelt, mit dem reproduzierbar die metallischen Anteile von der verbleibenden feingemahlenen mineralischen Restfraktion getrennt und gezielt aufkonzentriert werden können. Nach Abschluss der zementtechnischen Untersuchungen werden Ergebnisse vorliegen, die zeigen, in welchen Gehalten die hier aufbereitete Feinfraktion der MV-Schlacke bei der Klinkerproduktion eingesetzt werden kann.

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

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

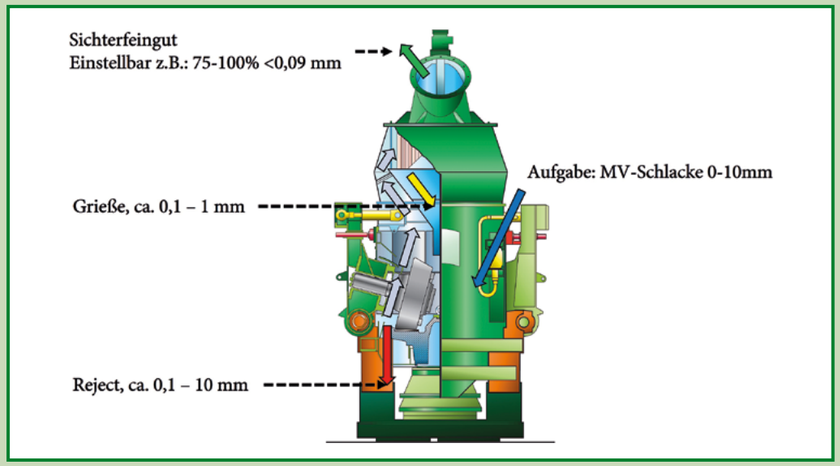

Bild 1:
Prinzip der Loesche-Mühle
Quelle:
Loesche GmbH

Bild 2:
Die Fraktionen Sichterfeingut, Grieße und Reject nach dem Mahlen
Quelle:
Universität Duisburg Essen

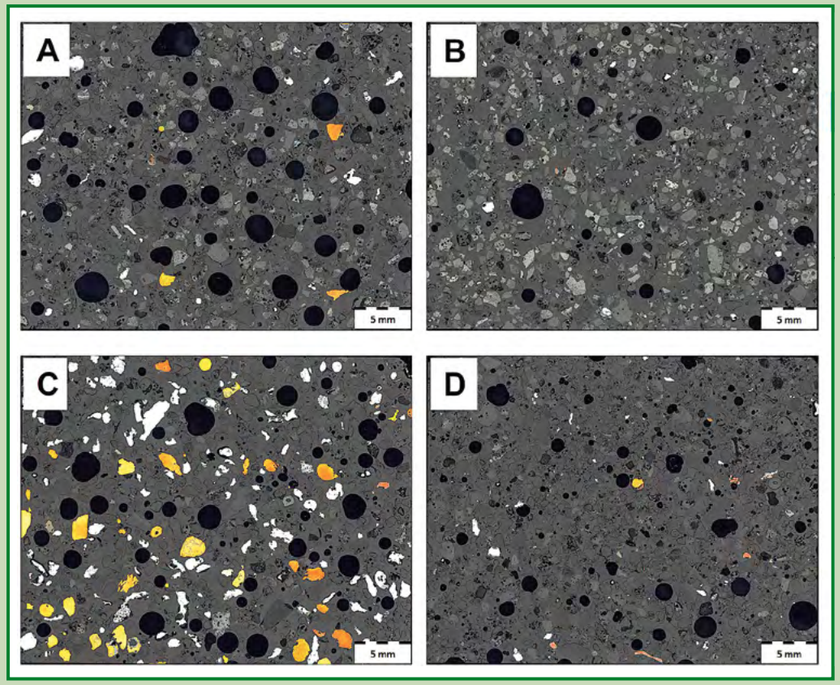

Bild 3:
Metallpartikel aus dem Reject nach unterschiedlichen Trennstufen:
A) Reject aus der Mühle,
B) Reject nach magnetischer Separation,
C) Metallfraktion nach der Wirbelstromtrennung,
D) Mineralische Fraktion nach der Wirbelstromtrennung.
Quelle:
Universität Duisburg Essen

FaBeR

Faser- und Beton-Recycling von Carbon- und Textilbeton

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 und eine ökonomische Bewertung der entwickelten Baumaterialien.

Zwischenergebnisse

Die assoziierten Industriepartner Fydro Glassfibreconcrete und Hering Bau haben Produktionsabfälle aus Textilbeton mit Glas- bzw. Carbonbewehrung für die Aufbereitung zur Verfügung gestellt. Am AMR (siehe Verbundpartner, S. 40) erfolgte die selektive Zerkleinerung mittels Backenbrecher mit anschließender Klassierung zur Sortierung von Betonbruch und Fasern sowie zur Herstellung bestimmter Korngrößenverteilungen (Bild 1). Die entsprechenden Fraktionen 0–2 mm, 2–4 mm, 4–8 mm, >8 mm, 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 Werktrockenmischung eingesetzt.

Die Feinfraktion wurde von der Holcim (Deutschland) GmbH als Zementbestandteil in unterschiedlichen Zusammensetzungen im Labor getestet. Für die anschließende Erprobung im Technikumsmaßstab wurde der Brechsand aufbereitet (Bild 2) und anschließend mit Portlandzement und teilweise Hüttensandmehl zu unterschiedlichen Zementarten gemischt.

Die Aufbereitung der Carbonfaserfraktion erfolgt bei der Mitsubishi Chemical Advanced Materials GmbH. In einem Pyrolyseverfahren (Bild 3) 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 und sind somit vielversprechend für die Anwendung im Beton.

Die Glasfasern konnten bei den verwendeten Proben nicht vollständig vom Beton separiert werden, so dass eine gemischte Fraktion entstanden ist.

Das INaB erhielt von den Projektpartnern relevante Prozessdaten (Inputs und Outputs), die für eine erste Modellierung der Ökobilanz relevant waren. Erste Erkenntnisse aus der vorläufigen Ökobilanz waren, dass sich der Energiemix der Pyrolyse, abhängig vom Anteil erneuerbarer Energien, stark auf das Treibhausgaspotenzial auswirkt, während die Zerkleinerung des Betons anteilmäßig am bedeutendsten für das Humantoxizitätspotenzial ist.

Ausblick

Basierend auf den bisherigen positiven Ergebnissen werden unterschiedliche Rezepturen für faserbewehrten Industriefußboden entwickelt, um sowohl die Carbonkurzfasern, den separierten Betonbruch als auch den glasfaserhaltigen Betonbruch hochwertig zu nutzen. Die Rezepturen werden zunächst im Labor getestet und anschließend unterstützt durch die Baumaschinen Beckschulte KG auf einer Probefläche am ITA appliziert.

Auch zwei Recyclingzemente werden im Betonmaßstab im Hinblick auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften untersucht.

Mögliche Faseremissionen im Aufbereitungs- und Verarbeitungsprozess werden in einer im Rahmen des Projekts aufgebauten Prüfkammer erfasst und bewertet. Im letzten Schritt werden die Ökobilanzen mit den Daten der finalen Zusammensetzungen der Recyclingprodukte aktualisiert und parallel dazu die Lebenszykluskostenrechnungen fertiggestellt.

Projektlaufzeit
1. 5. 2021 – 31. 10. 2023

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: Aufbereitung von Carbon-Textilbeton
Quelle: AMR

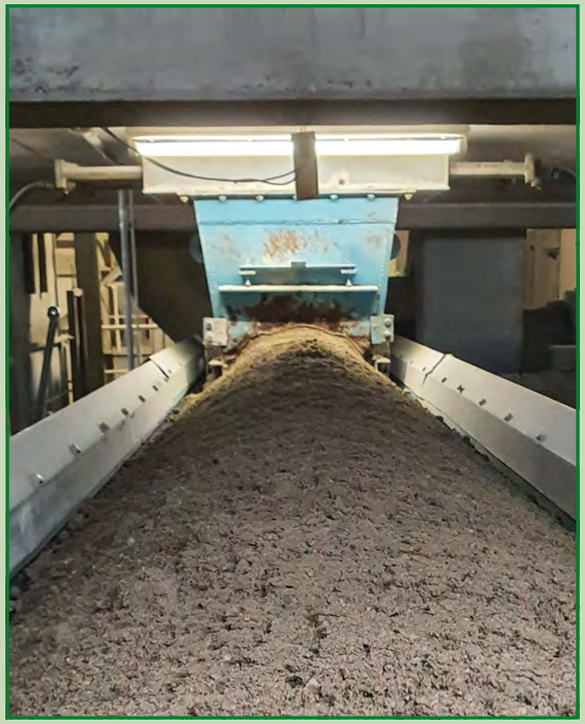

Bild 2: Brechsand zur Herstellung von R-Zement
Quelle: Holcim (Deutschland) GmbH

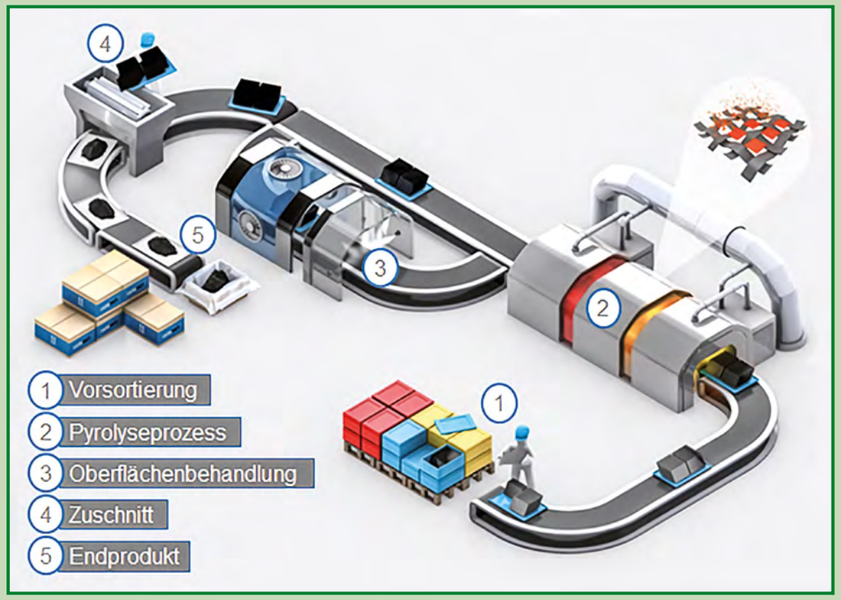

Bild 3:
Aufbau der Pyrolyseanlage für die Aufbereitung von separierten Carbontextilien und anderen CFK-Abfällen
Quelle:
Mitsubishi Chemical Advanced Materials GmbH

FERTIGTEIL 2.0

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

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 BIM Modell abgebildet. Die Betonbauteile werden anschließend zu flexiblen neuen Fertigteilkonstruktionen zusammengefügt.

Zwischenergebnisse

Im bisherigen Verlauf des Projekts wurden Verfahren entwickelt und erprobt, mit denen Betonbauteile zur Wiederverwendung digital erfasst und über Metadaten in einer Datenbank katalogisiert werden können. Dazu wurden sowohl eingebaute als auch bereits demontierte Betonbauteile mittels 3D-Scanning durch FARO digital erfasst. Außerdem ist mit FARO ein Datenmodell für die Katalogisierung der in der Datenbank vorhandenen Bauteile entwickelt worden. Die Datenbank ist in Form einer REST-API ansprechbar.

Weiterhin wurde auf Seiten des Fachgebiets Digitales Gestalten an der TU Darmstadt (DDU) ein Software-Workflow in Form eines kombinatorischen Optimierungsprozesses (Matchmaking) entwickelt. Mit dieser Software lassen sich auf Grundlage eines Bauteilbedarfs geeignete Bauteile automatisiert aus den in der Datenbank verfügbaren auswählen. Dabei können sowohl geometrische Informationen, Daten über die Beschaffenheit der Bauteile sowie ökologisch relevante Daten, wie Transportwege und Verarbeitungsaufwand, in die Optimierung integriert werden. Die Software lässt sich an die von FARO entwickelte Datenbank über die REST-API anbinden.

Im Mai wurden auf dem Campus der TU Darmstadt Teile einer zum Abriss bestimmten Fußgängerbrücke durch gezielte Betonsägearbeiten demontiert (Bild 1) und zum Digital Building Fabrication Laboratory (DBFL) des Instituts für Tragwerksentwurf der TU Braunschweig transportiert. Dieses hat trockengefügte, reversible Betonverbindungen entwickelt und getestet (Bild 2). Die gewonnenen Betonteile erfasste FARO digital. Anschließend sind diese Teile am DBFL für eine Wiederverwendung vor- und aufbereitet worden. In einem weiteren Schritt werden die Bauteile nun mit den entwickelten Verbindungsdetails ausgestattet, um sie im Rahmen eines Demonstrators erneut einzusetzen.

Der gesamte Prozess der Bauteilgewinnung und -aufbereitung wurde und wird durch das Fachgebiet Entwerfen und Nachhaltiges Bauen (ENB) der TU Darmstadt begleitet. Im Rahmen einer Ökobilanzierung wird der ökologische Fußabdruck aller Einzelprozesse der Prozesskette quantifizierbar gemacht. Die Erkenntnisse aus dieser Ökobilanzierung fließen gleichzeitig in die Weiterentwicklung der Matchmaking-Software ein und informieren den kombinatorischen Optimierungsprozess.

In Zusammenarbeit mit THING TECHNOLOGIES wurden User-Interfaces für die Erfassung der Bauteile sowie für die prototypische Umsetzung eines Online-Marktplatzes in Form eines klickbaren Dummys entwickelt.

Ausblick

Aktuell befindet sich das Projekt in der Planungsphase für den Bau eines Demonstrators aus den wiedergewonnenen und veredelten Bauteilen (Bild 3).

Die Matchmaking-Software wurde so konzipiert, dass sie potenziell als Cloud-Software bereitgestellt werden kann. Eine solche Lösung dient dem Transfer der Forschungsergebnisse in die Praxis und bietet für die Zukunft wirtschaftliche Potenziale.

Projektlaufzeit
1. 3. 2021 – 28. 2. 2023

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 Betonsäge als Konzeptnachweis für die Gewinnung von Betonteilen zur Wiederaufbereitung und Wiederverwendung.
Quelle: DDU TU Darmstadt, Malcolm Unger

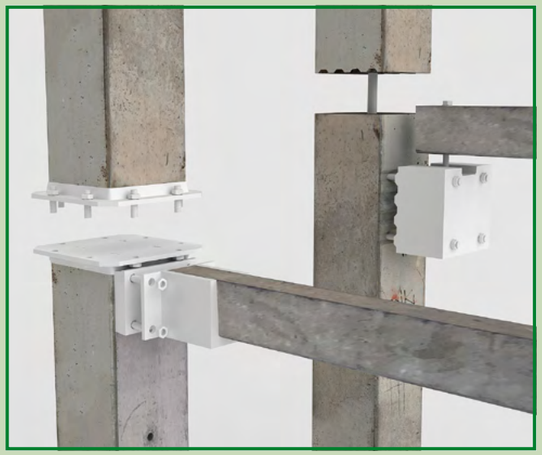

Bild 2: Varianten trockengefügter Verbindungsdetails für wiederverwendete Betonbauteile.
Quelle: ITE TU Braunschweig / DDU TU Darmstadt

Bild 3:
Entwurf eines Demonstrators aus wiederverwendeten Betonbauteilen mit trockengefügten Verbindungen.
Quelle:
ITE TU Braunschweig / DDU TU Darmstadt

GipsRec2.0

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

Zielstellung

Vor dem Hintergrund der Endlichkeit und zum Teil schwierigen Zugänglichkeit der natürlichen Gipsvorkommen und dem Rückgang der REA-Gipse aus der Kohleverstromung, sollen bisher unzureichend genutzte Potenziale aus dem Recycling von Gipsprodukten sowie sonstigen Gipsquellen identifiziert und bewertet werden. Ziel des Projektes ist die Ausweitung der Sekundärrohstoffpotenziale für die Herstellung von Recyclinggips.

Zwischenergebnisse

Im Projekt erfolgten zunächst umfangreiche Recherchen zu Stoffströmen, Potenzialen und Qualitäten von Gipsfaserplatten (GFP) sowie Synthesegipsen, deren Materialeigenschaften analytisch untersucht wurden. Dazu wurden das Aufkommen bzw. die Potenziale an GFP-Abfällen, insbesondere aus dem Rückbau und Abbruch, recherchiert und ausgewertet. Darüber hinaus sind bestehende Synthesegips-Potenziale industrieller Prozesse und deren Einsatzmöglichkeiten für das Recycling eruiert worden. Darauf aufbauend wurden geeignete Prozessketten zur Rückgewinnung der Wertstoffe Gips und Papier abgeleitet. Diese sind in entsprechende Versuchsanordnungen eingeflossen, um geeignete Aufbereitungstechnologien zu finden.

Im Rahmen von Großversuchen wurde intensiv an der Entwicklung technologischer Aufbereitungsprozesse für GFP gearbeitet. Die Versuche an Platten unterschiedlicher Feuchtegehalte verschiedener Hersteller (Bild 1) dienten als Grundlage für die Entwicklung technologischer Prozessketten im Technikumsmaßstab. Zum Einsatz kam unterschiedliche Zerkleinerungstechnik, wie Stachelwalzenbrecher, Hammermühle und Siebtechnik, die basierend auf MUEG-Erfahrungen prinzipiell zur Aufbereitung der GFP-Komponenten geeignet ist. Die Versuchsreihen wurden ausgewertet und hinsichtlich der erreichten Trennergebnisse in gips- und papierhaltige Fraktionen bewertet. Es zeigt sich, dass eine Trennung der GFP in die ursprünglichen Wertstoffe Gips und Papier mittels der entwickelten Prozesskette prinzipiell möglich ist (Bild 2), aber weiterer Optimierungsbedarf zur Verbesserung der jeweiligen Wertstoffanreicherung besteht.

Basierend auf der Potenzialerhebung für vorhandene Synthesegipse wurden für relevante Stoffströme im Labormaßstab die enthaltenen Schadstofffrachten und potenziellen Einsatzmöglichkeiten in der Gipsindustrie untersucht. Ein Schwerpunkt der Forschung ist dabei beispielsweise die Rückgewinnung von Gipsen, die im Rahmen der Aufbereitung von Batteriesäuren perspektivisch anfallen können. Im Hinblick auf den Ausbau der Elektromobilität in Deutschland und Europa ist dadurch ein hohes Potenzial zu erwarten.

Ausblick

Zur Optimierung der Trennergebnisse bei der Aufbereitung von GFP (Bild 3), sind in 2023 weitere großtechnische Versuche mit einer speziellen Siebtechnik in Irland geplant.

Anhand der Potenzialrecherchen folgen für potenziell interessante Synthesegips-Stoffströme entsprechende Konditionierungsversuche, damit diese der Gipsindustrie zurückgeführt werden können.

Auf Basis der Versuchsergebnisse, stehen im weiteren Verlauf der Projektbearbeitung ökologische und ökonomische Analysen für in Frage kommende Prozessketten sowie Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen an. Diese bilden die Grundlage für Empfehlungen an Wirtschaftsakteure und die politische bzw. administrative Ebene.

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

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

Bild 1:
Gipsfaserplatten – Ausgangsmaterial

Bild 2:
Aufnahme zerkleinerte GFP
Quelle:
MUEG

Bild 3:
Anlieferung GFP-Abfälle aus Rückbau

LIBS-ConSort

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

Zielstellung

Primäres Ziel ist die Erforschung und der Aufbau eines Analysesystems für eine automatisierte, sensorgestützte Sortierung von Bau- und Abbruchabfällen durch Einsatz des LIBS-Verfahrens, der laserinduzierten Plasmaspektroskopie, in Kombination mit optischen Verfahren. Neben der Sortierung unterschiedlicher Materialien (Beton, Mauerwerkbaustoffe, organische Bestandteile, Glas etc.) könnten auch Störstoffe, z.B. sulfathaltige Baustoffe, erkannt und ausgeschleust werden. Die anschließenden Verwertungs- und Absatzmöglichkeiten für die aussortierten Bestandteile (Sulfate, Schwermetalle etc.) werden geprüft. Die gesamte Wertschöpfungskette wird am Beispiel des Standortes Berlin untersucht.

Zwischenergebnisse

Erste Messungen mit LIBS und der Nahinfrarotspektroskopie, NIR, zeigen vielversprechende Ergebnisse bei der Unterscheidung verschiedener Materialtypen und weisen auf das Potenzial für eine erfolgreiche Kombination hin. Mittels LIBS wurden Spektralinformationen von 91 verschiedenen Bau- und Abbruchabfällen gesammelt, aus denen zwölf Merkmale extrahiert wurden. Mit diesen Merkmalen, zehn elementspezifische Informationen und die ersten beiden Hauptkomponenten, wurden zahlreiche Random-Forest-Klassifikatoren trainiert und anschließend auf unbekannte Testproben angewandt. Ziegel, Asphalt, Beton/Mörtel, Sandstein und Porenbeton erreichten zufriedenstellende Genauigkeiten, die zwischen 81 % und 99 % lagen. Gips, Leichtbeton und Naturstein zeigten geringere Genauigkeiten von 64 %, 50 % bzw. 5 %. Die schlechten Ergebnisse von Leichtbeton und Naturstein können durch ähnliche spektrale Eigenschaften und die geringe Anzahl von Proben innerhalb des Datensatzes erklärt werden. Da es sich bei diesen Ergebnissen lediglich um Zwischenergebnisse des laufenden Forschungsprojekts handelt, können die erzielten Genauigkeiten im Allgemeinen als vielversprechend angesehen werden. Es ist zu erwarten, dass der zugrundeliegende Datensatz durch die Sammlung weiterer Proben deutlich wachsen wird und als solide Basis für die geplante methodische Kombination mit VIS/NIR-Kameras dienen wird (Visual Infrared Spectroscopy, VIS). Erste Ergebnisse der NIR-Spektroskopie zeigen hier ein gutes Potenzial, wertvolle Informationen zur weiteren Steigerung der Sortierqualität zu liefern. Zur Umsetzung der methodischen Kombination wird aktuell in der BAM ein Prototyp aufgebaut, welcher die echtzeitfähige Klassifikation verschiedenster Baustoffe erproben soll. Die Schwerpunkte liegen hierbei auf einer automatisierten Datenaufnahme aller Sensoren und der anschließenden fusionierten Verarbeitung mittels multivariater Analyse und maschinellem Lernen. Die hieraus erarbeiten Erkenntnisse fließen direkt in die Entwicklung des Demonstrators ein. An der IAB Weimar gGmbH wurde ein Verfahrensschema entwickelt, nach dem Fremd- und Störstoffe in verschiedenen Sortierstufen aus dem Bauschuttstrom ausgetragen und für die weitere Verwertung gewonnen werden können (Bild 1). Mit Hilfe einer geeigneten Messstrategie (Bild 2) können diese Stoffe analysiert werden, wobei die Stärken der verschiedenen Sensorsysteme die möglichen Schwächen der anderen kompensieren sollen. Dadurch wird eine sichere Klassifikation der Stoffgruppen möglich. Zur Umsetzung des Verfahrensschemas wurde ein Demonstrator entworfen (Bild 3), der unter Mitwirkung aller Partner an der IAB Weimar gGmbH aufgestellt und erprobt werden soll.

Ausblick

Nach der technischen Fertigstellung des Prototyps an der BAM folgen umfängliche Experimente zur Erstellung einer aussagekräftigen Datenbasis. Diese wird im Anschluss zur Entwicklung der nötigen Sortieralgorithmen herangezogen. Dabei sollen auch mögliche Einflussfaktoren wie unterschiedliche Feuchtegehalte und Oberflächenverunreinigungen (Staub, Erde) auf das jeweilige Messverfahren sowie auf die Klassifizierungsergebnisse untersucht werden. Die abschließende Validierung erfolgt an „unbekannten" Referenzproben aus der Praxis, um statistische Aussagen zu Detektionswahrscheinlichkeiten treffen zu können.

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

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

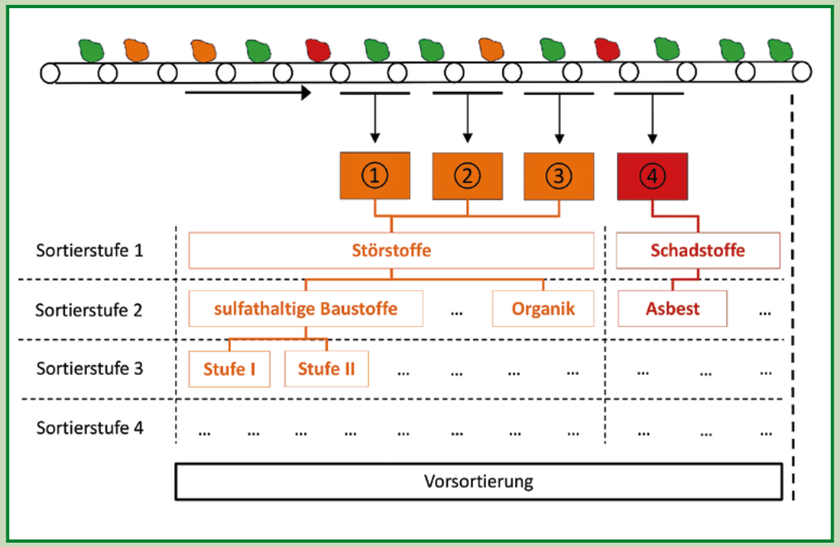

Bild 1:
Verfahrensschema zum Austrag von Fremd- und Störstoffen
Quelle:
IAB Weimar gGmbH

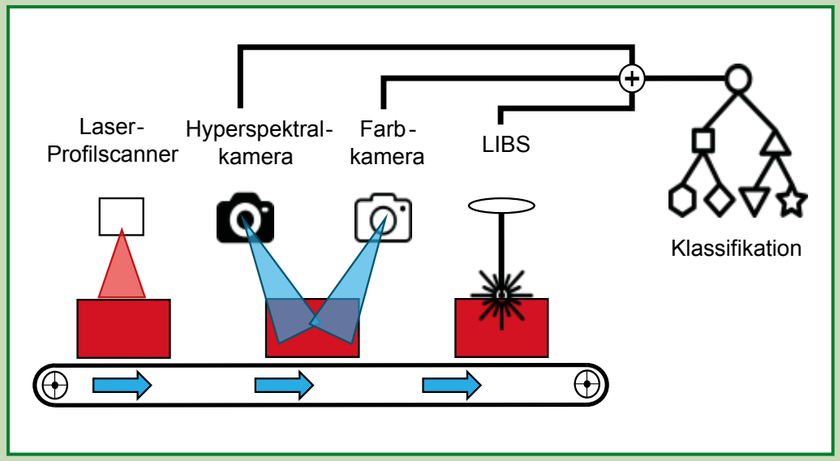

Bild 2:
Schematische Darstellung der Messstrategie zur sensorgestützten Identifizierung/Klassifizierung
Quelle: BAM

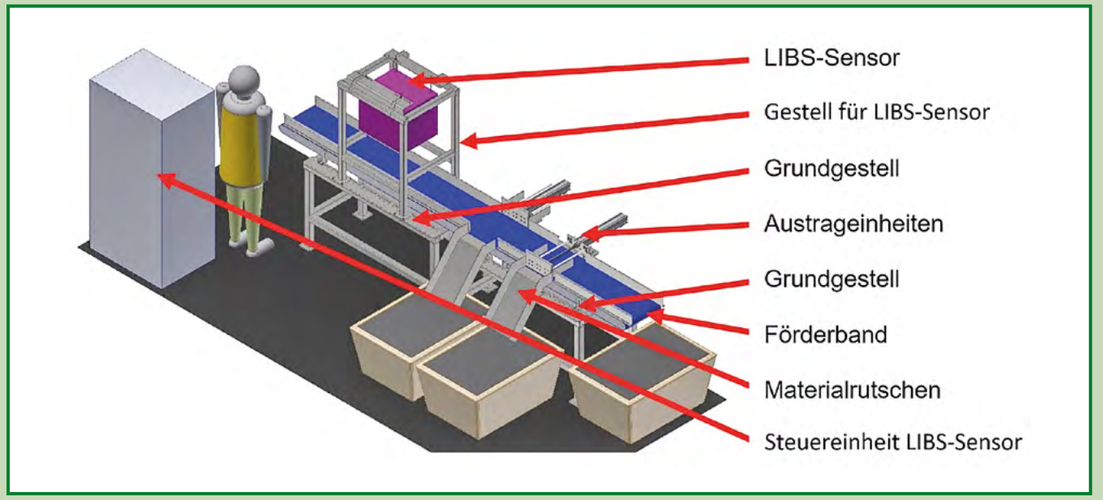

Bild 3: Schema Demonstrator: Trennsystem mit zwei Austrageinheiten
Quelle: IAB Weimar gGmbH

MIN-LOOP

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

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.

Zwischenergebnisse

Durch die Integration großflächiger Polystyrol-Verdrängungskörper 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 hierbei 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 geringen Gewichts (ca. 500 kg/m³) als Verdrängungskörper eignet und in seiner technischen Leistungsfähigkeit den herkömmlichen Polystyrol-Hartschäumen überlegen ist. Mit dem Einsatz von rezykliertem Brechsand aus Bauschutt als Komponente des Mineralschaums, lässt sich ein breites Anwendungsfeld für dessen aktuell nicht genutztes Recyclingpotenzial im R-Beton öffnen. Im Gegensatz zur Verwendung der polystyrolbasierten Verdrängungskörper soll nun ein hybrides Deckenelement mit einer unteren und oberen Betonschale aus Normalbeton und einer vollflächigen Kernschicht aus Mineralschaum entstehen (siehe Bild 1).

Während des iterativen Entwicklungsprozesses werden die mechanischen und bauphysikalischen Eigenschaften verschiedener Mischungsentwürfe mit unterschiedlichen Trockenrohdichten geprüft. Hierbei wurden Wärmeleitfähigkeiten von 0,08 bis 0,14 W/mK erzielt, wodurch sich das Material als Dämmstoff eignet. Weiterhin können mit den Zusammensetzungen Druckfestigkeiten von 1,0 bis 2,5 N/mm² erreicht werden, was die Festigkeitswerte herkömmlicher Dämmelemente deutlich überschreitet. Die Ergebnisse sind jedoch mit Streuungen verbunden. Dies kann auf die variierende Zusammensetzung des rezyklierten Brechsandes zurückgeführt werden. Untersuchungen zur Zusammensetzung des R-Sandes haben in diesem Zusammenhang gezeigt, dass vor allem Glas, Ziegel- und Betonbruch sowie Metalle als Nebenbestandteile auftreten können. Die Vermutung, dass sich der Wasseranspruch des Brechsandes (Körnung bis 4 mm) negativ auf die Homogenität der Mischung und somit auf die angestrebten Materialeigenschaften auswirkt, kann jedoch entkräftet werden. Diese hängt maßgeblich von der Mörtelkonsistenz und der Mischtechnik ab und kann bei den hergestellten Versuchskörpern als sehr homogen eingestuft werden (siehe Bild 2).

Während des gesamten Projektverlaufes werden die ökobilanziellen Einflüsse auf verschiedenen Ebenen untersucht. Hierbei werden die Baustoff-, die Bauteil- sowie die Gebäudeebene betrachtet. Es wird untersucht, ob durch gezielte Carbonatisierung des Betonbruch-Anteils im R-Sand eine zusätzliche CO_2-Bindung möglich ist. Die Ergebnisse der Carbonatisierungsversuche zeigen jedoch, dass nur geringe Kohlenstoffdioxidmengen aufgenommen werden können. Die Ursache wird darauf zurückgeführt, dass durch die Lagerung des Materials bereits eine volle CO_2-Bindung erzielt wird. Das Aufnahmepotenzial des R-Sandes wird folglich bereits vollständig ausgenutzt. Die Bilanzierungsergebnisse auf Baustoff- und Bauteilebene zeigen, dass sich mittels Substitution der Polystyrol-Elemente durch Mineralschaum eine deutliche Einsparung von nicht erneuerbarer Primärenergie sowie eine Senkung des Treibhauspotenzials erreichen lässt.

Ausblick

Im weiteren Projektverlauf werden die tribologischen Eigenschaften sowie die Schubtragfähigkeit des Mineralschaums untersucht. Weiterhin wird das Trag- und Verformungsverhalten des gesamten Sandwichquerschnitts mittels Scher- und Biegeversuchen experimentell ermittelt. Aufbauend auf den Versuchsergebnissen wird ein Ingenieurmodell zur Berechnung der Schnitt- und Verformungsgrößen (unter Berücksichtigung der Nichtlinearitäten) abgeleitet.

Aus den bisher erlangten Erkenntnissen lässt sich der Einsatz des Mineralschaums als Kernschicht in hybriden Sandwichdecken als mechanisch und stoffstromtechnisch optimierte Technologie identifizieren. Die daraus resultierenden Hochbaudecken werden sowohl in ihrer technischen Leistungsfähigkeit als auch in ihrem Nachhaltigkeitsverhalten eine deutliche Verbesserung zu den herkömmlich in Anwendung gebrachten Deckensystemen darstellen.

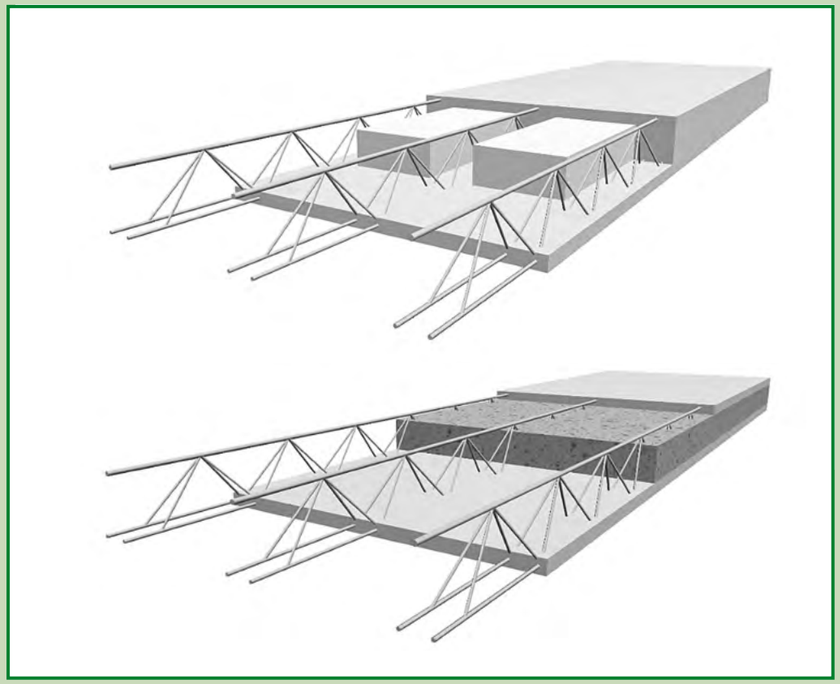

Bild 1:
Prinzipieller Aufbau einer Hybriddecke (oben mit Polystyrol-Verdrängungskörpern, unten mit Mineralschaum)
Quelle:
TU Kaiserslautern

Bild 2:
Porenstruktur eines Mineralschaum-Versuchskörpers
Quelle:
Conrad Ballschmiede,
TU Darmstadt

Projektlaufzeit
1. 2. 2021 – 31. 1. 202

Kontakt
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

R-ZiEMENT

Ziegelhaltige Recycling-baustoffe als Rohstoff für ressourceneffiziente Zemente in dauerhaften Betonen

Zielstellungen

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

Zwischenergebnisse

Wie können Recyclingstoffströme mit Ziegel angereichert werden? Wie sollte der Stoffstrom zusammengesetzt sein und aufbereitet werden? Was macht der Ziegel mit der Porosität des Zementsteingefüges und wieviel Zementklinker kann substituiert werden? Welche Eigenschaften entstehen im Mörtel und Beton, wenn ziegelmehlhaltige Zemente angewendet werden?

Auf diese Fragen will das Projekt Antworten geben und verknüpft damit die Kreislaufwirtschaft zwischen den produzierenden Industriezweigen Ziegel, Baustoffrecycling, Zement und Beton. Gleichzeitig beschreibt es Wege der Produktanwendung und betrachtet neben der linearen Wertschöpfungskette verstärkt die Ressourcen in einer zirkulären Wirtschaft.

Zunächst wurden die Stoffströme der Recycling- und Ziegelwerke untersucht. Für chemische und mineralogische Analysen wurden Proben aus Ziegelbruch, Baustellenrückläufer, Mauerwerksbruch, RC-Brechsand, RC-Schotter sowie Schleifstaub aus der Planziegelherstellung genommen, die sich in Herkunft, Zusammensetzung und Aufbereitungszustand zum Teil deutlich unterscheiden können. So zeigten sich beispielsweise in der Untersuchung der Hydratationswärme (ASTM C1897-20) von Ziegel- und Mauerwerksbruch in Bindemittelpasten Unterschiede in der puzzolanischen Reaktivität. Je nach Brenntemperatur und Tonzusammensetzung des Ziegels wurden Ergebnisse erzielt, die denen mit calcinierten Tonen vergleichbar sind. Die Analyse der Aluminium- und Siliziumionen gab ebenfalls Aufschluss darüber, welches Potenzial in der puzzolanischen Reaktivität der Recyclingbaustoffe steckt.

Mit Blick auf Schad- und Störstoffe, erfolgten an den ziegelhaltigen Recyclingbaustoffen Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit, die sich an den Empfehlungen der LAGA sowie an den Kriterien zur Verwendung von siliziumreicher Flugasche und Kesselsand in Betonbauteilen (DAfStb-Richtlinie) orientieren. Alle relevanten Kriterien wurden eingehalten.

Nach Trocknung der Recyclingbaustoffe aus den Ziegel- und Recyclingwerken folgte eine separate Mahlung auf eine vergleichbare Korngrößenverteilung (Bild 2). Es wurden Versuchszemente gemischt und labortechnisch geprüft. Zur Anwendung kamen neben den gemahlenen Recyclingbaustoffen auch klassierte Ziegelschleifstäube, die frei von groben Bruchstücken eine hohe Feinheit aufwiesen. In den Untersuchungen der Versuchszemente, die jeweils aus 70 M.-% Portlandzement CEM I der Festigkeitsklasse 52,5 R und 30 M.-% Recyclingbaustoff bestanden, wurden im Prüfalter von 28 Tagen (nach DIN EN 196-1) Druckfestigkeiten von 50 – 58 MPa erzielt (Bild 3).

Wurde bei gleichem Gehalt an Portlandzement der Recyclingbaustoff mit Kalkstein kombiniert, verringerten sich die Werte. Damit lagen die Druckfestigkeiten der ziegelhaltigen Zemente im Vergleich zu den kalksteinhaltigen Referenzzementen (ohne Ziegel) zum Teil deutlich höher. Form und Lage der Porengrößenverteilungen im Zementmörtel (Prüfalter 28 Tage) verändern sich, wenn ziegelhaltige Recyclingbaustoffe im Zement angewendet wurden. Im Vergleich zum Mörtel mit Kalkstein sind mehr feinere Poren entstanden.

Ausblick

Je nach stofflicher und granulometrischer Zusammensetzung ressourceneffizienter Zemente können Effekte aus der Porengrößenverteilung bis in die Dauerhaftigkeitsprüfung am Beton (z. B. Frostprüfung oder Chlorideindringprüfung) sichtbar bleiben und die Leistungsfähigkeit sowie die technische Anwendbarkeit ziegelhaltiger Zemente beeinflussen. Diese Effekte entscheiden über mögliche Zusammensetzungen künftiger ziegelhaltiger Zemente, ihre Anwendungsmöglichkeiten und damit darüber, wie weit der Klinkeranteil reduziert, CO_2-Emissionen verringert und natürliche Ressourcen eingespart werden könnten.

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

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

Bild 1:
Ziegelhaltige Recyclingbaustoffe – neue Rohstoffe für die Zementherstellung neben Kalkstein und Klinker
Quelle:
Annalena Krause, VDZ Technology gGmbH

Bild 2:
Vor und nach der Mahlung eines ziegelreichen Recyclingbaustoffes auf Zementfeinheit
Quelle:
Julia Vogel, VDZ Technology gGmbH

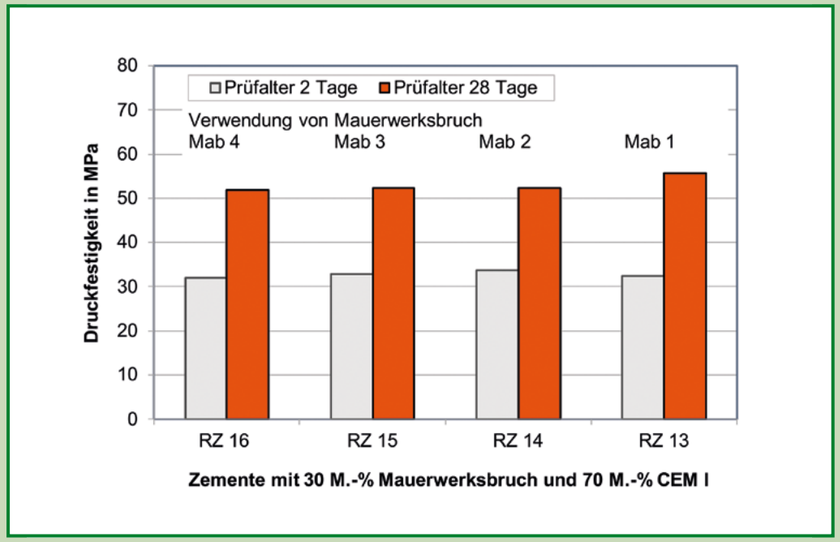

Bild 3:
Zementdruckfestigkeit im Prüfalter von zwei und 28 Tagen, Prüfung gemäß DIN EN 196-1, Verwendung unterschiedlicher Qualitäten eines Recyclingbaustoffs bei konstanter Mahlfeinheit
Quelle:
Katrin Severins, VDZ Technology gGmbH

REALight

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

Zielstellung

Zielstellung des Projekts REALight ist die Entwicklung einer Referenzanlage zur Herstellung von Leichtgranulaten (lightweight aggregates, LWA) aus mineralischen Bau- und Abbruchabfällen unter Erweiterung der Technologie zur Nutzung weiterer Einsatzstoffe und Gipsrückgewinnung. Dies ist Voraussetzung für die Übertragung der Produkt- und Verfahrensidee in die Praxis und den Nachweis der Sulfatabtrennung und -rückgewinnung aus gipshaltigem Material. Die Verbreiterung der Rohstoffbasis durch Einkopplung spezifischer Stoffströme wird untersucht. Im Ergebnis soll dieses den Blähmittelbedarf reduzieren und die Brenntemperatur absenken.

Die Herstellung ausreichender Mengen an Leichtgranulaten für die umfassende Charakterisierung nach Norm sowie die Praxiserprobung in bekannten Anwendungen aber auch neuen Einsatzfeldern sind weitere Ziele.

Zwischenergebnisse

Als Rohstoffe werden im Projekt in der Praxis bisher ungenutzte oder auf sehr niedrigem Niveau eingesetzte mineralische Bauabfälle wie gemischter Bauschutt und Ziegelbruch verwendet. Um die Rohstoffbasis zu verbreitern, wurde in einem Rohstoffassessment zudem die Eignung verschiedener Aschen, Schlämme, Brechsande und weiterer Reststoffe untersucht. Der Fokus der laufenden Arbeiten liegt auf Untersuchungen zur Identifikation wirtschaftlicher Blähmittel, beispielsweise Siliziumcarbid-haltiger Abfälle.

In einer Pilotanlage des Instituts für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH fanden mehrere Versuchskampagnen zur Herstellung der LWA statt (Bild 1, Bild 2). Die Sulfatabtrennung durch thermische Zersetzung bildet dabei die Grundlage für die Gewinnung von REA-Gips. Inzwischen wurden ein Nasswäscher und eine stationäre Gasanalyse installiert. Es konnte nachgewiesen werden: Die Sulfatabtrennung im Brennprozess ist grundsätzlich machbar.

Die in der Pilotanlage hergestellten LWA wurden den Projektpartnern für die Materialprüfungen und die Anwendungstests zur Verfügung gestellt. Der Projektpartner Opus entwickelt beispielsweise mit feinkörnigen LWA < 2 mm leichte Restauriermörtel (Bild 3). Hierfür sind mit Blick auf Kornform und Farbe vor allem gebrochene LWA geeignet. Vor Beginn der praktischen Arbeiten sind Anforderungskataloge für die Mörteleigenschaften erstellt worden.

Vom Projektpartner BNB wurde mit LWA der Körnungen 0–4 mm und 4–8 mm eine Leichtbetonrezeptur mit dem CO_2-armen Bindemittel Celitement entwickelt. Für Druckfestigkeitsprüfungen wurden Betonwürfel mit 100 mm Kantenlänge hergestellt. Bei einer Trockenrohdichte von etwa 1000 kg/m³ erreichten die Betone die Festigkeitsklasse LC 16/18.

Die bautechnischen Eigenschaften der eingesetzten LWA, ihre umweltanalytischen Eigenschaften und die Beton- beziehungsweise Mörtelkennwerte werden fortlaufend durch die BAM untersucht. Zur Betrachtung des Blähverhaltens einzelner Rohstoffmischungen wurden als Blähmittel dienende SiC-Zusätze verschiedener Herkunft chemisch-physikalisch untersucht.

Ausblick

Vor allem im Bereich feinerer, nicht gebrochener Körnungen für die Anwendung in Leichtmörteln sollen im Projekt weitere Brennversuche und Anwendungstests erfolgen.

Außerdem wird das Blähverhalten verschiedener Rohstoffmischungen weiter grundlegend untersucht, um auf Basis dieser Erkenntnisse den Herstellungsprozess der Leichtgranulate gezielter steuern zu können. Der Projektpartner Opus setzt die Entwicklung leichter Restauriermörtel, begleitet durch umfangreiche Mörtelprüfungen, fort. Beim Projektpartner BNB soll abschließend ein großformatiges Musterbauteil (Demonstrator) aus Infraleichtbeton (infralightweight concrete, ILC) hergestellt werden. Der dazu eingesetzte Beton wird umfangreich geprüft (Festigkeit, Schwindung, Widerstand gegen Frost und Carbonatisierung).

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

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:
Blick in den Drehrohrofen der Pilotanlage am IAB Weimar
Foto: Alexander Schnell

Bild 2:
Entnahme der Leichtgranulate am Ofenauslass der Pilotanlage am IAB Weimar
Foto: Alexander Schnell

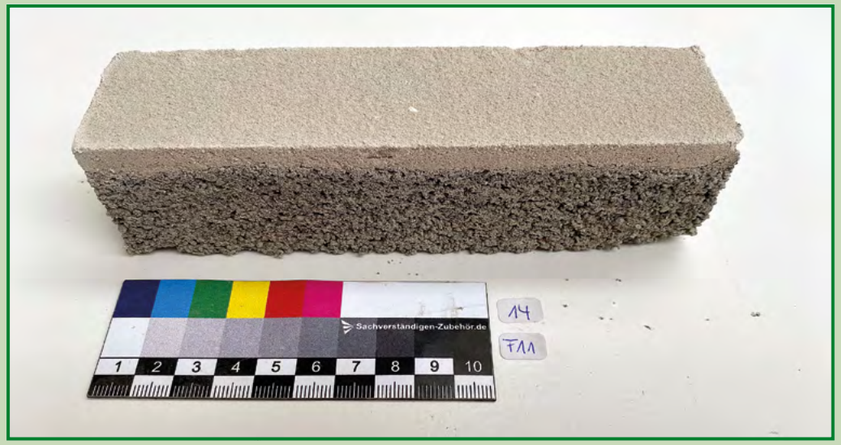

Bild 3:
Leichtgranulate im Produkt Restauriermörtel für die Denkmalpflege
Foto: OPUS Denkmalpflege GmbH

RECBest

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

Zielstellung

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

Zwischenergebnisse

Erste Anwendungen neuer Untersuchungsmethoden und Probenahmestrategien (insbesondere VDI 6202 Blatt 3 zur systematischen Erkundung und Bewertung von Asbest in baulichen und technischen Anlagen und VDI 3876 zum Messen von Asbest in Bau- und Abbruchabfällen) zeigen, dass Asbest im Bestand sowie im Bauschutt sicher und systematisch nachgewiesen werden kann (Bild 1).

Asbest hat in einer Vielzahl von Bauprodukten Anwendung gefunden. Dies können industriell gefertigte Bauprodukte sein, beispielsweise Asbestzementbauteile. Andererseits sind es Produkte, denen vor Ort individuell Asbestfasern beigemischt wurden, beispielsweise Putze, Klebstoffe oder Spachtelmassen. Diese Anwendungen sind insbesondere aufgrund ihrer großflächigen Verwendung von großer Bedeutung.

Wenn ein Gebäude unsachgemäß untersucht und dementsprechend nicht entfrachtet wird, ist im Bauschutt (Bild 2) und auch im RCM Asbest sicher nachzuweisen. Mittels nicht-invasiver Verfahren wie der Betonradiographie ist es möglich Hinweise auf die Verwendung potentiell asbesthaltiger Mauerstärken und Abstandshalter in Betonbauwerken zu erhalten. Es gilt der Grundsatz, dass je früher im Abbruchprozess nach Asbest gesucht wird, desto belastbarer ist das Ergebnis. Systematische Entfrachtung der Gebäude und Ausschleusung von Asbest aus dem Baubestand sind so möglich, um für asbestfreien Bauschutt und somit auch für asbestfreies RCM zu sorgen (Bild 3).

Es ist des Weiteren gelungen, einen ersten Prototyp zur sicheren Entfernung von Faserbeton-Mauerstärken aus Stahlbetonbauteilen zu entwickeln und zu erproben. In Versuchsaufbauten mit asbestfreien Materialien ist es gelungen Rohrhülsen aus Faserbeton restfrei aus dem Betonbauwerk zu entfernen. Hierbei wird der umgebende Beton nicht abgetragen bzw. beschädigt und die Armierung bleibt, im Gegensatz zu einer Kernbohrung, erhalten. Dies ist insbesondere bei Sanierungen im Bestand, mit dem Ziel das Bauwerk zu erhalten, ein entscheidender Vorteil, im Gegensatz zum Ausbau mittels Kernbohrung. Versuchsreihen an asbesthaltigen Rohrhülsen haben stattgefunden und vielversprechende Ergebnisse geliefert.

Im Bereich der Detektion und Behandlung von Abfallströmen haben differenzierte Charakterisierungen einzelner Abfallfraktionen gezeigt, dass asbesthaltige Bauprodukte in einer Vielzahl von Abfallkategorien und -fraktionen vorkommen können. Es werden bzw. wurden verschiedene Detektionsverfahren (Thermografie, Radar, Röntgen, kameragestützte Erkennung) von asbesthaltigen Materialien erprobt. Mittels Fotografie und Fotogrammetrie wurden zerkleinerte Materialien optisch charakterisiert.

Ausblick

Ein Ziel des Vorhabens ist die Konzeptionierung einer Aufbereitungsanlage, insbesondere für Abbruchmaterial von Stahlbetonbauwerken. Hier ist die Detektion und Ausschleusung asbesthaltiger Hilfsbauteile (z.B. Abstandshalter aus Faserbeton) im Baubestand eine große Herausforderung. Somit kann die Ausschleusung aus Bauschutt eine gangbare Methode zur Entfrachtung werden. Im Baubestand muss die systematische Erkundung vorab des Rückbaus bzw. Eingriffs in die Bausubstanz zur gängigen Praxis werden, um RCM vor Asbest abzusichern. So kann dieses Material zukünftig breite Akzeptanz finden und die höherwertige Nutzung – Upcycling statt Downcycling – ermöglicht werden.

Projektlaufzeit
1. 3. 2021 – 28. 2. 2023

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

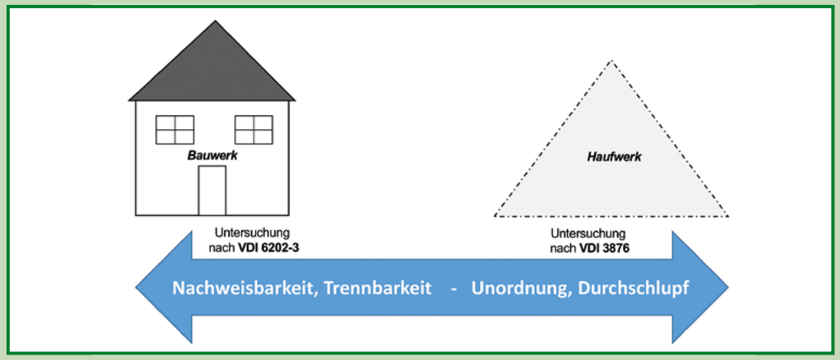

Bild 1:
Vergleich VDI 3876 und VDI 6202-3 bei der Detektion sowie Möglichkeit der Ausschleusung von Asbest aus dem Stoffkreislauf
Grafik:
Wessling GmbH

Bild 2:
Abbruchnahes Haufwerk aus Bauschutt
Foto:
Wessling GmbH

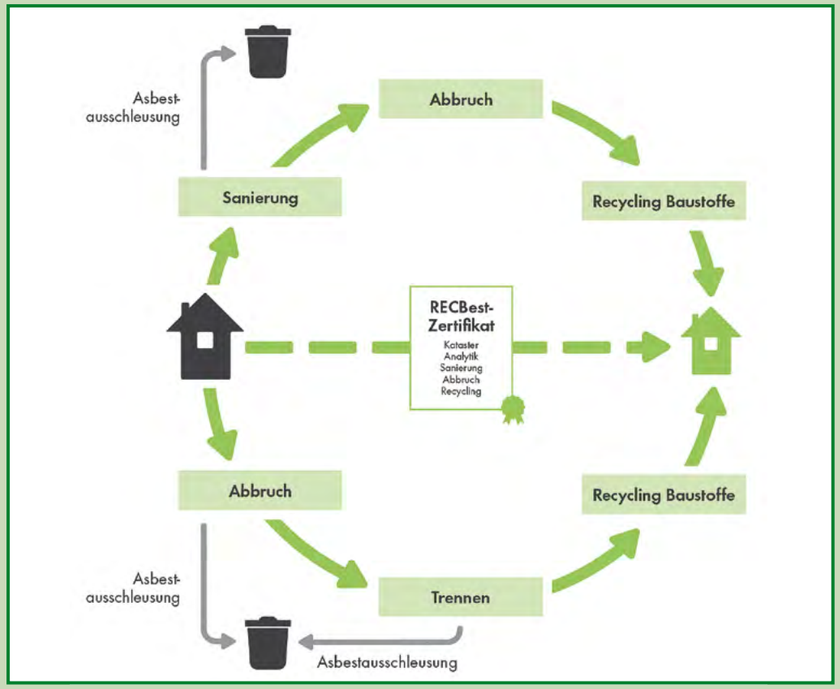

Bild 3:
Ablaufschema RECBest: Ausschleusung von Asbest aus dem Stoffkreislauf
Grafik:
Wessling GmbH

ReCyCONtrol

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

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) stark behindert. Materialschwankungen müssen durch hohe Sicherheitspuffer ausgeglichen werden, was die Verwendung dieser Stoffe unwirtschaftlich macht und ökologisch sehr nachteilig ist. Zielsetzung des Projekts ReCyCONtrol ist es, die Ressourceneffizienz bei der Herstellung von Beton signifikant zu steigern, in dem die technischen Voraussetzungen geschaffen werden, um bislang aufgrund zu großer Materialstreuungen ungeeignete Rohstoffe einsetzen und aus Qualitätssicherungsgründen erforderliche große Sicherheitspuffer in der Betonzusammensetzung reduzieren zu können. Dies soll durch die Einführung automatisierter, selbstlernender Prozessüberwachungs-, -steuerungs- und -regelungsmethoden bei der Betonherstellung erfolgen. Hierzu werden derzeit berührungsfreie Messsysteme und selbstlernende Prozesssteuerungs- und Regelungsmethoden für die Betonherstellung entwickelt, 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 Zugabe speziell abgestimmter Additive entsprechend auszusteuern.

Zwischenergebnisse

Im Zentrum der laufenden Arbeiten des Projekts ReCyCONtrol steht derzeit die Entwicklung von Techniken zur online-basierten Erfassung der Ausgangsstoff- und der Frischbetoneigenschaften mittels sogenannter computervision- bzw. deep-learning-basierter Methoden. Für die Methodenentwicklung war es zunächst notwendig eine Charakterisierung marktüblicher fraktionierter rezyklierter Gesteinskörnungen (Rezyklate) unterschiedlicher Gesteinskorntypen vorzunehmen und übliche Schwankungsbereiche der Eigenschaften rezyklierter Gesteinskörnungen zu identifizieren. Darauf aufbauend wurde eine Quantifizierung des Einflusses von Rezyklatschwankungen (Sieblinienvariationen/Korngrößenverteilung, Gesteinskorntyp, Materialzusammensetzung) auf die Frischbetoneigenschaften (Konsistenz, Konsistenzentwicklung, rheologischen Eigenschaften, etc.) vorgenommen. Dies ermöglichte die Festlegung von praxisrelevanten zulässigen Schwankungen der Betonzusammensetzung und der Betoneigenschaften sowie die Formulierung von technischen Randbedingungen zur Erfassung der Ausgangsstoff- und Frischbetoneigenschaften.

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 Auswertealgorithmus ermittelt dabei kontinuierlich und hochpräzise die Korngrößenverteilung, Kornform und stoffliche Zusammensetzung (natürliche Gesteinskörnung, Betonbruch, Mauerwerkbruch, etc.) aus den aufgenommenen Bilddaten. Im Vergleich zu mit klassischen Methoden (Siebung) ermittelten Korngrößenverteilungskurven, welche üblicherweise stichprobenhaft ermittelt werden, erzielt das entwickelte Verfahren bereits im jetzigen Entwicklungsstadium Ergebnisse mit mittleren absoluten Abweichungen von unter 2 % für die prädizierten Massenanteile der einzelnen Korngrößenfraktionen. Die Dauer der sensorbasierten Messung liegt dabei lediglich im Millisekunden-Bereich. Bild 1 zeigt eine schematische Übersicht der sensorbasierten Prädiktion der Sieblinie der Gesteinskörnung im Vergleich zum klassischen Siebverfahren.

Um 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 und 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-learing-basierten Auswertealgorithmen in rheologische Kenngrößen überführt. Parallel hierzu werden geeignete bauchemische Additive entwickelt, durch deren Zugabe die rheologischen Eigenschaften gezielt ausgesteuert werden können. 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 zu entwickeln und damit eine digitale Überwachung des Produktionsprozesses zu ermöglichen. Bild 2 zeigt eine schematische Übersicht der sensorbasierten Prädiktion der rheologischen Kennwerte des Frischbetons. Hier gelingt es bereits im jetzigen Entwicklungsstadium, eine sehr präzise Prädiktion der Betoneigenschaften in Echtzeit vorzunehmen.

Ausblick

Im weiteren Projektverlauf wird ein Übertrag der entwickelten Techniken vom Labormaßstab hin zu großtechnischen Untersuchungen im Transportbetonwerk vorgenommen. Ein wesentlicher Zwischenschritt ist der Aufbau einer medium-skaligen Pilot-Mischanlage im Technikum des Instituts für Baustoffe der Leibniz Universität Hannover.

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.

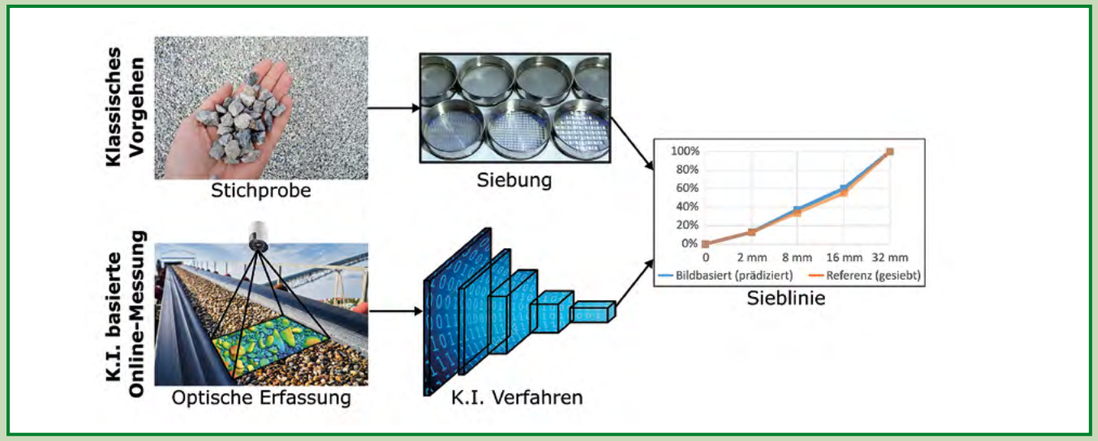

Bild 1: Bestimmung der Sieblinie mittels Siebung (oben) und automatisierten K.I. basierten Verfahren (unten)
Quelle: Leibniz Universität Hannover, Institut für Baustoffe

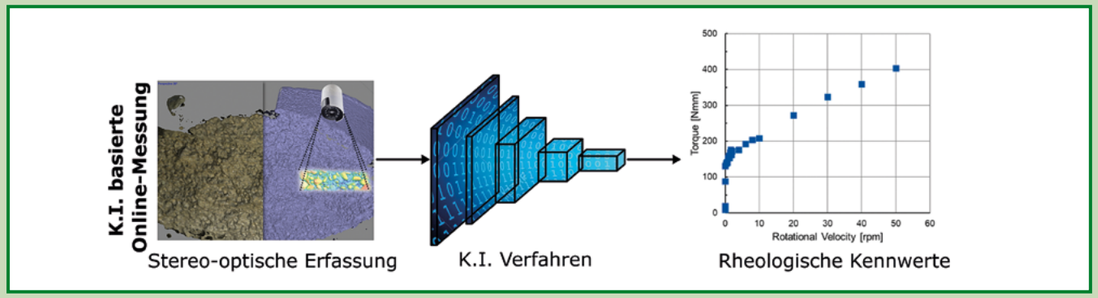

Bild 2: Bestimmung der rheologischen Kennwerte des Frischbetons mittels automatisierten K.I. basierten Verfahren
Quelle: Leibniz Universität Hannover, Institut für Baustoffe

Projektlaufzeit
1. 5. 2021 – 31. 4. 2024

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

RekoTi

Ressourcenplan kommunaler Tiefbau

Zielstellung

Im Projekt RekoTi wird ein Ressourcenplan für den kommunalen Tiefbau entwickelt. Dieser gibt Kommunen die Möglichkeit die Ressourcenpotenziale bei Brücken, Kanalisation und Verkehrsflächen zu erkennen und effizienter zu nutzen. Als Bausteine des Ressourcenplans werden eine digitale Toolbox entwickelt und ein Leitfaden für den Transfer in andere Kommunen erarbeitet.

Zwischenergebnisse

Als Grundlage für den Ressourcenplan werden zunächst die verbauten Massen und Materialien, das sogenannte „anthropogene Materiallager" ermittelt. Bei der Berechnungsmethodik bestimmen die Qualität und die Vollständigkeit der Daten für jedes Objekt die Herangehensweise zur Massenberechnung. So können auch für Objekte mit unvollständigen Daten Massen ermittelt werden, die zwar größere Unsicherheiten aufweisen, aber zunächst als Anhaltswerte für weitere Betrachtungen genutzt werden können. Mit einer Verbesserung der Datenqualität und -quantität, z. B. durch die Entwicklung und Implementierung einer modifizierten Erhebungssystematik in der Kommune, können diese Ungenauigkeiten sukzessive und deutlich reduziert werden. Mit dieser Vorgehensweise wird die oftmals heterogene Datenlage innerhalb von Kommunen berücksichtigt. Durch gesetzliche Vorgaben besteht z. B. im Bereich der Kanalisation bereits ein hohes Maß an Informationen, welche für die Abschätzung des anthropogenen Materiallagers verwertbar sind. Dagegen liegen im Bereich der Verkehrsflächen, aufgrund der im Regelfall historisch gewachsenen, sich vielfältig veränderten Straßenaufbauten, weniger Detaildaten vor. Bei Brückenbauwerken ist, bis auf die Angaben in den häufig noch analog vorliegenden Bauakten, der verfügbare Datenbestand für die hier diskutierten Fragestellungen äußerst gering. Um die entwickelte Vorgehensweise umsetzen zu können, wurden Baustoffdatenbanken für die Kanalisation und Verkehrsflächen erstellt. Für die Brücken werden aktuell entsprechende Berechnungsformeln ermittelt, die je nach Ausführungsart des Bauwerks spezifische Angaben zum Aufbau der Objekte ermöglichen.

Des Weiteren werden in RekoTi für die einzelnen Infrastrukturanlagen alternative Verfahren und Bauweisen in Hinblick auf damit verbundene Ressourceneinsparpotenziale untersucht. Hierzu wurde z. B. über eine Länge von 600 m eine Versuchstrecke in Münster gebaut, bei der unterschiedliche Anteile Asphaltgranulat in der Splittmastixasphalt-Deckschicht sowie Temperaturabsenkungen beim Asphaltmischgut umgesetzt wurden. Den Aufbau der sechs Versuchsfelder sowie ein Bild der Baumaßnahme zeigt Bild 1.

Um künftig die Nutzung des anthropogenen Materiallagers als Rohstoffquelle für Sekundärmaterialien und die Auswirkungen alternativer Verfahren bewerten zu können, wird die Methodik der Ökobilanzierung (ISO 14040) angewendet. Bestehende Defizite vorhandener Ökobilanzdatensätze werden untersucht und Verbesserungsmöglichkeiten aufgezeigt. Außerdem werden bestehende Pavement-Management-Ansätze (PMS) um eine ökologische Komponente erweitert. Künftig sollen dadurch Entscheidungsfindungen im Straßenerhaltungsmanagement auf ökonomischen und ökologischen Kennzahlen basieren.

Die erarbeiteten Inhalte werden den Kommunen in Form verschiedener digitaler Tools zur Verfügung gestellt. Plug-Ins in das GIS-Programm QGIS sollen z. B. eine schnelle und einfache Massenberechnung für bestimmte Gemeindegebiete oder die gesamte Kommune ermöglichen. Außerdem soll die Koordination gleichzeitig stattfindender Baumaßnahmen an unterschiedlichen Infrastrukturanlagen erleichtert werden, so dass durch den Überblick über bevorstehende Maßnahmen und die dort anfallenden Sekundärmaterialien eine Optimierung des Stoffstrommanagements ermöglicht wird. Erste Funktionen hierfür wurden bereits umgesetzt. Die Gesamtstruktur zeigt Bild 2.

Ausblick

Im weiteren Projektverlauf erfolgen die Berechnung des anthropogenen Materiallagers am Beispiel der Kommune Münster, die Bewertung alternativer Verfahren im Hinblick auf ihre Ressourceneffizienz, die Weiterentwicklung des PMS und die Erweiterung der Funktionen der digitalen Toolbox. Die Ergebnisse werden in Workshops mit assoziierten Kommunen evaluiert. Am Ende des Projekts sollen so ein interaktiver digitaler Leitfaden und eine digitale Toolbox zur Verfügung gestellt werden, die eine Übertragung der Ergebnisse auf andere Kommunen ermöglichen. Die beteiligten Wirtschaftspartner*innen können die im Verlauf erreichten Erkenntnisse in ihre zukünftige Arbeit, z. B. Planung und Umsetzung von Bauprojekten, einbringen.

Bild 1: Bau der Versuchsstrecke mit sechs Versuchsfeldern · *Quelle: Janik Schründer und Thomas Schönauer, FH Münster*

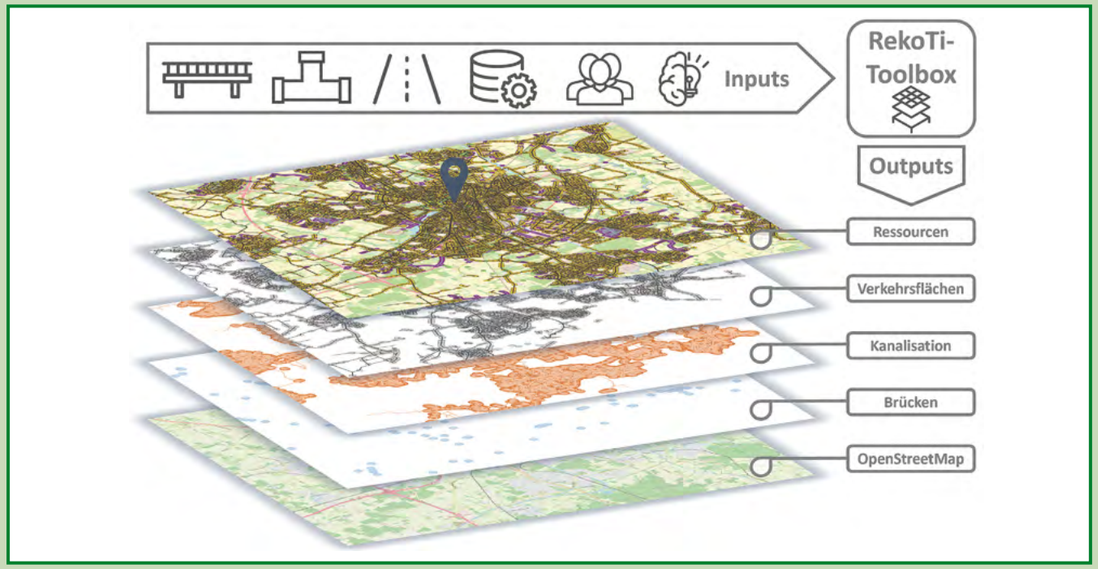

Bild 2: Struktur und Zielsetzung des Projekts RekoTi · *Quelle: Jonas Maibaum, Ruhr-Universität Bochum*

Projektlaufzeit
1. 2. 2021 – 31. 4. 2024

Kontakt
Leitung:
FH Münster
Prof. Sabine Flamme
Correnssstraße 25, 48149 Münster

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

REMINTA

REcycling MINeralischer Fraktionen aus TAilings

Im Projekt REMINTA sollen mineralische Rückstände der Bergeteiche des Erzbergwerks Rammelsberg aufbereitet und veredelt werden. Ziel ist die Entwicklung eines Gesamt-Verwertungskonzepts für die Teiche am Goslarer Bollrich (Bild 1) unter Berücksichtigung der drei Säulen der Nachhaltigkeit: Soziales, Ökologie und Ökonomie. Durch die Abtrennung der in der Mineralik enthaltenen Störstoffe, wie Mangan, sowie weiterer Wertstoffkonzentrate wird eine Verwendung von Mineralik-Fraktionen in der Baustofferzeugung beziehungsweise die direkte Verwendung im Rahmen von Deponie-, Damm- und Deichbaumaßnahmen als Sekundärrohstoff ermöglicht.

Hierfür wurden und werden Verfahren entwickelt, um die Rückstände in verschiedene Fraktionen aufzuteilen und diese so zu behandeln, dass jeweils eine möglichst hochwertige Verwertung erzielt werden kann. Durch nacheinander abfolgende Flotationen (Bild 2) wird das Material aus dem Bergeteich in drei Hauptrouten aufgeteilt: eine wertmetallreiche Sulfid-Fraktion (ca. 15–20%), eine Baryt-Fraktion (20–25%) und eine Fraktion mit der verbleibenden Mineralik (55–65%), die in einem zweiten Schritt nochmals in eine Silikat- und eine Karbonat- reiche Fraktion aufgeteilt werden kann.

Die wertmetallreiche Fraktion kann dann über hydrometallurgische Prozesse Vorprodukte zur Metallgewinnung bereitstellen. Hierzu wurden im Vorprojekt REWITA, als auch in diesem Projekt verschiedene Routen aufgezeigt. Beispielsweise ist eine Abfolge von Laugung und ionenselektiver Prozesse mit anschließender Fällung möglich.

Hauptaugenmerkt der Untersuchungen ist es, die Mineralikfraktion so aufzubereiten, dass ein Einsatz in der Bauindustrie ermöglicht wird. Hierzu müssen die identifizierten Störstoffe soweit ausgeschleust werden, dass die gesetzlichen Grenzen eingehalten werden und die Produktqualität des erzeugten Baustoffes nicht beeinträchtigt wird. Durch eine Kombination aus Flotation, biologischer und chemischer Laugung können diese zum Teil erheblich gesenkt werden, so dass ein Einsatz dieser Fraktion als Zement-Zuschlagsstoff in erreichbare Nähe rückt. So kann beispielsweise der Mangan-Gehalt von 1,2% auf unter 0,015% gesenkt werden.

Um den Übergang von der Laborforschung in die Umsetzung zu erleichtern, wird ein angepasstes Labor-Management-System entwickelt und durch ein Prozess-Simulations-Tool erweitert. Dieses kann die in der Forschung entstehenden Labordaten aufbereiten und gezielt Zusammenhänge aufzeigen. Das Simulations-Tool soll gleichzeitig bei der LCA-Analyse als Grundlage dienen.

Neben den technischen Erkenntnissen ist auch bei einer späteren Umsetzung die Unterstützung der Bevölkerung wichtig. In einer Vielzahl von Einzelgesprächen sowie einem Workshop wurden die Einstellungen und Gedanken der Bevölkerung zum Thema Rückbau des Bergeteichs in Oker aufgenommen (Bild 3). Nachfolgend wurden diese katalogisiert und analysiert, um so die Hauptmotivationen herauszufiltern und ein Stimmungsbild darstellen zu können.

Um den Rückbau des Bergeteichs großtechnisch darstellen zu können, sollte nach Beendigung des Projekts eine Pilotphase gestartet werden, um den Sprung vom Labormaßstab in den industriellen Maßstab zu ermöglichen.

Der im Projekt erstellte Leitfaden soll langfristig dazu dienen Hinweise, Methoden und Verfahren aufzeigen, die – unabhängig vom im Projekt behandelten Bollrich-Bergeteich – einen Rückbau weiterer Bergeteiche ermöglicht.

Projektlaufzeit
1. 4. 2021 – 31. 1. 2024

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

Bild 1:
Bollrich-Bergeteich in Oker, Goslar
© *TUC*

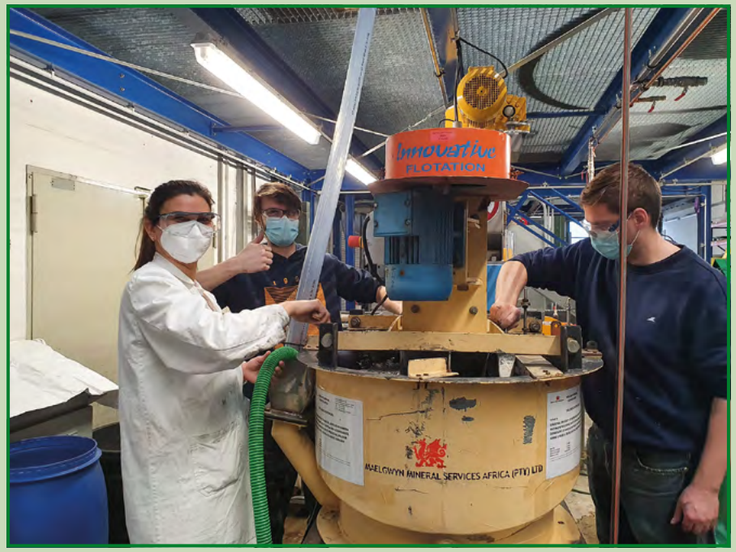

Bild 2:
Flotationsversuch zur Abtrennung einer sulfidischen Fraktion
© *TUC*

Bild 3:
Workshop mit Bürgern in Oker
© *TUC*

SABINE

Stahlwerksschlacke als Bindemittel für geotechnische Baustoffe

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 Sekundärrohstoffe in Baustoffen einzusetzen.

Die Zementherstellung ist für 5 bis 8 % der anthropogenen CO_2-Emissionen verantwortlich, besonders durch die Herstellung von Portlandzement. Alternative Bindemittel, in denen dieser 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 (Bild 1). Die Schlacken unterscheiden sich sowohl chemisch als auch mineralogisch deutlich.

Im Rahmen des Projekts SABINE wird untersucht, wie Stahlwerksschlacken 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.

Bisherige Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass vor allem kristalline Stahlwerksschlacken wie Elektroofenschlacke nicht so einfach zu aktivieren sind wie glasiger bzw. amorpher Hüttensand. Insbesondere konnten bislang keine vergleichbaren Festigkeiten erzielt werden. Die Verwendung in einem Konstruktionsbaustoff wie Beton ist damit nicht möglich. Es gibt jedoch eine Reihe von geotechnischen Einsatzbereichen, in denen bereits geringere Festigkeiten ausreichend sind:

- Ringspaltmassen bei maschinellen Tunnelvortrieben (Bild 2)
- Flüssigboden zum Verfüllen von Leitungsgräben
- Dichtwandmassen für unterirdische Abdichtungswände.

Zwischenergebnisse

Im Rahmen von SABINE wurde bisher vor allem die alkalische Aktivierbarkeit von Elektroofenschlacke in einem typischen Mörtelsystem untersucht. Verwendet wurden sowohl prozesstypische Schlacken mit einem hohen kristallinen Anteil als auch amorphe, durch Wassergranulation aufbereitete Schlacken. Letztgenannte sind bislang jedoch nicht industriell verfügbar.

Erwartungsgemäß entwickelten die untersuchten Mörtel mit amorpher Elektroofenschlacke mit bis zu 50 MN/m² im Referenzalter von 28 Tagen eine deutlich höhere Festigkeit als beim Einsatz kristalliner Schlacke, hier waren es bis zu ca. 20 MN/m². Bezüglich Frühfestigkeiten fällt auf, dass typischerweise bereits nach 7 Tagen bis zu ca. 90 % (amorphe Schlacke) bzw. bis zu ca. 65 % (kristalline Schlacke) bezogen auf die Referenzfestigkeit nach 28 Tagen erreicht werden. Es zeichnet sich damit ab, dass Elektroofenschlacke durchaus ein interessantes mögliches Anwendungsfeld für die im Rahmen des Projekts SABINE fokussierten geotechnischen Baustoffe darstellt.

Ausblick

Nach dem Nachweis der grundsätzlichen Machbarkeit wird es nun darum gehen, die Kombination von alkalischem Aktivator und gemahlener Schlacke zu optimieren. Konkret geht es darum, unter Berücksichtigung der Aspekte baustofftechnologischer Performance (vor allen in Bezug auf Festigkeit und Verarbeitbarkeit), Wirtschaftlichkeit und CO_2-Fußabdruck des Systems in Richtung einer praxistauglichen Lösung zu kommen. Hierbei ist unter anderem die Mahlfeinheit von zentraler Bedeutung. Denn einerseits nimmt mit steigender Mahlfeinheit die Reaktivität zu, andererseits steigen die Kosten stark an. Analoges gilt für den Aktivatoranteil.

Anschließend gilt es, das Material in Bezug auf die Umwelthygiene bei Kontakt mit Grundwasser zu untersuchen. Zu guter Letzt sollen Einbauversuche für den Anwendungsfall „Ringspaltmasse beim maschinellen Tunnelvortrieb" an einem großskaligen Demonstrator erfolgen, um einen plakativen Nachweis der Praxistauglichkeit zu erbringen.

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

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: Elektroofen für die schrottbasierte Stahlherstellung
Quelle: Georgsmarienhütte

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

SlagCEM

Portlandzement und Roheisen aus Stahlwerksschlacken

Ziel des Projekts SlagCEM ist eine möglichst vollständige Verwertung von Stahlwerksschlacken (SWS). Zum einen soll das enthaltene Eisen (bis zu 30 M% Fe_2O_3) zurückgewonnen, zum anderen ein hydraulisches Bindemittel erzeugt werden. Damit lassen sich Primärrohstoffe einsparen und Treibhausgasemissionen in der Zementindustrie reduzieren.

Im angewandten Verfahren wird das oxidisch vorliegende Eisen bei hohen Temperaturen (circa 1800 °C) im schmelzflüssigen Zustand zu metallischem Eisen reduziert und separiert. SlagCEM verfolgt das Ziel, diesen Hochtemperaturprozess (Bild 1, Bild 2) derart anzupassen, dass eine großtechnische Umsetzung ökonomisch realisierbar ist. Hierfür wird die chemische Zusammensetzung der SWS so modifiziert, dass Schmelztemperatur und Viskosität in einem technisch geeigneten Bereich liegen und das mineralische Produkt gute zementtechnische Eigenschaften aufweist.

Als Ausgangsmaterial dient Linz-Donawitz-Schlacke (LDS), deren chemische Zusammensetzung herstellungsbedingt Schwankungen unterliegt. Um die Heterogenität der LDS zu bewerten, wurde die Streuung der chemischen Zusammensetzung an 25 Einzelproben, die einen Monat Produktion repräsentieren, untersucht. Für die Untersuchungen im Rahmen des Projekts wurde eine größere Menge LDS mit repräsentativer Zusammensetzung eingelagert, um für alle experimentellen Untersuchungen das gleiche Ausgangsmaterial verwenden zu können.

Der Fokus der Untersuchungen im ersten Teil des Projekts lag auf den Auswirkungen stofflicher Anpassungen der LDS auf Schmelzverhalten und Viskosität sowie den hydraulischen Eigenschaften des Produkts. Eine Modifikation mit Al_2O_3 und/oder SiO_2 soll Schmelzpunkt und Viskosität der LDS nach Entzug des als Flussmittel wirkenden Fe_2O_3 niedrig halten. Erste Ergebnisse zeigen, dass eine vollständige Reduktion des Fe_2O_3 zu Eisen die Viskosität der LDS so stark erhöht, dass dem durch die Zugabe an Konditionierstoffen nicht in adäquatem Maß entgegengewirkt werden kann. Basierend auf theoretisch berechneten Viskositäten und Schmelzpunkten sowie anhand von Kennwerten für die chemische Zusammensetzung von gewöhnlichem Portlandzement (OPC), wurden Zielzusammensetzungen definiert und die LDS entsprechend modifiziert. Die auf diese Weise erzeugten modifizierten eisenarmen LDS wurden hinsichtlich ihres Schmelzverhaltens, ihres mineralischen Phasenbestandes und ihrer hydraulischen Reaktivität in einer Mischung mit 50% OPC untersucht.

Die Viskositäten der modifizierten LDS sowie von Referenzmischungen aus Al_2O_3, CaO, und SiO_2 wurden außerdem mittels aerodynamischer Levitation (ADL) bei unterschiedlichen Temperaturen bestimmt. Die Methode ermöglicht die Messung von Viskositäten zahlreicher Zusammensetzungen und die Eingrenzung von Viskositätsminima. Die Experimente zeigten sowohl eine gute Übereinstimmung der Viskositäten von realen LDS und Referenzen als auch eine starke Temperaturabhängigkeit.

Eine weitere Methode, die in SlagCEM Anwendung findet, ist die Laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) (Bild 3). LIBS ermöglicht ein Monitoring der Schlackenzusammensetzung während der Behandlung. Dafür werden während des Prozesses regelmäßig Proben der heißen Schlacke genommen und ihre chemische Zusammensetzung mittels LIBS analysiert. In der ersten Projektphase wurde eine Kalibrierung für das zu untersuchende Stoffsystem erstellt.

Ausblick

Eine industrielle Umsetzung des Verfahrens ist mit erheblichen Eingriffen in die Abläufe im Stahlwerk sowie hohen Investitionskosten verbunden. Sie kann jedoch gelingen, sofern sowohl die Qualität der Produkte als auch die Ergebnisse der ökobilanziellen Betrachtung des gesamten Recyclingprozesses positiv ausfallen. Eine ausreichende Qualität der separierten Eisenphase zur Rückführung in den Produktionsprozess und ausreichende Qualität des hergestellten Bindemittels für den Einsatz in der Zementindustrie sind hierbei wesentlich. Sind die Qualitätskriterien erfüllt, soll im Anschluss an das Projekt im Stahlwerk ein großtechnischer Demonstrator inklusive LIBS-Einheit integriert werden, mit dem der Prozess erprobt werden kann.

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

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 am Induktionsofen
Quelle: BAM

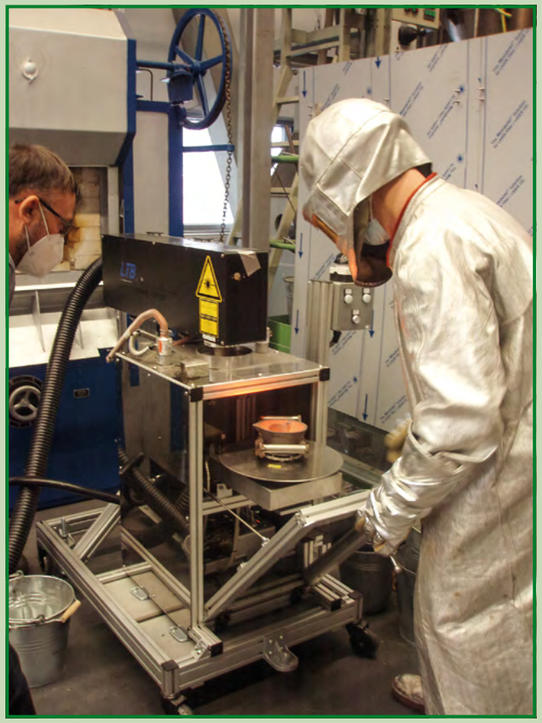

Bild 3: At Line LIBS Messung an heißer Probe
Quelle: BAM

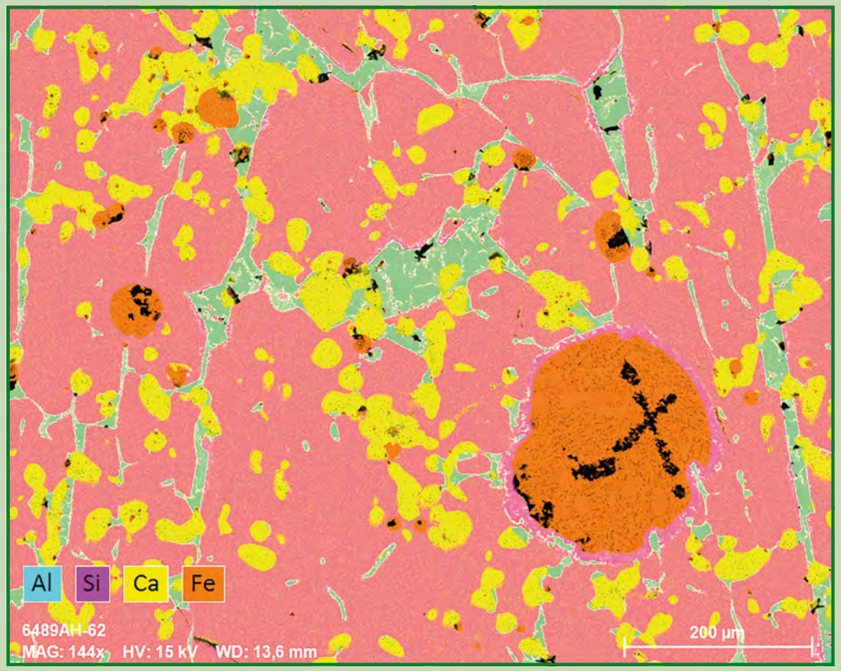

Bild 2:
EDX-Mapping der thermochemisch behandelten LD-Schlacke: grün Calciumaluminat; lachsfarben: Calciumsilikat
Quelle: BAM

TReMin

Vernetzungs- und Transfervorhaben

Zielstellung

Aufgabe des Begleitforschungsprojekts TReMin ist es, die Innovationskraft der BMBF-Förderrichtlinie ReMin zu stärken. Es vernetzt – bringt Forschung, Stakeholder und Politik zusammen – fördert den Wissenschaftstransfer, gibt Handlungsempfehlungen und kommuniziert durch breite Öffentlichkeitsarbeit die Forschungsergebnisse.

Zwischenergebnisse

Die Förderrichtlinie ReMin stellt die ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft in den Bereichen „Bauen und mineralische Stoffkreisläufe“ als Teil der BMBF-Strategie „Forschung für nachhaltige Entwicklung – FONA“ in den Mittelpunkt.

Bau- und Abbruchabfälle als sekundäre Rohstoffquellen für Gesteinskörnungen bzw. R-Betone bilden das Schwerpunktthema der insgesamt 16 forschenden Verbundvorhaben. Weitere Themen sind u.a. die Verwendung von Schlacken aus der Roheisen- und Stahlerzeugung in der Zementindustrie, Müllverbrennungs-Aschen, die Substitution von Naturgips durch recycelten Gips sowie Bergbaureststoffe als Ressource für Baustoffe (Bild 1, 2).

Das Thema Bauen reicht von Ressourcenplänen für den kommunalen Tiefbau bis zur Wiederverwendung kompletter Betonbauteile.

Auf der Webseite www.remin-kreislaufwirtschaft.de werden die Forschungsvorhaben neben aktuellen Informationen vorgestellt. Die Projektdatenblätter können dort heruntergeladen werden.

TReMin fördert mit Konferenzen und Workshops zu ausgewählten Themen rund um den Förderschwerpunkt den wissenschaftlichen Austausch der ReMin-Verbünde und führt diese zusammen (Abb. 3). Zudem vertritt es die Fördermaßnahme auf für die Branche wichtigen Veranstaltungen. Für die Sicht von außen ist ein Begleitkreis gebildet worden, dem wichtige Stakeholder aus Deutschland und Österreich angehören. Der Begleitkreis nimmt an den ReMin-Veranstaltungen teil und unterstützt die Begleitforschung bei vernetzenden Maßnahmen.

Im Rahmen der fachlichen Vernetzung außerhalb der Fördermaßnahme wurde zudem der Kontakt zur Dialogplattform Recyclingrohstoffe der Deutschen Rohstoffagentur DERA aufgenommen. Deren Arbeitskreis „Industrieminerale“ vereint die Unterarbeitskreise „Baurohstoffe“, „Gips“ und „Industrielle Reststoffe“. Die Arbeits- und Unterarbeitskreise analysieren im Austausch mit Forschung, Industrie und Verbänden aktuelle Barrieren für den Einsatz von Sekundärrohstoffen.

Sie erarbeiten auf dieser Basis in interaktiven Online-Formaten Enabler und Handlungsempfehlungen. TReMin beteiligt sich aktiv an diesen Formaten und konnte zur Kommentierung der Ausarbeitungen beitragen. Standpunkte der ReMin-Verbünde zu Hemmnissen und Lösungsansätzen – Ergebnisse eines Fragebogens der Begleitforschung zu Beginn der Fördermaßnahme – lieferten einen konkreten Beitrag.

Auch besteht eine enge Vernetzung mit dem Deutschen Forschungsnetzwerk Rohstoffe GERRI (German Resource Research Institute). Die Inhalte der ReMin-Fördermaßnahme wurden des Weiteren auf einem Treffen des vom Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) geförderten Projekts „Recy Bau“ sowie auf der Jahrestagung 2022 der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft (DMG) vorgestellt.

Darüber hinaus wurde im Auftrag des BMBF das Thema „faktische und rechtliche Hemmnisse bei der Umsetzung von Forschungsergebnissen in die Praxis“ bearbeitet. Die Ergebnisse fließen in die vom Ministerium abschließend vorzunehmende Gesamtbewertung des Förderschwerpunkts „ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft“ ein.

Ausblick

TReMin wird für eine enge Vernetzung der geförderten Verbünde und zum erweiterten fachlichen Austausch Cluster-Workshops zu übergeordneten Fragestellungen veranstalten. Eine Umfrage zeigt, dass die Themen „Regularien der Kreislaufwirtschaft Bau“ sowie „Störstoffe, Kontaminationen und Grenzwerte“ bei den Verbünden auf großes Interesse stoßen.

Projektlaufzeit
1. 1. 2021 – 31. 12. 2024

Kontakt
Technische Universität Clausthal
CUTEC Clausthaler Umwelttechnik
Forschungszentrum
Leibnizstraße 23
38678 Clausthal-Zellerfeld
Leitung:
Prof. Dr. mont. Dr. rer. nat. Michael Fischlschweiger
Koordinator: Dipl.-Ing. Andre Bertram
+49 (0)5323 72-6201
andre.bertram@cutec.de

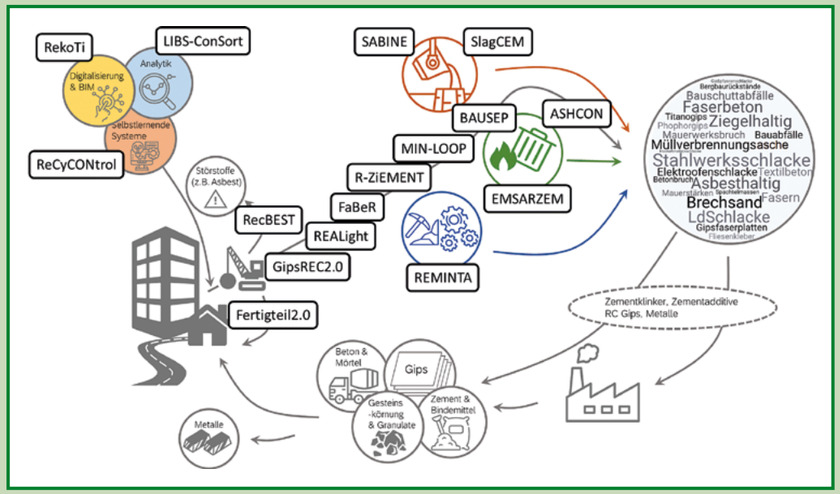

Bild 1:
ReMin-Verbünde im Kontext der Kreislaufwirtschaft
Quelle: TReMin

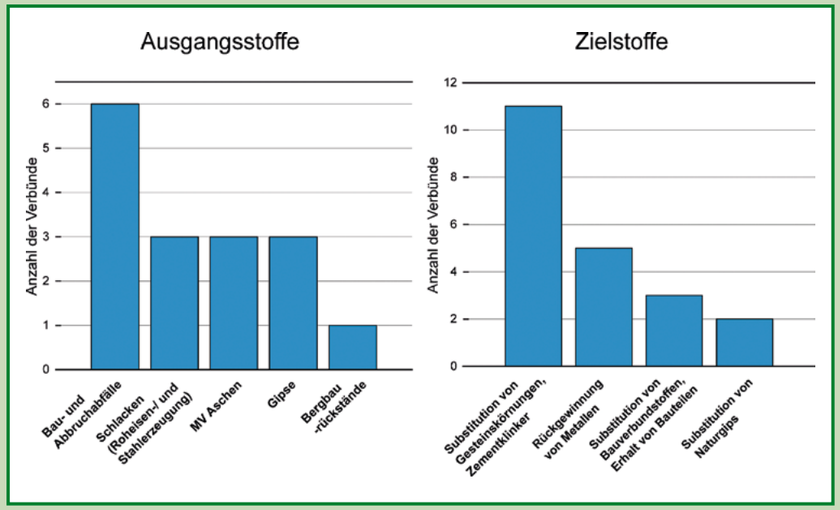

Bild 2:
Ausgang- und Zielrohstoffe der ReMin-Forschung
Quelle: TReMin

Bild 3:
Auftaktveranstaltung der BMBF-Fördermaßnahme ReMin
Foto: Andre Bertram, CUTEC

Kontaktdaten der Verbundpartner

Dipl.-Ing. Jörg-Michael Bunzel (l.), Leiter des Projekts GipsRec 2.0, erklärt das Gips-Recycling der MUEG Mitteldeutsche Umwelt- und Entsorgung GmbH.

Treffen des Projekts BAUSEP im Museum Mineralogia der Mineralogischen Staatssammlung München. Dr. Amanda Günther, LMU München, und Projektleiter Dr. Sebastian Dittrich, Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP, betrachten Proben.

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

REMEX GmbH
Am Fallhammer 1
40221 Düsseldorf
Dr. Rudolf Diegel
+49 (0)211 171600
rudolf.diegel@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
Werthauserstraße 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
Fachgebiet für Digitales Gestalten (DDU)
TU Darmstadt
Fachbereich Architektur
El-Lissitzky-Straße 1
64287 Darmstadt
Prof. Dr.-Ing. Oliver Tessmann
+49 (0)6151 16 22483
tessmann@dg.tu-darmstadt.de

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-Sepehri
+49 (0)151 17552601
marc.gille@thing-it.com

FARO Europe GmbH
Lingwiesenstraße 11/2
70825 Korntal-Münchingen
Dr. Denis Wohlfeld
+49 (0)7150 9797 462
denis.wohlfeld@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

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

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

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

Innogration 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
Valentin Heizinger
+49 (0)8762 733 155
valentin.heizinger@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
Mühleneschweg 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
rtexter@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 Secrieru
Dr.Egor.Secrieru@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
Troplowitzstraße 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
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.-Ing. Andre Bertram
E-Mail: andre.bertram@cutec.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
Rückseite: Eugen Major, TU Clausthal
S. 38: Andre Bertram, CUTEC
S. 50: ©Countrypixel – stock.adobe.com

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

Stand Juni 2023
1. Auflage, 500 Stück

www.remin-kreislaufwirtschaft.de

ReMin-Auftaktveranstaltung in Clausthal-Zellerfeld.