

## Schlussbericht zum Verbundprojekt (Kurzbericht)

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

Förderkennzeichen: 033R257

Autorinnen & Autoren: Alexander Schnell<sup>1</sup>, Katrin Rübner<sup>2</sup>, Constanze Müller<sup>2</sup>, Julia Seher<sup>2</sup>, Anette Müller<sup>3</sup>, Steffen Liebezeit<sup>3</sup>, Jacob Fenner<sup>4</sup>, Falk Martin<sup>5</sup>, Nicole Pniok<sup>6</sup>, Bianca Dreisow<sup>6</sup>, Leonhard Köhler<sup>7</sup>, Michael Schnittker<sup>8</sup>, Nico Schumann<sup>9</sup>, Michel Kool<sup>10</sup>

<sup>1</sup> Bauhaus-Universität Weimar

<sup>2</sup> Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

<sup>3</sup> IAB - Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH, Weimar

<sup>4</sup> Technische Universität Clausthal, Institut für Aufbereitung, Recycling und Kreislaufwirtschaftssysteme (IFAD), Clausthal-Zellerfeld

<sup>5</sup> Beton und Naturstein Babelsberg GmbH, Potsdam

<sup>6</sup> Opus Denkmalpflege GmbH, Berlin

<sup>7</sup> IBU-tec advanced materials AG, Weimar

<sup>8</sup> Sievert Baustoffe SE & Co KG, Osnabrück

<sup>9</sup> T.B.R. Teltower Baustoffrecycling GmbH, Teltow

<sup>10</sup> HanseGrand Klimabaustoffe e.K., Selsingen

Bauhaus-Universität Weimar (BUW)

Professur Werkstoffe des Bauens

Coudraystraße 11, 99423 Weimar

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Horst-Michael Ludwig

Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Alexander Schnell [alexander.schnell@uni-weimar.de](mailto:alexander.schnell@uni-weimar.de)

Verbundpartner	Art der Einrichtung
Bauhaus-Universität Weimar ( <b>BUW</b> ) - Koordinator -	Hochschule
Institut für angewandte Bauforschung Weimar gGmbH ( <b>IAB</b> )	Forschungseinrichtung
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung ( <b>BAM</b> )	Forschungseinrichtung
Technische Universität Clausthal, IFAD ( <b>IFAD</b> )	Hochschule
T.B.R. Teltower Baustoffrecycling GmbH ( <b>TBR</b> )	Unternehmen [KMU]
Mendiger Basalt Schmitz Naturstein GmbH & Co.KG ( <b>MEN</b> )	Unternehmen [KMU]
Beton und Naturstein Babelsberg GmbH ( <b>BNB</b> )	Unternehmen [KMU]
Sievert Baustoffe SE & Co KG ( <b>Siev</b> )	Großunternehmen
Heidemann Recycling Thüringen GmbH & Co. KG ( <b>HRT</b> )	Unternehmen [KMU]
Opus Denkmalpflege GmbH ( <b>OPUS</b> )	Unternehmen [KMU]
IBU-tec advanced materials AG ( <b>IBU</b> )	Unternehmen [KMU]
HanseGrand Klimabaustoffe e.K. ( <b>Hanse</b> )	Unternehmen [KMU]

Berichtszeitraum: 01.02. 2021 bis 31.01. 2024

*Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.*

# **1 Kurzbericht**

## **1.1 Ursprüngliche Aufgabenstellung und Anknüpfung an wissenschaftlichen und technischen Stand**

Zielstellung des Projekts REALight war die Herstellung von Leichtgranulaten (lightweight aggregates, LWA) aus mineralischen Bau- und Abbruchabfällen auf einer Referenzanlage unter Erweiterung der Technologie für die Nutzung weiterer Einsatzstoffe und zur Gipsrückgewinnung. Dies ist Voraussetzung für die Übertragung der Produkt- und Verfahrensidee in die Praxis und den Nachweis der Sulfatabtrennung und -rückgewinnung aus gipshaltigem Material. Es werden Untersuchungen zur Verbreiterung der Rohstoffbasis durch Einkopplung spezifischer Stoffströme durchgeführt. Im Ergebnis soll das zu einer Reduktion des Blähmittelbedarfs und einer Absenkung der Brenntemperatur führen. Die Herstellung ausreichender Mengen an Leichtgranulaten für die umfassende Charakterisierung nach Norm und die Praxiserprobung in bekannten Anwendungen und neuen Einsatzfeldern war ebenfalls Gegenstand des Projekts.

## **1.2 Ablauf des Vorhabens**

Das Verbundprojekt wurde durch die Bauhaus-Universität Weimar koordiniert. Am Projekt waren 12 Partner aus verschiedenen Bereichen der Baustoffherstellung und -anwendung, Abfallaufbereitung, Verfahrenstechnik sowie Forschung und Entwicklung beteiligt. Die Leichtgranulate wurden in einer Pilotanlage der IAB - Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH hergestellt. Untersuchungen zur Anwendung der leichten Gesteinskörnungen erfolgten bei den einzelnen Projektpartnern in hydraulisch gebundenen und ungebundenen Systemen. Die Einbeziehung von mehreren kleinen und mittelständischen Unternehmen trägt unmittelbar dazu bei, den Innovationsgehalt des Projekts in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit, die Nutzung und die Eignung der Produkte für marktfähige Anwendungen nachzuweisen. Gleichzeitig geben die Unternehmen Anforderungen an die Eigenschaften der Leichtgranulate vor. Dazu wurden in das Projekt nicht nur zwei unterschiedliche Recyclingspezialisten einbezogen, sondern auch vier Unternehmen, die jeweils für die unterschiedlichen Anwendungsgebiete (Siehe 1.3) stehen. Das Projekt war in 12 Arbeitspakete gegliedert, die aufgrund ihrer Komplexität ineinandergriffen. Das Verbundprojekt kann auf der Basis des wissenschaftlich-technischen Innovations-gehalts in folgende Schwerpunkte unterteilt werden:

- Rohstoffassessment zur Erweiterung der Rohstoffbasis über Bau- und Abbruchabfälle hinaus einschließlich Vorbehandlung und Aufbereitung
- Herstellungstechnologie der Leichtgranulate in der Pilotanlage
- Applikation der Granulate in Leichtbetonen, Mörteln, Mörteltrockenmischungen und ungebundenen Systemen

- Sulfatentfrachtung von gipshaltigen Inputmaterialien und Erzeugung von REA-Gips

Das Projekt wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Fördermaßnahme „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Bauen und Mineralische Stoffkreisläufe (ReMin)“ als Teil der BMBF Strategie „Forschung für nachhaltige Entwicklung – FONA“ gefördert.

### **1.3 Wesentliche Ergebnisse und Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen**

Die Eignung von heterogenem ziegelhaltigen Bauschutt als Ausgangsstoff zur Herstellung von leichten Gesteinskörnungen in einem mehrstufigen Prozess wurde im Labor und im Pilotmaßstab nachgewiesen. Das Projekt REALight stellt einen weiteren Schritt für das Scale-up der Technologie dar. Erstmals wurde auch die Möglichkeit der Sulfatentfrachtung näher untersucht. Gleichzeitig wird es durch den Einsatz der in einer Pilotanlage hergestellten großen Materialmengen möglich, in einem umfangreicheren Prüfprogramm die Leistungsbeständigkeit als leichte Gesteinskörnung zu untersuchen. Gleichzeitig können vielfältige Anwendungen und Demonstrationen in gebundenen und ungebundenen Anwendungen erfolgen. Die Einbeziehung neuer mineralischer Reststoffe als Ausgangsstoffe oder Blähmittel für den Prozess kann bei positiven Ergebnissen zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Technologie beitragen. Die Eignung der LWA wurde im Rahmen von REALight für alle angezielten nachfolgenden Anwendungsgebiete nachgewiesen:

- Trockenmörtel- und Mörtelsysteme
- Leicht- und Infraleichtbetone (ILC)
- Leichte Steinergänzungsmörtel für die Denkmalpflege
- Ungebundene Anwendungen für leichte Körnungen

In allen diesen Einsatzbereichen besteht im Hinblick auf eine nachhaltigere Produktion der Druck, dass natürliche oder aus natürlichen Rohstoffen erzeugte Körnungen, wie Bims und andere Vulkangesteine sowie hauptsächlich Blähton, ersetzt werden müssen. Geeignete leichte Gesteinskörnungen auf Sekundärrohstoffbasis sind mit Ausnahme von Blähglas, das aber nicht für alle Anwendungen per se geeignet ist, nicht am Markt vorhanden.

Im Rahmen des Verbundprojekts erfolgte eine enge Zusammenarbeit zwischen den Industriepartnern und den 4 beteiligten Forschungseinrichtungen Bauhaus-Universität Weimar, IAB - Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) und der Technischen Universität Clausthal mit dem Institut für Aufbereitung, Recycling und Kreislaufwirtschaftssysteme (IFAD).

## Schlussbericht zum Verbundprojekt

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

Förderkennzeichen: 033R257

Autorinnen & Autoren: Alexander Schnell<sup>1</sup>, Katrin Rübner<sup>2</sup>, Constanze Müller<sup>2</sup>, Julia Seher<sup>2</sup>, Anette Müller<sup>3</sup>, Steffen Liebezeit<sup>3</sup>, Jacob Fenner<sup>4</sup>, Falk Martin<sup>5</sup>, Nicole Pniok<sup>6</sup>, Bianca Dreisow<sup>6</sup>, Leonhard Köhler<sup>7</sup>, Michael Schnittker<sup>8</sup>, Nico Schumann<sup>9</sup>, Michel Kool<sup>10</sup>

<sup>1</sup> Bauhaus-Universität Weimar

<sup>2</sup> Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

<sup>3</sup> IAB - Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH, Weimar

<sup>4</sup> Technische Universität Clausthal, Institut für Aufbereitung, Recycling und Kreislaufwirtschaftssysteme (IFAD), Clausthal-Zellerfeld

<sup>5</sup> Beton und Naturstein Babelsberg GmbH, Potsdam

<sup>6</sup> Opus Denkmalpflege GmbH, Berlin

<sup>7</sup> IBU-tec advanced materials AG, Weimar

<sup>8</sup> Sievert Baustoffe SE & Co KG, Osnabrück

<sup>9</sup> T.B.R. Teltower Baustoffrecycling GmbH, Teltow

<sup>10</sup> HanseGrand Klimabaustoffe e.K., Selsingen

Bauhaus-Universität Weimar (BUW)

Professur Werkstoffe des Bauens

Coudraystraße 11, 99423 Weimar

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Horst-Michael Ludwig

Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Alexander Schnell [alexander.schnell@uni-weimar.de](mailto:alexander.schnell@uni-weimar.de)

Verbundpartner	Art der Einrichtung
Bauhaus-Universität Weimar ( <b>BUW</b> ) - Koordinator -	Hochschule
Institut für angewandte Bauforschung Weimar gGmbH ( <b>IAB</b> )	Forschungseinrichtung
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung ( <b>BAM</b> )	Forschungseinrichtung
Technische Universität Clausthal, IFAD ( <b>IFAD</b> )	Hochschule
T.B.R. Teltower Baustoffrecycling GmbH ( <b>TBR</b> )	Unternehmen [KMU]
Mendiger Basalt Schmitz Naturstein GmbH & Co.KG ( <b>MEN</b> )	Unternehmen [KMU]
Beton und Naturstein Babelsberg GmbH ( <b>BNB</b> )	Unternehmen [KMU]
Sievert Baustoffe SE & Co KG ( <b>Siev</b> )	Großunternehmen
Heidemann Recycling Thüringen GmbH & Co. KG ( <b>HRT</b> )	Unternehmen [KMU]
Opus Denkmalpflege GmbH ( <b>OPUS</b> )	Unternehmen [KMU]
IBU-tec advanced materials AG ( <b>IBU</b> )	Unternehmen [KMU]
HanseGrand Klimabaustoffe e.K. ( <b>Hanse</b> )	Unternehmen [KMU]

Berichtszeitraum: 01.02. 2021 bis 31.01. 2024

*Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.*

## Inhalt

1	Ergebnisse der durchgeführten Arbeiten .....	3
1.1	Rohstoffassessment zur Erweiterung der Rohstoffbasis .....	3
1.2	Herstellung der Leichtgranulate in der Pilotanlage .....	6
1.2.1	Parameter der Pilotanlage .....	6
1.2.2	Rohdichten der hergestellten leichten Gesteinskörnungen .....	10
1.2.3	Ergebnisse zum Prozesswärmeverbrauch .....	10
1.3	Sulfatentfrachtung und Gipsrückgewinnung .....	12
1.4	Anwendung der Leichtgranulate .....	18
1.4.1	Anwendung der Leichtgranulate in Leichtbetonen .....	19
1.4.2	Anwendung der Leichtgranulate in Mörteln .....	21
1.4.3	Anwendung der Leichtgranulate in ungebundenen Systemen .....	24
2	Ergänzungen zu den inhaltlichen Ergebnissen .....	25
2.1	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	25
2.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	25
2.3	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse ....	26
2.4	Während des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte anderer Stellen	27
2.5	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse .....	27
	Quellen .....	30

# 1 Ergebnisse der durchgeführten Arbeiten

## 1.1 Rohstoffassessment zur Erweiterung der Rohstoffbasis

Als Rohstoffe wurden bisher ungenutzte oder auf niedrigem Niveau wiederverwendete mineralische Bauabfälle, wie gemischter Mauerwerkbruch und Ziegelbruch, eingesetzt. Um die Rohstoffbasis zu verbreitern, wird in einem Rohstoffassessment die Eignung anderer mineralischer Abfälle und Rohstoffe untersucht. Federführend wird das Rohstoffassessment durch das Institut für Aufbereitung, Recycling und Kreislaufwirtschaftssysteme (IFAD) der Technischen Universität Clausthal bearbeitet. Die Bearbeitung gliederte sich in zwei Phasen. In einer ersten Phase wurden über 35 Bau- und Abbruchabfälle sowie industrielle Rückstände untersucht. Dabei wurde sowohl die Eignung als Reifraktion als auch in diversen Mischungen untersucht. In Phase 2 fiel der Fokus der Betrachtung auf Eisenhüttenschlacken. Neben Bauschutt, Ziegel- und Betonbruchfraktionen unterschiedlicher Qualitäten und Körnungsfractionen wurden auch Brechsande und Filter-/ Füllerstäube aus Natursteinbrüchen wie Kalk, Grauwacke, Tuff, Rhyolith und Dolomit sowie eisenhaltiger Schlämme und Rückstände aus Aluminiumbadschmelzen in die Untersuchungen einbezogen. Die Untersuchungen zum Blähverhalten wurden am IAB Weimar im Erhitzungsmikroskop (EMI) und im IFAD im Muffelofen durchgeführt. Die EMI – Versuche ergaben für Grauwacke und Rhyolith gute Bläheigenschaften.

Die Brennversuche im Ofen wurden in einem elektrisch beheizten Hochtemperaturofen durchgeführt. Die Granulate wurden bei 20 °C in mit Kaolin als Trennmittel ausgekleidete feuerfeste Pfannen gelegt und in den Ofen gestellt. Über die Ofensteuerung wurden entsprechende Aufheizraten und Haltezeiten festgelegt. Zunächst wurde innerhalb von 3 Minuten auf 100 °C aufgeheizt mit 5 Minuten Haltezeit auf 100 °C. Danach wurde in 5 Minuten auf 500 °C mit anschließenden 5 Minuten Haltezeit geheizt. Anschließend wurde der Aufheizvorgang auf Maximaltemperatur (1000 °C, 1050 °C, 1100 °C, 1150 °C und 1200 °C) mit einer Aufheizrate von 50 °C/min fortgesetzt. Mit Erreichen der Maximaltemperatur wurden die Proben 5 Minuten auf der entsprechenden Temperatur gehalten. Die darauffolgende Abkühlrate betrug 50 °C/min. Bei 800 °C wurden die Proben aus dem Ofen entnommen und bei Raumtemperatur weiter abgekühlt.

Bei den Brennversuchen ohne Zugabe von Blähmitteln liefert der reine Rhyolith-Brechsand die besten Ergebnisse. Nach dem Brennen im Ofen konnte ein Blähwert von 1,9 und eine Rohdichte der Granulate von 0,9 g/cm<sup>3</sup> erreicht werden (Abbildung 1). Eine Referenzcharge mit Ziegelmehl kam ohne den Einsatz von Blähmittel lediglich zu einem Blähwert von 1,5. Aufgrund der Art der Versuchsdurchführung im Muffelofen sind die Granulate zur oberen Seite hin stärker gebläht. Ursache dafür sind die ruhende Lage und die fehlende, in Drehrohren vorherrschende, Umwälzbewegung. Hier sind weitere Untersuchungen im Labor-Drehrohrofen zur Bestätigung der

Ergebnisse notwendig. Die Ergebnisse der Brennergebnisse mit Granulaten aus Rhyolith-Brechsand bestätigen die Ergebnisse aus dem Erhitzungsmikroskop und die Aussagen in der Literatur zur Eignung magmatischer Gesteine für die Herstellung von Leichtgranulaten ohne Zugabe von Blähmitteln wie Siliziumcarbid (SiC).



Abbildung 1: Brennergebnisse Rhyolith (Foto: IFAD)

Die Eignung von Eisenschlamm als mögliches Blähhilfsmittel konnte im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen nicht nachgewiesen werden, es verschlechterten sich sowohl die Granulier- als auch die Brennergebnisse.

Darüber hinaus wurden diverse Elektroofenschlacken (EO-Schlacke), Konverterschlacken (LD-Schlacken) und Schlacken aus der Müllverbrennung (MV-Schlacke) untersucht. Die Relevanz dieser Stoffströme wird insbesondere im Hinblick auf die anfallenden Mengen und die derzeitige Verwertung ersichtlich. So fallen jährlich etwa 16 Mt Stahlwerksschlacke an. 15 % davon werden in Zwischenlagern verwahrt und 12 % deponiert. Darüber hinaus fallen jährlich 4,7 Mt metallfreie Restschlacken aus der Hausmüllverbrennung an. Davon werden derzeit 64 % als Versatz auf Deponien verwendet und 19 % sind aktuell nicht verwertbar. Die im Rahmen des Rohstoffassessment verwendeten Schlacken wurden durch das FEhS – Institut für Baustoffforschung e.V. zur Verfügung gestellt. Vor allem die Stahlwerksschlacken zeichneten sich durch Ihre hohe Festigkeit aus. Wobei die LD-Schlacke die EO-Schlacke noch übertraf. Im Vergleich mit den bisher untersuchten Reststoffen lassen sich die Stahlwerksschlacken eher im Bereich der Flussmittel verorten. Die MV-Schlacke ähnelt in ihrer Zusammensetzung dem von Riley vorgegebenen Bereich des optimalen Blähverhaltens für Tone (Siehe dazu auch Abbildung 2 und Tabelle 1).

Die Stahlwerksschlacken ließen, herkunftsbedingt, hohe Eisen- und Calciumoxidgehalte in Kombination mit geringen  $Al_2O_3$ -Frachten erkennen. Problematisch bei den erhaltenen Proben sind die Chromgehalte welche in Teilen bis Faktor 10 über dem als Referenz gewählten Grenzwert für Chrom in Stahlwerksschlacken lagen [1].

Entsprechend der bisherigen Versuchsreihen erfolgten auch die Brennergebnisse mit den Schlacken entlang der Temperaturstufen von 1050 °C bis hin zu 1200 °C. Darüber hinaus wurden die Versuche mit entsprechenden Blähmittelgehalten von 1,5 % und 3 % wiederholt (siehe Abbildung 3). Die LD-Schlacke verhielt sich bis 1100 °C formstabil. Ab 1150 °C begann das Zerfließen des Granulates zur Halbkugel und

darüber hinaus zerfloss das Granulat komplett. Die EO-Schlacke war ebenfalls formstabil. Bei Temperaturen von 1100 °C und darüber konnte ein leichtes Schrumpfen des Granulates beobachtet werden. Es ist davon auszugehen, dass die gewählten Temperaturen für die EO-Schlacke zu niedrig waren. Der Einsatz von SiC als Blähmittel erbrachte bei keiner der beiden Stahlwerksschlacken einen positiven Effekt. Die MV-Schlacken waren lediglich bei 1050 °C formstabil. Ab 1100 °C begannen die Granulate, in Abhängigkeit der SiC-Gehalte, zusammen zu sintern bzw. vollständig zu zerfließen. Ohne SiC entstand kein Bläheeffekt, die Granulate zerflossen lediglich.

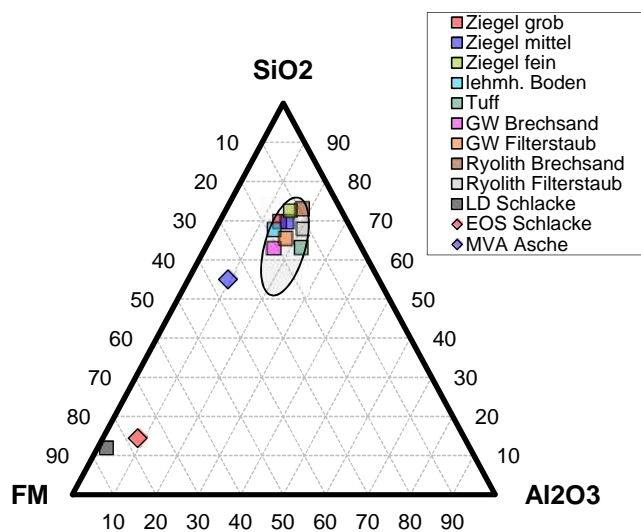


Abbildung 2: Dreistoffdiagramm mit Blähbereich nach Riley und White [2, 3]

Tabelle 1: Charakterisierung der Schlacken in ihrer Zusammensetzung zur Einordnung im Dreistoffdiagramm

	LDS	EOS	MVA
SiO <sub>2</sub>	12 – 13 %	7,9 – 14,4 %	55 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,9 – 2,4 %	4,4 – 8,5 %	9,5 %
FM	84,6 – 87,1 %	87,7 – 90,1 %	35,5 %

In der Mischung (ca. 20 % LD-Schlacke) mit Betonbruch, Ziegelmehl und 1,5 % SiC zeigten die Granulate ein starkes Blähverhalten. Ohne SiC lag aber auch hier kein Bläheeffekt vor. Die Akquise größerer Mengen des verwendeten Recycling-SiC war leider nicht möglich. Das entsprechende Unternehmen wurde inzwischen verkauft und liquidiert.

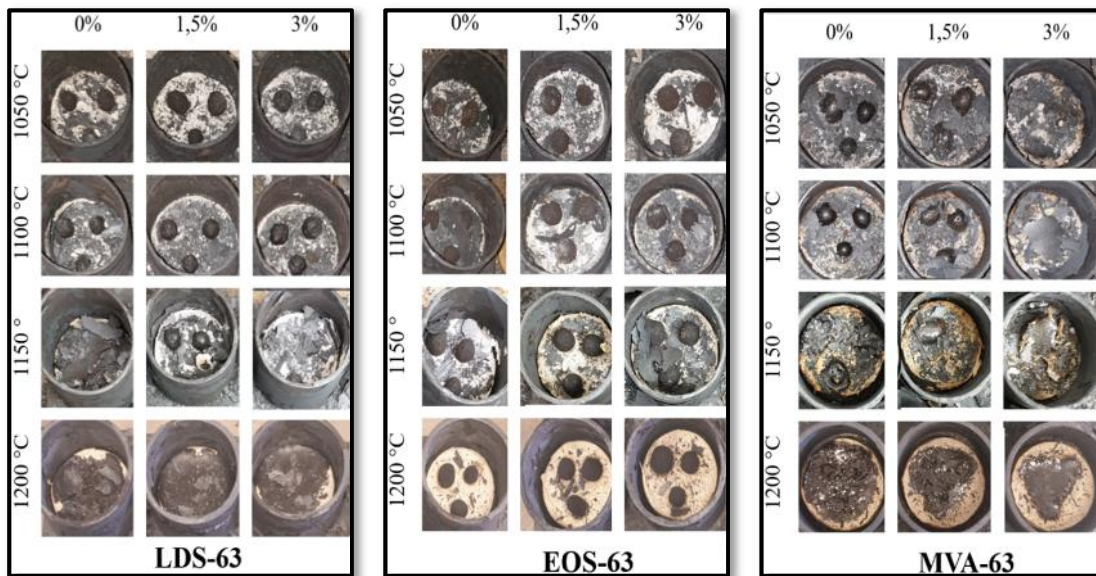


Abbildung 3: Granulate nach dem Brennen (v.l.n.r. LD-Schlacke, EO-Schlacke, MV-Schlacke) (Foto IFAD)

## 1.2 Herstellung der Leichtgranulate in der Pilotanlage

### 1.2.1 Parameter der Pilotanlage

Im Technikum der IAB Weimar gGmbH stehen für die Aufbereitung des Rohmaterials Mauerwerkbruch ein Backenbrecher, eine Chargenkugelmühle und ein Granulierteller zur Verfügung (Abbildungen 4 bis 6). Das ausgleichsfeuchte Rohmaterial, das von Recyclingunternehmen oder von Kunden zur Verfügung gestellt wird, wird mit Hilfe eines Backenbrechers auf Partikelgrößen  $< 10 \text{ mm}$  zerkleinert.



Abbildung 4: Backenbrecher (Brechmaulbreite  $0,6 \times 0,3 \text{ m}$ , Spaltweite  $> 0,01 \text{ m}$ ) (Foto IAB)



Abbildung 5: Chargenkugelmühle (Mahlräumvolumen 500 Liter) (Foto: IAB)



Abbildung 6: Granulierteller (Durchmesser 1 m) (Foto: IAB)

Der Drehrohrföfen für die thermische Behandlung der Grüngranulate hat eine Länge von 6 m und eine lichte Weite von 0,6 m. Drehzahl und Neigung des Rohres sind in bestimmten Bereichen einstellbar. Bei der Leichtgranulatherstellung wird der Ofen bei einer Brenntemperatur von 1200 °C betrieben. Die Verweilzeit des Materials im Ofen beträgt insgesamt ca. 25 min, davon etwa 6 min bei Temperaturen > 1100 °C (Abbildung 8). Das reicht für die Ausschöpfung des Blähpotenzials nicht aus. Deshalb mussten die Granulate einer zweiten und zum Teil einer dritten thermischen Behandlung unterzogen werden.



Abbildung 7: Granulate am Ofenauslass (Foto: IAB)

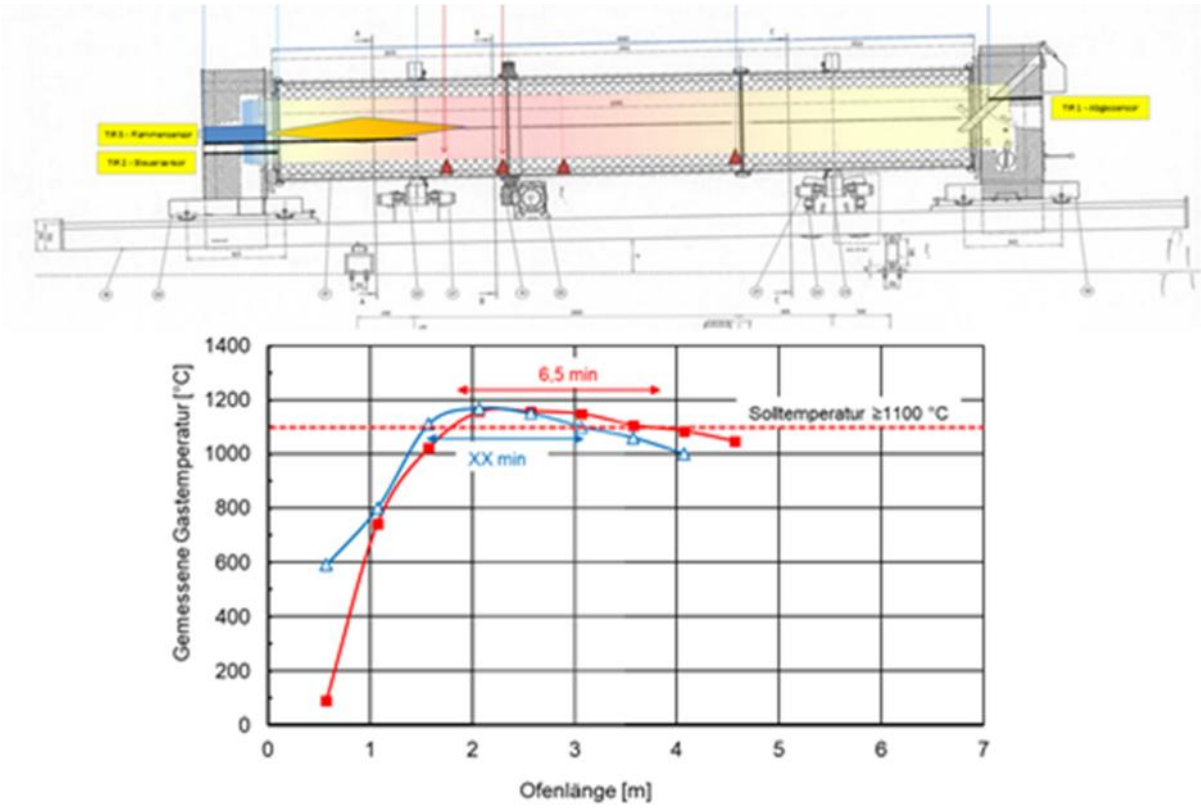


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Ofens und der entlang der Ofenlängsachse gemessenen Temperaturen

Der Ofen wird mit Erdgas beheizt. Tests zur Verwendung von Wasserstoff als Energieträger sind vorgesehen, jedoch nicht Teil des Projekts REALight. Der Ofen ist mit den erforderlichen Anlagen zur Rauchgasreinigung ausgerüstet.

Im Rahmen des Projekts REALight wurden die erforderlichen Mengen an Leichtgranulaten in mehreren einwöchigen Brennversuchen hergestellt. Diese dienten dabei auch der Bestätigung der Laborversuchsergebnisse hinsichtlich der erreichbaren Produktqualitäten und der Realisierung der Sulfatentfrachtung. Erste technologische Parameter des Brennprozesses wurden ermittelt und größere Mengen an leichten Gesteinskörnungen für Anwendungsversuche hergestellt (Abbildung 9).



Abbildung 9: Leichte Gesteinskörnungen aus Mauerwerkbruch nach dem Brand (Foto: IAB)

Als Ergebnis der Brennkampagne konnten Materialien für die Untersuchungen bei den Anwendungspartnern und für Laboruntersuchungen an der BAM bereitgestellt werden. Prozessbedingt war es jedoch nicht möglich, die feineren Körnungen der Korngruppen kleiner als 4 mm (Einsatz in Mörteln bei Projektpartnern OPUS und Sievert) in ausreichender Menge bereitzustellen. Daher wurde hier auf gebrochene Körnungen, hauptsächlich hergestellt aus dem Überkorn > 16 mm zurückgegriffen. Abbildung 10 zeigt verschiedene Chargen dieser Körnungen nach dem Brechen.

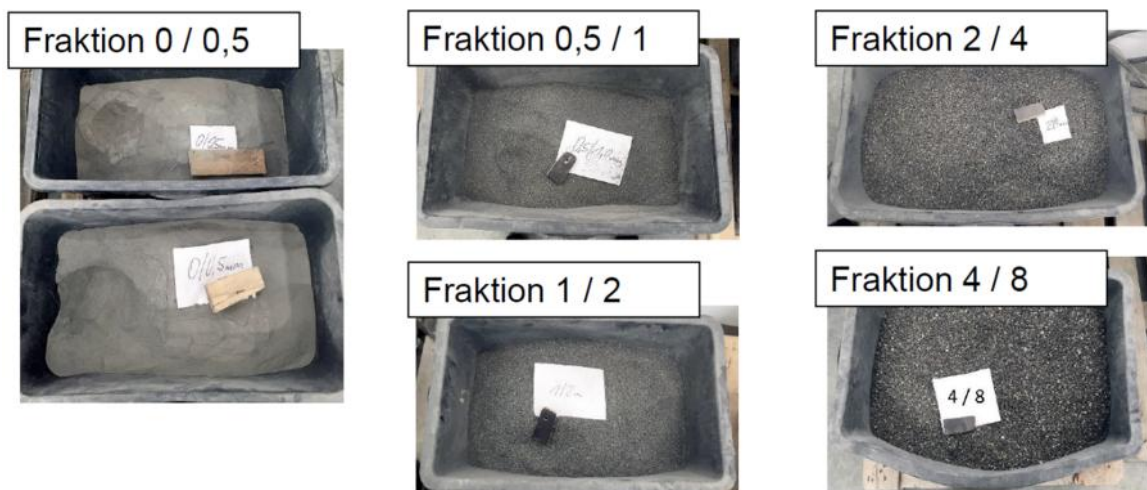


Abbildung 10: Gebrochene Leichtgranulate verschiedener Fraktionen (Foto IAB)

### 1.2.2 Rohdichten der hergestellten leichten Gesteinskörnungen

Die Rohdichte ist das wichtigste Qualitätsmerkmal von leichten Gesteinskörnungen. In der Tabelle 1 sind diese für die im Labor- bzw. im Pilotmaßstab aus Ziegel- bzw. Mauerwerkbruch hergestellten leichten Gesteinskörnungen den Werten für am Markt erhältliche Produkte gegenübergestellt. Bei letzteren Werten wurde auf Firmenangaben zurückgegriffen oder eigene Messungen durchgeführt. Die Rohdichten der im Drehrohrofen hergestellten leichten Gesteinskörnungen aus Mauerwerkbruch bewegen sich zwischen 600 kg/m<sup>3</sup> und 1800 kg/m<sup>3</sup>. Die Werte > 1000 kg/m<sup>3</sup> stammen von Granulaten, die den Drehrohrofen nur einmal durchlaufen haben. Die Rohdichten der kommerziellen leichten Gesteinskörnungen sind tendenziell 100 bis 200 kg/m<sup>3</sup> geringer als die aus der Pilotanlage. Die Unterschiede sind geringer, wenn die Rohdichten auch für diese Körnungen mit dem gleichen Verfahren bestimmt werden wie für die Granulate aus dem Drehrohrofen (Tabelle 2).

Tabelle 2: Gegenüberstellung von Rohdichten der leichten Gesteinskörnungen aus Mauerwerkbruch mit denen von am Markt erhältlichen Produkten

	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]			
	Leichte Gesteinskörnungen aus Mauerwerkbruch		Marktüblich leichte Gesteinskörnungen	
	Labor	Pilotmaßstab	Eigene Messungen	Firmenangaben
<b>Mittel</b>	767	1097	852	919
<b>Min.</b>	313	620	520	400
<b>Max.</b>	1800	1740	1650	1700
<b>Anzahl</b>	39	46	33	64

### 1.2.3 Ergebnisse zum Prozesswärmeverbrauch

Obwohl die verwendete Anlage weder über einen Vorwärmer noch einen Kühler verfügt, wurden anhand des Erdgasverbrauchs erste Abschätzungen zum Energieverbrauch für den Brennprozess vorgenommen. Die Aussagen betreffen die Abhängigkeit des Verbrauchs an thermischer Energie vom Durchsatz und von der Anzahl der Ofendurchläufe des Materials. Des Weiteren werden Vergleiche mit Literaturangaben zum Wärmeverbrauch vorgenommen.

In Abbildung 11 ist der Verbrauch an thermischer Energie ohne Differenzierung nach der Anzahl der Ofendurchläufe dargestellt. Danach nimmt der Verbrauch an thermischer Energie mit zunehmendem Durchsatz deutlich ab.

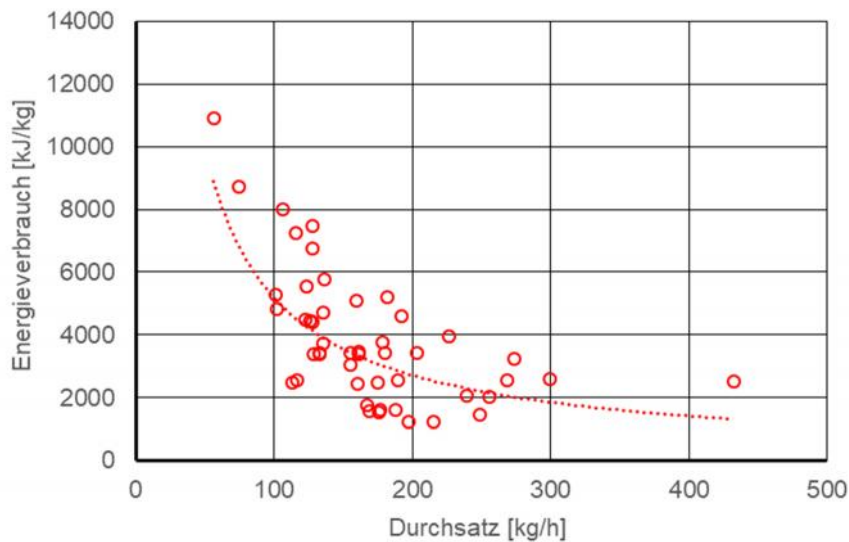


Abbildung 11: Verbrauch an thermischer Energie in Abhängigkeit vom Durchsatz bei der Herstellung der leichten Gesteinskörnungen in der Pilotanlage

Bei den erforderlichen, wiederholten Durchläufen durch den Ofen steigt der realisierbare Durchsatz an. Der spezifische Energieverbrauch nimmt vom ersten Durchlauf zu den nachfolgenden Durchläufen ab (Tabelle 3).

Tabelle 3: Veränderungen von Durchsatz und Energieverbrauch bei mehrfachem Ofendurchlauf

	<b>Durchsatz [kg/h]</b>	<b>Energieverbrauch [kJ/kg]</b>
<b>1. Durchlauf</b>	144	4558
<b>2. Durchlauf</b>	187	3341
<b>3. Durchlauf</b>	265	3469

Der Verbrauch an thermischer Energie für die Herstellung von leichten Gesteinskörnungen aus unterschiedlichen Ausgangsmaterialien im hier verwendeten Drehrohrföfen bzw. nach Literaturangaben ist in Abbildung 12 zusammengefasst [4, 5, 6]. Daraus kann zumindest die Schlussfolgerung gezogen werden, dass bei der Verwendung von Mauerwerkbruch als Rohstoff günstigere Werte als bei der Verwendung von Tonen zu erwarten sind. Eine der Ursachen dafür ist die Tatsache, dass die endotherme Hydroxylation der Tonminerale mit Enthalpie zwischen 347 und 917 kJ/kg [7] bei der Verwendung von Ziegel- und Mauerwerkbruch als Ausgangsmaterial kein zweites Mal durchlaufen werden muss.

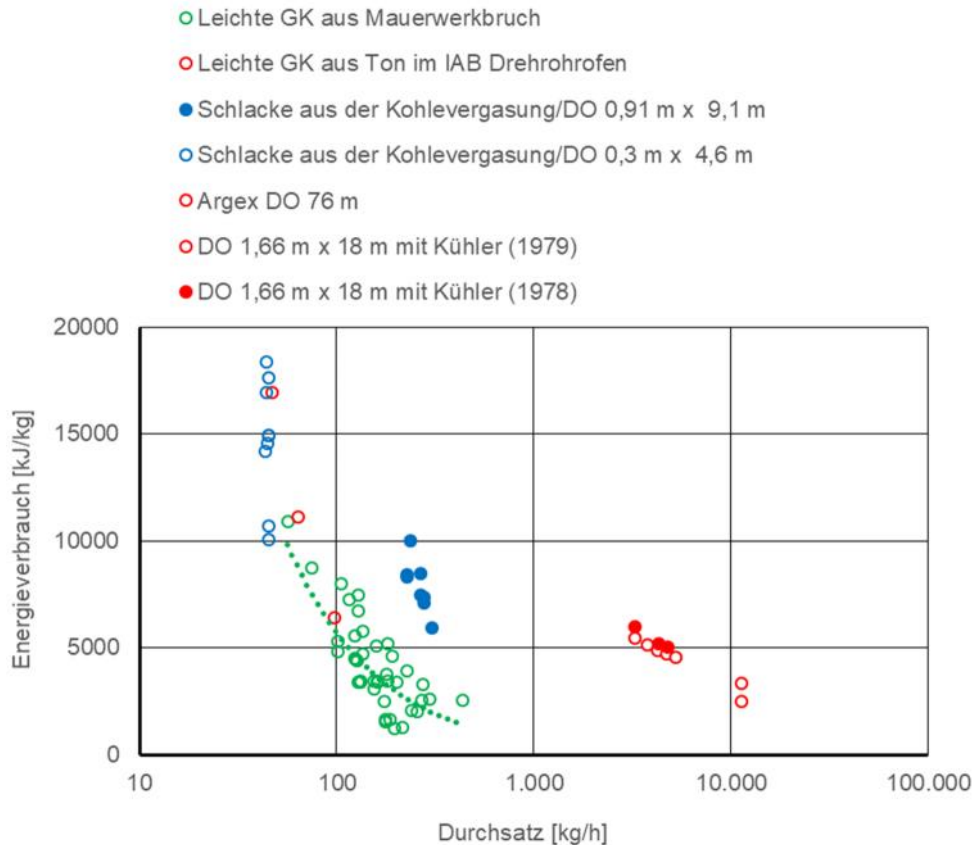


Abbildung 12: Verbrauch an thermischer Energie bei der Herstellung der leichten Gesteinskörnungen aus Mauerwerkbruch im Vergleich zu solchen aus Tonen in IAB Drehrohrföfen sowie aus [4-6] entnommene Werte

### 1.3 Sulfatentfrachtung und Gipsrückgewinnung

Während es für relativ sortenrein anfallende Reststoffe aus Calciumsulfatbaustoffen, wie beispielsweise Gipskartonplatten, inzwischen Aufbereitungsanlagen und Recyclingmöglichkeiten gibt, können zu hohe Sulfatgehalte für die Verwertung von gemischtem Bauschutt in konventionellen Anwendungen (Tiefbau) ein Problem darstellen. Gipshaltiger Mauerwerkbruch muss daher aufgrund fehlender Verwertungsmöglichkeiten oft deponiert werden. Die Option sulfathaltigen, nicht sortierbaren heterogenen Bauschutt für das Recycling nutzbar zu machen, ist daher sowohl aus wirtschaftlicher als auch aus ökologischer Sicht ein interessanter Ansatz. Die Möglichkeit der Sulfatentfrachtung bei gipshaltigen Ausgangsstoffen in dem oben beschriebenen REALight Prozess ergibt sich grundsätzlich aus Untersuchungen zur thermischen Zersetzung von Calciumsulfat, die Anfang des vorigen Jahrhunderts durchgeführt wurden und noch heute Stand des Wissens sind. Danach läuft die thermische Dissoziation von reinem Anhydrit erst oberhalb von 1200 °C ab. In Gegenwart von Fremdoxiden verschiebt sich die Zersetzung zu niedrigeren Temperaturen. Sie beginnt dann bereits bei 1100 °C und ist bei 1250 °C abgeschlossen [8]. Durch Differential-Scanning-Analysen wurde diese Verschiebung

bestätigt. Bis zu einer Gipszugabe von 15 Masse-% (Abbildung 13) wurde die vollständige Zersetzung des  $\text{CaSO}_4$  bei Temperaturen unterhalb von 1200 °C erreicht [9]. Im Unterschied dazu zersetzt sich der reine Gipsputz bis zu einer Temperatur von 1400 °C nicht vollständig (Abbildung 14). 60 Masse-% Anhydrit bleiben zurück. Die Expansion der Grüngranulate als Voraussetzung für das Erreichen geringer Rohdichten ist ebenfalls von der Brenntemperatur abhängig. Sie kann mit Hilfe der Erhitzungsmikroskopie ermittelt werden. In Tabelle 4 sind die Temperaturbereiche für beide Vorgänge gegenübergestellt. Danach liegt die Temperatur der Expansion oberhalb der Zersetzungstemperatur. Die Sulfatentfrachtung ist bei der Temperatur der maximalen Volumenzunahme nahezu abgeschlossen.

Tabelle 4: Gegenüberstellung Temperaturbereiche für  $\text{CaSO}_4$ -Zersetzung und Blähvorgang

	<b>CaSO<sub>4</sub>-Zersetzung</b>		<b>Blähvorgang</b>	
	Beginn [°C]	vollständig [°C]	Temp. bei max. Vol. [°C]	Max. Volumen-zunahme [%]
<b>Rohmaterial ohne Gipsputz</b>	1083	1185	1178	303
<b>Rohmaterial mit 5 Masse-% Gipsputz</b>	1026	1179	1177	189
<b>Rohmaterial mit 10 Masse-% Gipsputz</b>	1051	1192	n.b.	n.b.
<b>Rohmaterial mit 15 Masse-% Gipsputz</b>	1051	1192	1186	144
<b>100 Masse-% Gipsputz</b>	1051	1400	-	-

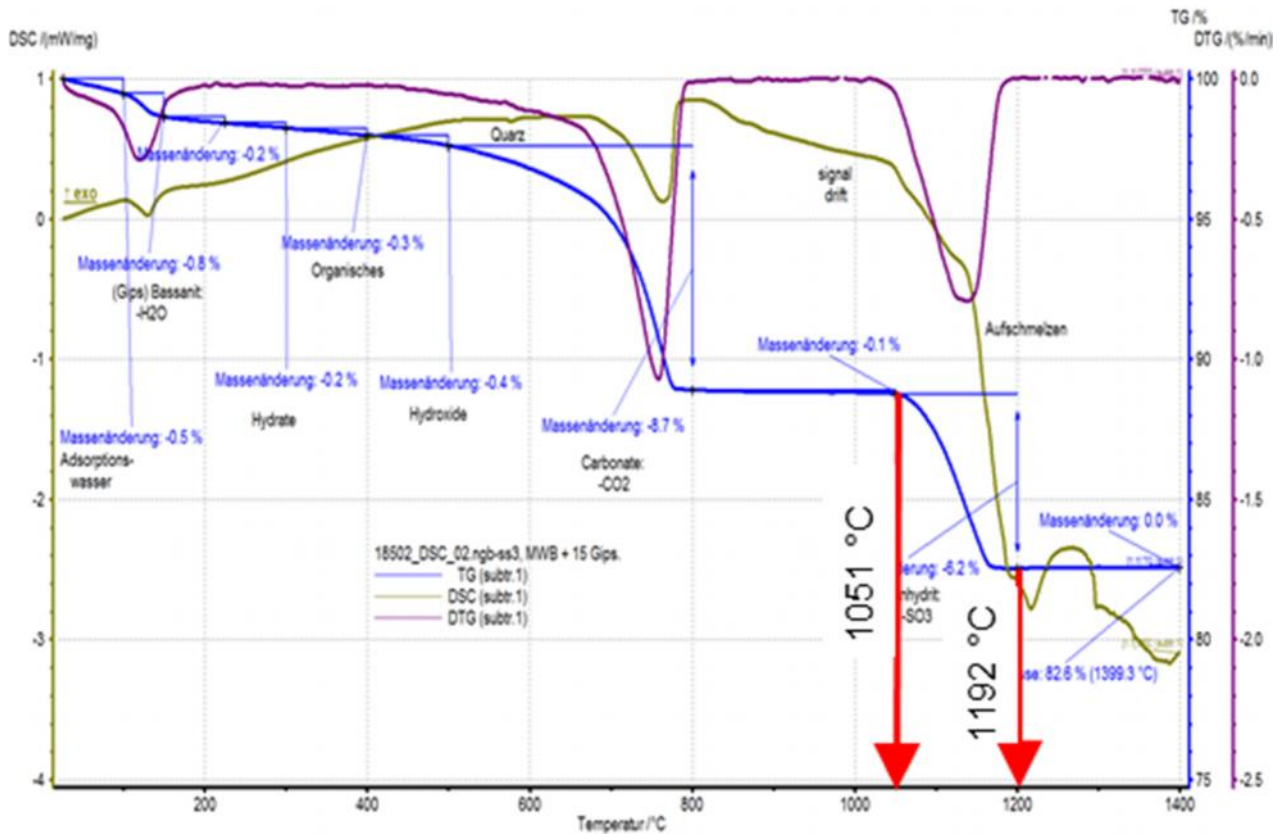


Abbildung 13 Differential-Scanning-Analyse des mit 15 Masse-% Gipsputz dotierten Rohmaterials (blau = TG, grün = DSC, violett = DTG)

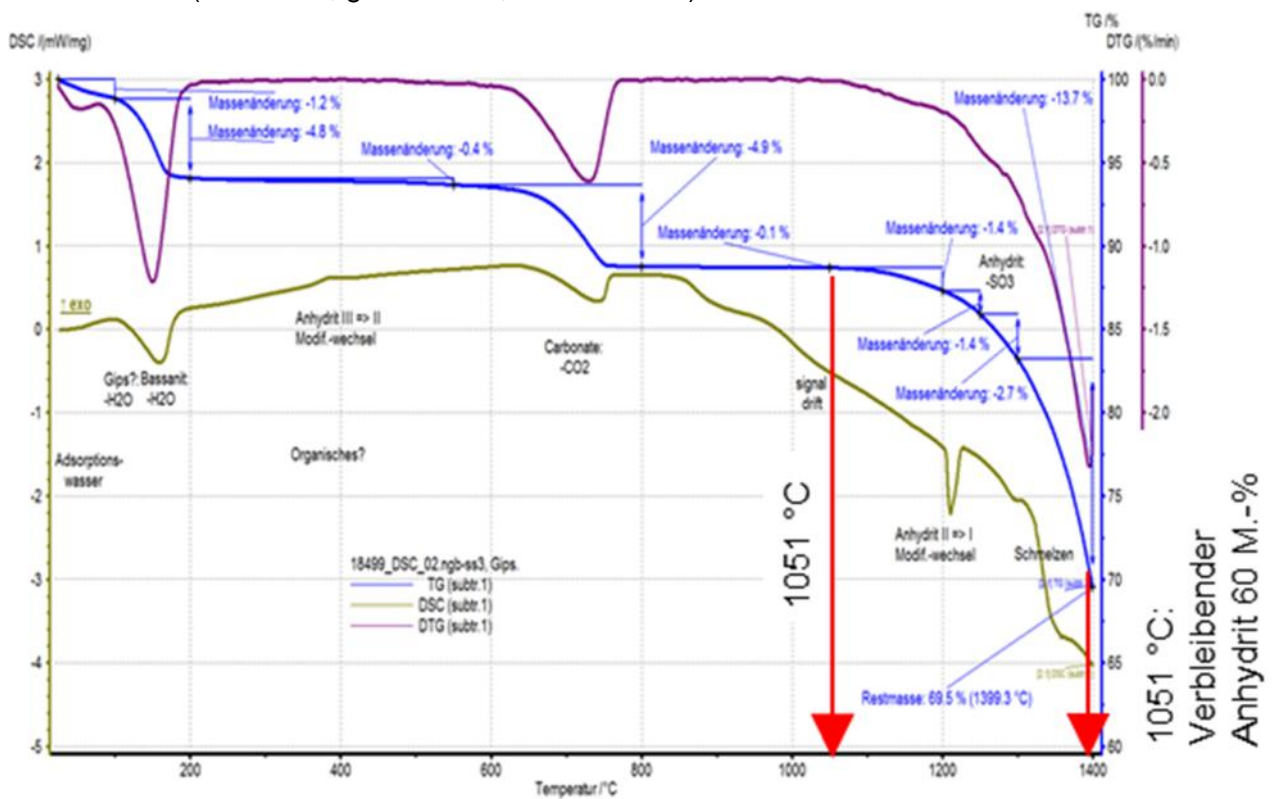


Abbildung 14 Differential-Scanning-Analyse, reiner Gipsputz (blau = TG, grün = DSC, violett = DTG)

Das Potential des Prozesses für eine Sulfatentfrachtung wurde bestätigt. Ob hier eine Rückgewinnung von verwertbarem REA-Gips möglich ist, war letztlich im Projekt noch zu untersuchen. Somit wurden zum Projektende an der Drehrohrofen-Anlage des IAB durch IBU-tec Versuche durchgeführt, um die Gipsrückgewinnung im Rahmen des REALight Projektes zu demonstrieren. Hierzu wurde die in der Gesamtanlage integrierte Gaswäsche testweise direkt mit einer definierten Menge  $\text{SO}_2$  (Flaschengas) beaufschlagt. In vorhergehenden Versuchen, bei denen Granulate aus gipshaltigem Bauschutt im Drehrohrofen bei Temperaturen von  $1180^\circ\text{C}$  gebrannt wurde, konnte bereits erfolgreich das Freisetzen von  $\text{SO}_2$  im Rahmen des Drehrohrprozesses demonstriert werden. Mangels ausreichender Probemengen und damit Versuchszeit reichte die  $\text{SO}_2$ -Menge jedoch nicht aus, um aussagekräftige Probenmengen im Nasswäscher zu generieren. Zusätzlich zeigte sich, dass der Abgasstrom aus dem Ofen vor der Nasswäsche mit einer Staubabscheidung versehen werden muss, um einen Staubeintrag in das Waschgut zu vermeiden und somit hochwertigen Gips produzieren zu können.

Zu Beginn des Versuchs mit direkter  $\text{SO}_2$ -Bespeisung wurde der Nasswäscher auf einen Füllstand von 280 mm eingestellt, was etwa dem halben Behältervolumen entspricht. Hierzu wurden 10 Liter einer 50 % (m/m) NaOH-Lösung gegeben, welche als Puffer für die  $\text{SO}_2$ -Absorption dient, da die geringe Löslichkeit von  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  sonst limitierend wirkt. Im Anschluss wurden die Gebläse sowie die Umwälzpumpe zugeschaltet, um die Anlage betriebsbereit zu machen. Nach Adaptieren der Zuleitung wurde dann mit dem Dosieren des  $\text{SO}_2$  begonnen, wobei anfangs 6 L/min erreicht wurden. Später wurde der Durchfluss durch ein Erwärmen der Gasflaschen bis auf 14 L/min gesteigert, wie in Abbildung 15 dargestellt ist.

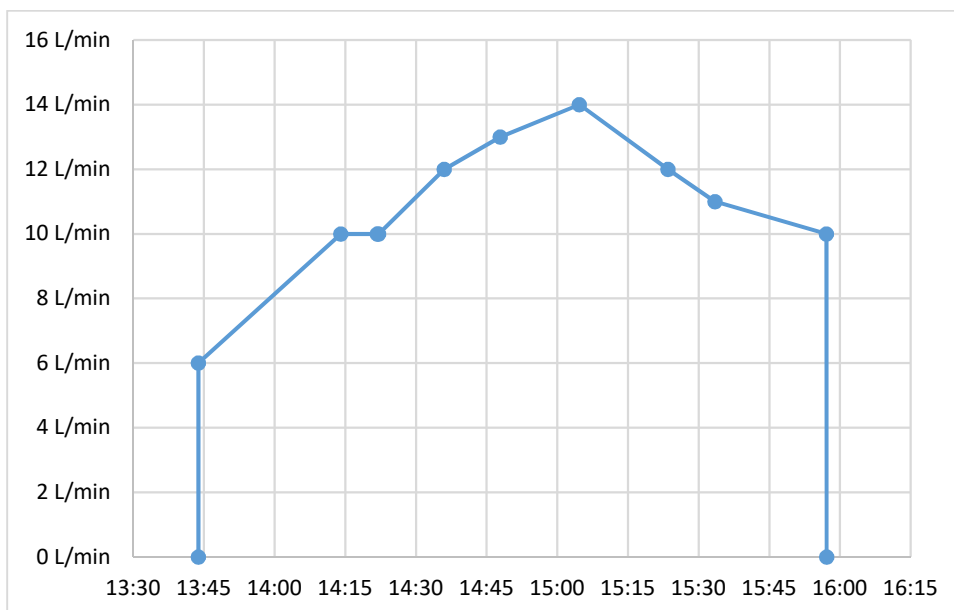


Abbildung 15: Volumenstrom  $\text{SO}_2$  über die Versuchszeit

Der pH-Wert hat sich über den gesamten Versuch bis zum Neutralisieren der Lauge praktisch nicht geändert, bis er abrupt eingebrochen ist. Dies war zu erwarten und liegt in der „logarithmischen Natur“ des pH begründet, beispielsweise ist zum Ansäuern von Wasser von pH 14 auf pH 13 100x mehr  $\text{SO}_2$  nötig als von pH 11 auf pH 10. Der Prozess konnte jedoch über die Leitfähigkeit gut verfolgt werden. Diese erhöhte sich mit dem Zudosieren der NaOH-Lösung erst von 1 mS/cm auf 50 mS/cm und sank dann proportional zur  $\text{SO}_2$ -Menge auf 20 mS/cm ab. Dieser Wert wurde dann stabil gehalten, da NaOH während des Versuchs durch Zugabe von  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  regeneriert wurde. Die Zugabe von  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  erfolgte ab 15:10 Uhr in regelmäßigen Abständen. Der pH-Wert stieg bei der Zugabe jeweils sprunghaft an, auf Werte deutlich über denen einer gesättigten  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung ( $\text{pH} < 13$ ), was nur durch Bildung von NaOH erklärt werden kann. Die regenerierende Wirkung wurde so bestätigt. Der jeweilige Verlauf von Leitfähigkeit und pH-Wert ist in Abbildung 116 dargestellt.

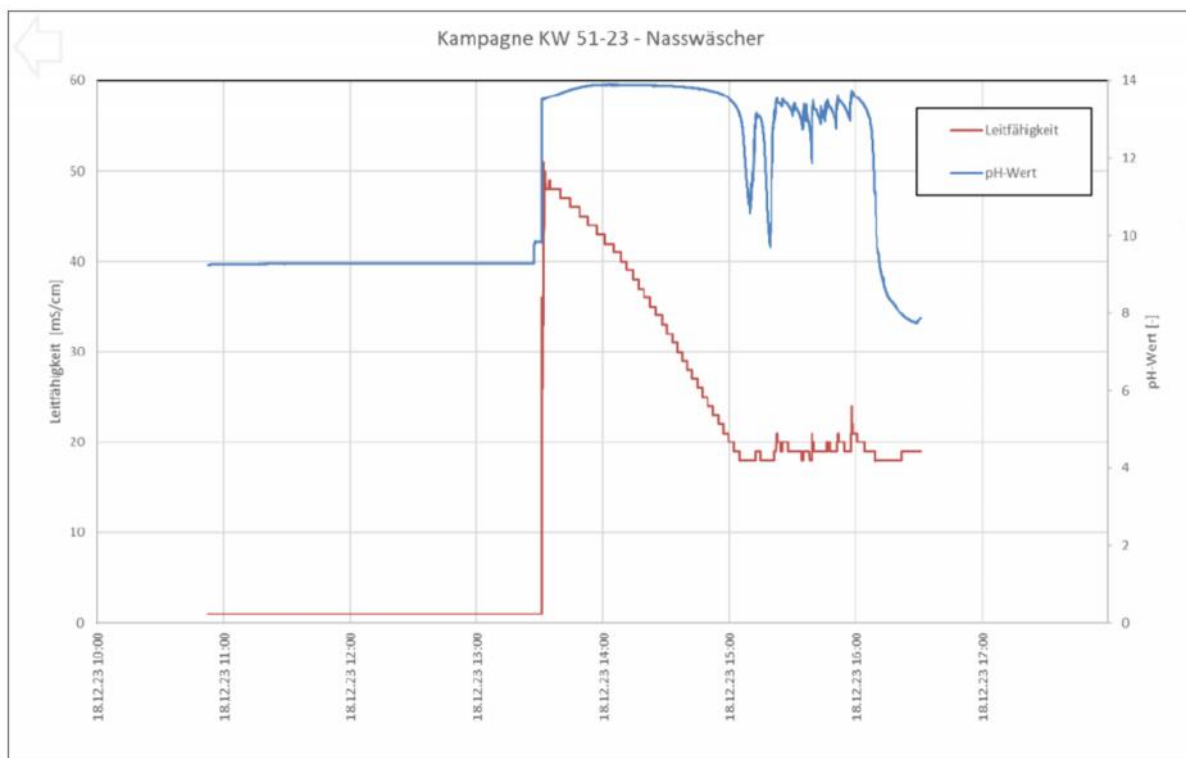


Abbildung 16: Verlauf von pH-Wert und Leitfähigkeit über die Versuchszeit

Über den Versuch wurden innerhalb von 133 Minuten insgesamt 4,0 kg  $\text{SO}_2$  zudosiert. Bei einer stöchiometrischen Umsetzung entspricht dies einer Menge von 10,7 kg Gips in Form von  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Nasschemisch wurde in einer Probe der Gips-Suspension ein Gehalt von 28 % Calcium und 19 % Schwefel ermittelt. Gleichzeitig wurde in der TGA mit gekoppelter DSC der in Abbildung 17 dargestellte Verlauf aufgenommen. Die Ergebnisse der TGA lassen sich wie folgt interpretieren:

- Bis 350 °C entweichen 2,9 % anhaftende Feuchte sowie leicht gebundenes Wasser.
- Zwischen 350 °C und 450 °C dehydratisiert  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  zu  $\text{CaO}$  mit einem Masseverlust von 2,2 %, was einem Anteil von nicht-umgesetztem  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  von 9,0 % entspricht.
- Zwischen 450 °C und 550 °C wird Sulfit zu Sulfat oxidiert. Die Masse nimmt um 1,8 % zu, was einem  $\text{CaSO}_3$ -Anteil von 13,5 % entspricht.
- Zwischen 650 °C und 800 °C zerfällt  $\text{CaCO}_3$  zu  $\text{CaO}$ , die Masse nimmt um 4,5 % ab, was einem  $\text{CaCO}_3$ -Anteil von 10,2 % entspricht.

Zusammenfassend lässt sich folgendes Fazit ziehen: Es handelt sich um eine Mischung aus 9 % nicht-umgesetztem  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , 13,5 % nicht aufoxidiertem  $\text{CaSO}_3$ , 10,2 %  $\text{CaCO}_3$  sowie 59,6 %  $\text{CaSO}_4$ , in Summe 92,4 %. Die restlichen Bestandteile sind insbesondere Wasser (5,4 %) und unbekannte Verunreinigungen (2,2 %).

Die aufsummierten Anteile an Calcium und Schwefel in den ermittelten Verbindungen ergeben 31 % Calcium und 18 % Schwefel, was sich gut mit den nasschemischen Werten von 28 % Calcium und 19 % Schwefel deckt.

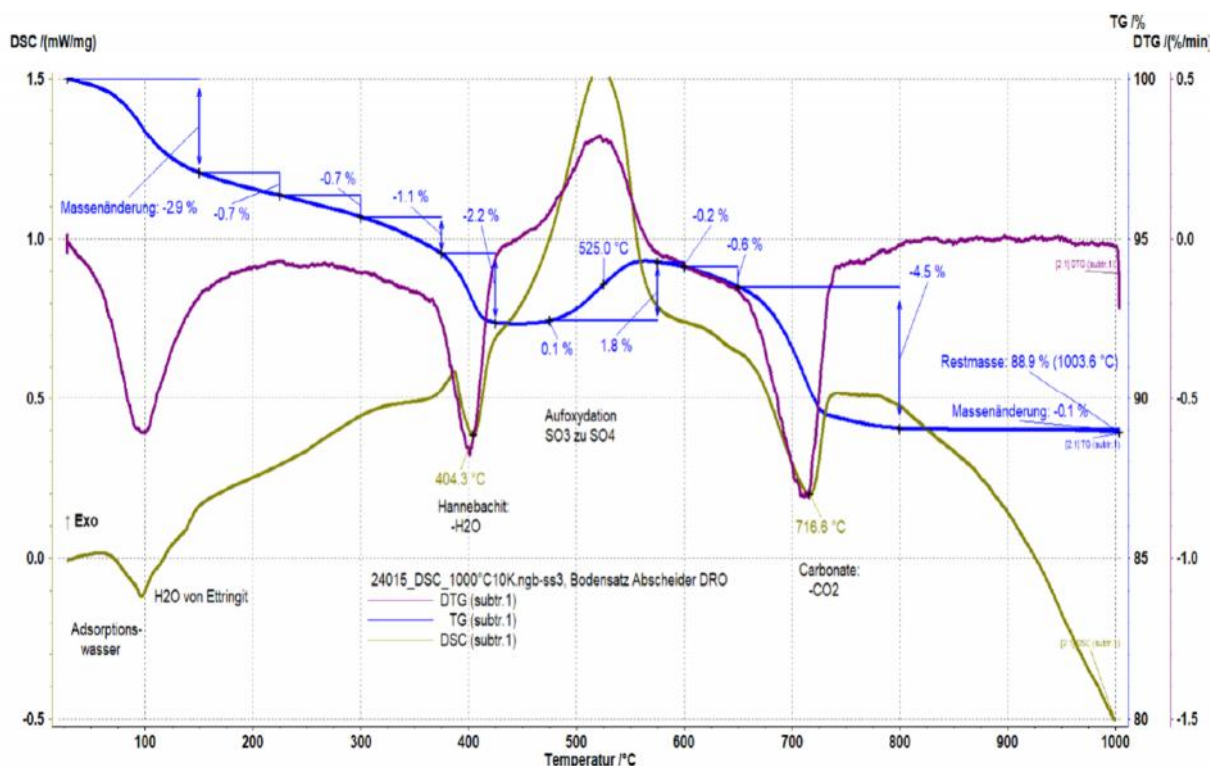


Abbildung 17: Ergebnisse der Analytik mittels TGA mit gekoppelter DSC

Der Gipsgehalt hätte bei vollständiger Umsetzung von Hydroxid und Carbonat sowie Aufoxydation des Sulfits deutlich gesteigert werden können. In weiteren Versuchen sollte daher auf eine vollständige Umsetzung mit  $\text{SO}_2$  geachtet werden (→ pH muss leicht sauer sein). Zusätzlich muss eine längere Nachlaufphase stattfinden, um Sulfit

vollständig zu Sulfat zu oxidieren, wofür entsprechend Luftsauerstoff in die Lösung eingetragen werden muss. Unter Berücksichtigung dieser Optimierungen und der Tatsache, dass Gips das einzige Reaktionsprodukt ist, wäre im Versuch ein Gips-Gehalt von 98 % zu erwarten.



Abbildung 18: Suspension des Rückschlammes aus Nasswäscher abgezogen (re: getrocknet)  
(Foto: IBU-tec)

#### 1.4 Anwendung der Leichtgranulate

Für die Untersuchungen zum Einsatz in ungebundenen Anwendungen wurden HanseGrand und TBR vorwiegend gröbere Körnungen zur Verfügung gestellt. Im besonderen Fokus des Projekts steht die Anwendung der Leichtgranulate mit Körnungen kleiner 8 mm in gebunden Systemen, wie in Infraleichtbetonen der Beton und Naturstein Babelsberg GmbH, leichten Steinerfüllungsmörteln (Opus) und Trockenmörtelsystemen (sievert). Auch die bautechnischen Kennwerte Korngrößenverteilung, Schüttdichte, Kornrohichte, Reindichte, Gesamtkornporosität, Wasseraufnahme und Kornfestigkeit der eingesetzten Leichtgranulate wurden im Projektverlauf bestimmt. Die durch den Projektpartner BAM ermittelten Untersuchungsergebnisse zu den bautechnischen Eigenschaften der Leichtgranulate sind in Tabelle 5 und 6 zusammengestellt. Die beton- bzw. mörtelschädigende Bestandteile, wie Chlorid, Sulfat und Alkalien sowie die umweltanalytische Unbedenklichkeit der eingesetzten Leichtgranulate wurden von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) untersucht. Alle REALight Leichtgranulate erwiesen sich als unbedenklich, da alle ermittelten Gehalte weit unter den jeweiligen Grenzwerten liegen. Die Leichtgranulate erfüllen somit die notwendigen Anforderungen für alle angezielten Anwendungen.

Tabelle 5: Bautechnische Eigenschaften der Leichtgranulate (für Steinerergänzungsmörtel) [10].

<b>Gesteinskörnung</b>	Wasseraufnahme in Ma.-%	Kornrohddichte in kg/m <sup>3</sup>	Reindichte in kg/m <sup>3</sup>	Gesamtporosität in %
<b>BG 10/2021 0/0,5</b>	13,6	1980	2690	26,5
<b>BG 10/2021 0,5/1</b>	18,9	1760	2680	34,5
<b>BG 10/2021 1/2</b>	23,1	1490	2660	44,0
<b>BG 10/2021 2/4</b>	20,5	1230	2660	53,7
<b>BG 10/2021 4/8</b>	19,0	1130	2660	57,5
<b>BG 10/2022 A 0/0,5</b>	14,9	2060	2720	24,3
<b>BG 10/2022 B 0/0,5</b>	18,6	1880	2650	29,1
<b>BG 10/2022 0,5/1</b>	22,1	1770	2690	34,2
<b>BG 10/2022 A 1/2</b>	26,5	1620	2700	40,0
<b>BG 10/2022 B 1/2</b>	20,7	1630	2650	38,5

Tabelle 6: Bautechnische Eigenschaften der Leichtgranulate (für Infraleichtbeton) [11].

<b>Gesteinskörnung</b>	Wasseraufnahme in Ma.-%	Kornrohddichte in kg/m <sup>3</sup>	Reindichte in kg/m <sup>3</sup>	Gesamtporosität in %
<b>BG 09/2022 2/4</b>	19,9	1020	2680	61,9
<b>BG 09/2022 4/8</b>	16,0	890	2660	66,4

#### 1.4.1 Anwendung der Leichtgranulate in Infraleichtbeton

Der Projektpartner BNB entwickelte Rezepturen für Infraleichtbetone unter Verwendung von Blähglas (Liaver) und des CO<sub>2</sub>-armen Bindemittels Celitement [12, 13]. Die BAM nahm anschließend die erforderliche Anpassung der Rezepturen bei Substitution der Körnungen 2-4 mm und 4-8 mm durch die vom Projektpartner IAB

hergestellten Leichtgranulate vor. Die Gesteinskörnungen der Betonmischung bestanden damit zu etwa 65 Vol.-% aus Leichtgranulaten.

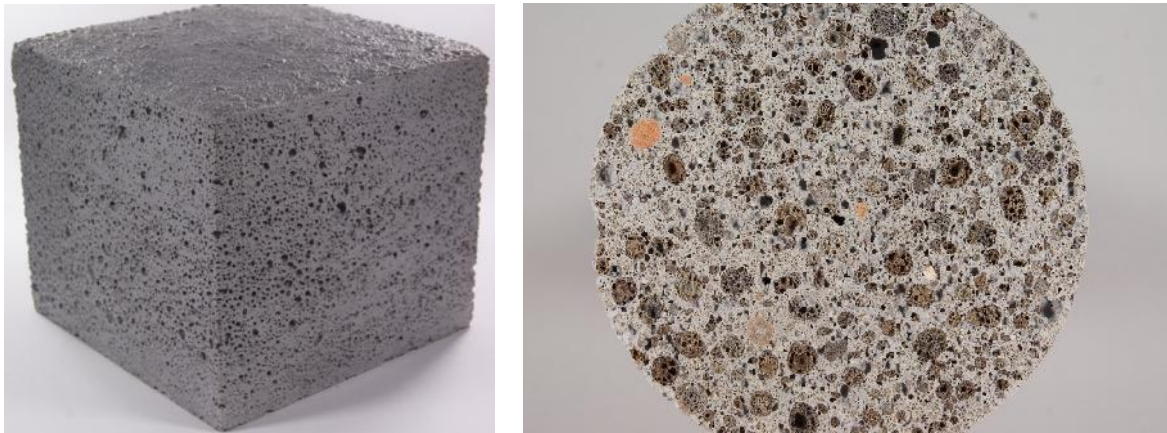


Abbildung 19: Infraleichtbeton-Prüfwürfel mit 150 mm Kantenlänge (links) und geschnittene Oberfläche eines Zylinders mit 100 mm Durchmesser (rechts) (Foto: BAM) [11].

Tabelle 7: Eigenschaften des Infraleichtbetons mit Leichtgranulat [11], [14].

Eigenschaft	Prüfnorm	Kennwert
Druckfestigkeit nach 28 d in MPa	DIN EN 12390-3:2019	10,8
Biegezugfestigkeit nach 28 d in MPa	DIN EN 12390-5:2019	1,4
Trockenrohichte nach 28 d in kg/m <sup>3</sup>	DIN EN 12390-7:2021	800
Reindichte nach 28 d in kg/m <sup>3</sup>	DIN 66137-2:2019	2200
Gesamtporosität nach 28 d in %	DIN 66137-1:2019	63,5
Stat. E-Modul nach 28 d in MPa	DIN EN 12390-13:2021	4200
Längenänderung nach 28 d in mm/m	DIN EN 12617-4:2002	-0,43
Abwitterung nach 56 Frost-Tau-Zyklen in g/m <sup>2</sup>	DIN CEN/TS 12390-9:2017, Abschn. 5	86,4
Carbonatisierungsgeschwindigkeit in mm/a <sup>0,5</sup>	DIN EN 12390-10:2019	23
Wärmeleitfähigkeit bei 10 °C in W/mK		0,25

Für die Ermittlung der bautechnischen Betonkennwerte auf der Grundlage von DIN bzw. DIN EN-Normen wurde vom Projektpartner BAM ein umfassender Prüfplan erstellt und abgearbeitet. In Tabelle 7 sind die Festbetoneigenschaften des hergestellten Betons zusammengefasst. Dieser kann aufgrund seiner Trockenrohichte von 800 kg/m<sup>3</sup> tatsächlich als Infraleichtbeton eingestuft und der Druckfestigkeitsklasse ILC 7 nach Schlaich zugeordnet werden [15].

Der Infraleichtbeton besitzt ähnliche Eigenschaften wie ein Vergleichsbeton analoger Rezeptur mit Blähton als grobe Gesteinskörnung [14]. Auch verglichen mit Literaturdaten zu Infraleichtbetonen ähnlicher Trockenrohichte, die als leichte

Gesteinskörnung ausschließlich Blähtone enthalten und mit normalem Zement hergestellt wurden, weist er ähnliche Betonkennwerte auf [16, 17]. Abbildung 19 zeigt einen Infralichtbetonwürfel und eine Schnittfläche durch einen Betonzylinder. Zudem wurden durch BNB Wandelemente für einen Pavillon als Demonstrator hergestellt (Abbildung 20).



Abbildung 20: Wandelement aus Infralichtbeton als Demonstrator (Foto: BAM)

#### **1.4.2 Anwendung der Leichtgranulate in Mörteln**

OPUS entwickelte mit feinkörnigen, gebrochenen Leichtgranulaten der Körnung 0-0,5 mm, 0,5-1 mm, 1-2 mm, 2-4 mm und 4-8 mm leichte Füllmörtel und mit der Körnung 0-0,5 mm leichte Deckmörtel für die Steinerfüllung in der Denkmalpflege. Die dazu eingesetzten gebrochenen Körnungen zeigt Abbildung 21. Das zweistufige Mörtelsystem (Abbildung 22) soll zum Auffüllen größerer Fehlstellen im Cottaer Sandstein dienen. Mit dem Deckmörtel erfolgt eine Anarbeitung der Oberfläche und Ergänzung an den umliegenden Bestand des zu restaurierenden Steins.

Für Füll- und Deckmörtel werden bevorzugt kalkbasierte Mörtelsysteme entwickelt. Aber auch die Zugabe hydraulischer Bindemittelkomponenten wurde getestet. Insgesamt wurden 42 Deckmörtelrezepturen sowie 41 Füllmörtel-Rezepturen erprobt. Die OPUS Denkmalpflege GmbH entwickelte die Mörtelmischungen unter denkmalpflegerischen Gesichtspunkten. An den am besten geeigneten Mörtelrezepturen wurden anschließend von der BAM umfangreiche Materialprüfungen nach DIN bzw. DIN-EN-Normen durchgeführt. Dazu wurde ein umfangreicher Prüfplan

entwickelt und abgearbeitet. Die Werte für Trockenrohdichte und Druckfestigkeit einiger Mörtel sind in Tabelle 8 zusammengestellt.



Abbildung 21: Gebrochene Leichtgranulate unterschiedlicher Körnung (v.l.n.r. 0-0,5 mm, 0,5-1 mm, 1-2 mm, 2-4 mm und 4-8 mm) zur Herstellung leichter Steinerfüllungsmörtel (Foto OPUS Denkmalpflege GmbH)

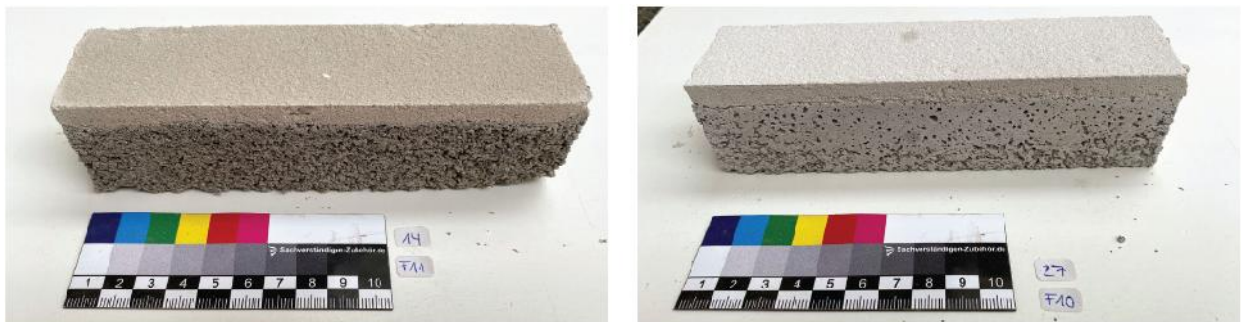


Abbildung 22: Prismen aus Deck- und Füllmörtel mit Leichtgranulaten, links auf Kalkbasis, rechts auf Kalk-Zement-Basis (Foto: OPUS Denkmalpflege GmbH) [18]

Tab. 8: Trockenrohdichten und 28-Tage-Druckfestigkeiten der Restauriermörtel mit Leichtgranulat [10].

	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>D4</b>	<b>F1</b>	<b>F2</b>	<b>F3</b>	<b>F4</b>
Trockenrohdichte in kg/m <sup>3</sup>	1360	1430	1380	1430	1250	1190	1250	1230
Druckfestigkeit in MPa	2,0	3,3	3,0	5,2	1,2	2,7	2,1	4,1

D = Deckmörtel, F = Füllmörtel

Tests bei Sievert mit feinen (gebrochenen) Leichtgranulaten für die Anwendung in Trockenmörtelsystemen ergaben zunächst negative Ergebnisse, da teilweise massiven Treiberscheinungen in den Mörteln auftraten. Weitere Untersuchungen ergaben, dass ein „Waschen“ der REALight Leichtgranulate dieses Problem beseitigt (Abbildung 23).



Abbildung 23: Mörtelproben mit gewaschenen (rechts) und ungewaschenen Leichtgranulaten (Mitte) im Vergleich zu einer Standardmörtelmischung (links) (Foto: Sievert Baustoffe SE & Co KG)

Es wird vermutet, dass aluminiumhaltige Anhaftungen/ Verunreinigungen aus dem verwendeten Trennmittel die Treiberscheinungen hervorriefen. Mit den gewaschenen Leichtgranulaten konnte ein leichter Klebe- und Armierungsmörtel sowie ein Leichtmauermörtel LM10/36 realisiert werden. Abbildung 24 zeigt beispielhaft einen leichten Klebe- und Armierungsmörtel mit den REALight Granulaten für ein Wärmedämmverbundsystem.



Abbildung 24: Wärmedämmverbundsystem mit Leicht Klebe- und Armierungsmörtel mit gewaschenem REALight-Granulat (Foto: Sievert Baustoffe SE & Co KG)

### 1.4.3 Anwendung der Leichtgranulate in ungebundenen Systemen

Die Untersuchungen der Leichtgranulate in ungebundenen Anwendungen erfolgten bei den Projektpartnern T.B.R. und HanseGrand. Die mögliche Anwendung als Pflanzsubstrat konnte vom Projektpartner T.B.R. nachgewiesen werden. Leichtgranulate dienen zur Herstellung von Dachsubstraten für Dachflächen und Tiefgaragendecken, überbaubaren und nicht überbaubaren Baumsubstraten sowie Spezialböden. Der Einsatz der Substrate erfolgte direkt im Gala-Bau im Großraum Berlin-Brandenburg. Abbildung 25 zeigt eine Versuchsfläche mit Substrat aus REALight Leichtgranulaten, die als Carport für Winterdienstfahrzeuge dient. Es wurde festgestellt, dass die Leichtgranulate definitiv eine Alternative zu herkömmlichen GaLa-Bau-Material darstellen, die gleichzeitig die Transportkosten verringert und natürliche Rohstoffe spart.



Abbildung 25: Versuchsfläche von Substrat mit Leichtgranulaten für Carport für Winterdienstfahrzeuge auf dem TBR Betriebshof (Foto: T.B.R.)

Die Verwendung in ungebundenen Systemen, beispielsweise als Schüttung, Rohrbettung und für zahlreiche Anwendungen im Tief- und Wegebau ist nach Tests beim Projektpartner HanseGrand mit REALight Leichtgranulaten genauso gut möglich wie mit herkömmlichem Blähton. Im Grundbau und Rohrleitungsbau ist die Verringerung der Auflast von entscheidender Bedeutung, insbesondere auf weichen oder wenig tragfähigen Untergründen. Diese neigen oft zu ungleichmäßigem Setzungsverhalten, was zu Instabilitäten und Schäden an den Bauwerken führen kann. Im Rahmen des Projekts hat HanseGrand die REALight-Granulate in Groundfix® Geo-Matratzen integriert. In Zusammenarbeit mit der Firma Joachim Tiesler Hoch- und Tiefbau GmbH & Co. KG wurde in Elsflötz (Niedersachsen) im März 2023 eine Versuchsbaustelle gestartet. Der Untergrund bei dieser Baustelle bestand aus einem sehr instabilen Torfboden, bei welchem eine Verlegung von Großrohren mit der

herkömmlichen Methode nicht möglich war. Auf einer Sauberkeitsschicht aus Sand wurden die Groundfix® Geo-Matratzen in Verlaufsrichtung der Trassenführung ausgelegt und die Abwasserrohre DN 600 darauf gebettet (Abbildung 26).



Abbildung 26: Auslegen (li.) der Matratzen in Verlegerichtung und Verlegung der Rohre (re.) (Fotos: Hansegrand Klimabaustoffe e.K.)

Die Auswertung von Kalibermessungen nach der Bauphase und einem Zeitraum von 6 Monaten nach Beendigung der Baustelle haben ergeben, dass keine Setzungen im Verlauf der Trasse aufgetreten sind.

## **2 Ergänzungen zu den inhaltlichen Ergebnissen**

### **2.1 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Der Aufwand und der Kostenrahmen wurden wie im Förderantrag beschrieben eingehalten. Eine kostenneutrale Verlängerung des Projekts ist nicht erfolgt. Im Projekt waren die wesentlichen Kosten und Ausgaben personalbezogen. Die beantragten Mittel wurden im Wesentlichen wie in der Antragsphase geplant abgerufen und verwendet. Etwaige Änderungen wurden mit dem Projektträger abgestimmt.

### **2.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die Notwendigkeit des Projekts wurde durch die aktuellen politischen Entwicklungen und Bestrebungen bereits innerhalb der Bearbeitungszeit unterstrichen. Der Kohleausstieg ist aus umweltpolitischer Sicht unverändert relevant und der Impact auf den Bausektor enorm. Mit dem Ausstieg aus der Energiegewinnung aus fossilen Brennstoffen sinken auch kontinuierlich die Mengen an Gips aus den Rauchschwefelungsanlagen, die bis zum Jahr 2017 bis zu 42 % zur Deckung des

Rohstoffbedarfs der Gipsindustrie beitragen. Ebenso hat sich die Verknappung auf dem Markt für leichte Gesteinskörnungen für die im Projekt angezielten Anwendungen fortgesetzt.

Die vorgelegten Ergebnisse wären ohne diese Förderung nicht erreicht worden. Der Umfang der geleisteten Arbeit wird anhand zahlreicher Vorträge und Veröffentlichungen in Zeitschriften und Tagungsbänden sowie der fortlaufenden Berichterstattungen auf den Statusseminaren bzw. in den Projekttreffen deutlich.

### **2.3 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Die Ergebnisse können als Grundlage für die rohstoffliche Verwertung von Mauerwerkbruch dienen. Die Frage, ob sich ein aus Mauerwerkbruch hergestelltes Leichtgranulat als leichte Gesteinskörnung für Beton, Mörtel und ungebundene Anwendungen eignet, kann eindeutig mit ja beantwortet werden. Mit den Leichtgranulaten ist ein hochwertiges Recyclingprodukt verfügbar, für das sich viele Verwendungsmöglichkeiten als Konstruktionsleichtbeton, in Mörtelrezepturen sowie im Gala-, Wege- und Erdbau anbieten. Die Untersuchungen zur Sulfatentfrachtung sind vor dem Hintergrund fehlender Quellen für Gips und der Verwertung von sulfathaltigen Bau- und Abbruchabfällen wissenschaftlich aber auch wirtschaftlich relevant.

Durch eine Nutzung von Bau- und Abbruchabfällen zur Herstellung von Leichtgranulaten und deren Einsatz als leichte Gesteinskörnung in Beton, Mörtel, Substraten und anderen Bauprodukten erweitern die Baustoffindustrie und die Baufirmen ihre Produktpalette auf der Basis von Sekundärrohstoffen. Für Unternehmen des Recyclings und der Bauschuttverwertung wurde ein neues Absatzgebiet für Mauerwerkbruch erschlossen. Für verfahrenstechnisch ausgerichtete Unternehmen ergeben sich aus der neu entwickelten Technologie neue Aspekte für den Anlagenbau und eine innovative Kombination herkömmlicher Maschinenaggregate. Ebenso tragen die im Rahmen des Projekts erzielten Ergebnisse zur Verbesserung der Akzeptanz von neuen Technologien für das (Baustoff-)Recycling bei und bilden durch einen deutlichen nationalen und internationalen Kompetenzzuwachs auf diesem Gebiet die Grundlage für weitere Forschungsprojekte des F.A. Finger-Instituts der koordinierenden Bauhaus-Universität Weimar und aller Projektpartner. Mit dem Projekt wurden grundlegende Voraussetzungen für eine neue Technologie für das Recycling von bisher ungenutzten Bau- und Abbruchabfällen geschaffen.

Die wissenschaftliche Verwertung erfolgte und erfolgt bereits im Rahmen von Lehrveranstaltungen sowie wissenschaftlichen Arbeiten. Im Rahmen des Projektes entstanden mehr als 15 Publikationen/wissenschaftliche Arbeiten bzw. sind noch in Vorbereitung (siehe Punkt 2.5).

## **2.4 Während des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte anderer Stellen**

Während der Projektbearbeitungsdauer sind bei anderen Stellen außerhalb des Verbunds keine Fortschritte zum bearbeiteten Thema bekannt geworden.

## **2.5 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse**

Die in regelmäßigen Abständen durchgeführten 5 Projekttreffen hatten das Ziel, den Forschungsstand innerhalb der Projektgruppe darzustellen und zu diskutieren. Dabei wurden die aktuellen Resultate vorgestellt. Die Projektergebnisse wurden auf Tagungen und in Workshops vorgestellt sowie in Zeitschriften und Tagungsbänden publiziert. Anlässlich des Projektabschlusses fand im Januar 2024 an der BAM ein wissenschaftliches Kolloquium zum Thema „Nachhaltig effizient – Ressourcen des zukünftigen Bauens“ mit etwa 100 Teilnehmenden statt. Neben der Vorstellung der wesentlichen Projektergebnisse durch verschiedene Projektpartner waren weitere namhafte Referenten und Referentinnen eingeladen, die die Themen Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz im Bauwesen aus unterschiedlichen Blickwinkeln beleuchteten. Gleichzeitig bot die Veranstaltung Zeit für Diskussionen und fachlichen Austausch. Nachfolgend eine Liste der Publikationen:

Constanze Müller, Julia Seher, Nicole Pniok, Bianka Dreisow, Katrin Rübner:  
Formulation and characterization of restoration repair mortars with lightweight aggregates made from masonry rubble, Journal of Cultural Heritage (2024), in Vorbereitung

Constanze Müller, Julia Seher, Falk Martin, Alexander Schnell, Katrin Rübner:  
Leichtgranulate aus gemischtem Mauerwerkbruch für die Anwendung in Infraleichtbeton, BFT International 07/2024, S. 52 – 59

Schnell, A.; Rübner, K.; Seher, J.; Müller, C.; Müller, A.; Liebezeit, S; Fenner, J.; Martin, F.; Pniok, N.:  
Manufacturing and application of lightweight aggregates from construction and demolition waste. In: Themenheft Recycling von Kompositwerkstoffen, Chemie Ingenieur Technik 2024. <https://doi.org/10.1002/cite.202300211>

Seher, J.; Rübner, K.; Müller, C.; Pniok, N.; Dreisow, B.  
Leichte Gesteinskörnungen hergestellt aus Bau- und Abbruchabfällen – Applikation in der Denkmalpflege. 21. Internationale Baustofftagung ibausil, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar, 2023, <https://doi.org/10.1002/cepa.2839>

Schnell, A.; Rübner, K.; Seher, J.; Müller, A.; Liebezeit, S.; Fenner, J.; Martin, F.; Pniok, N.:

REALight - Leichtgranulate und REA-Gips aus fein-körnigen sulfatbelasteten Bau- und Abbruchabfällen und industriellen Nebenprodukten. 21. Internationale Baustofftagung ibausil, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar, 2023, <https://doi.org/10.1002/cepa.2839>

Liebezeit, S.; Müller, A.

Leichte Gesteinskörnungen aus Mauerwerkbruch – Ergebnisse der kleintechnischen Versuche. 21. Internationale Baustofftagung ibausil, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar, 2023, <https://doi.org/10.1002/cepa.2838>

Julia Seher, Katrin Rübner, Constanze Müller, Falk Martin, Nicole Pniok, Bianca Dreisow:

Lightweight aggregates made from construction and demolition waste – application in lightweight concrete and mortars, in proceedings of V International Conference of Recycling in the Built Environment, Weimar 2023, RILEM PRO 137, RILEM Publications S.A.R.L., Champs-sur-Marne 2023, pp 85-92.

Jacob Fenner, Andrej Zeller, Steffen Liebezeit, Manuela Knorr, Alexander Schnell, Luka Mettke, Daniel Goldmann

Investigation of industrial residues and waste materials to expand the raw material base for the production of lightweight aggregates, Presentation at RAWMAT 2<sup>nd</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON RAW MATERIALS AND CIRCULAR ECONOMY, Athens, August 28<sup>th</sup> 2023, publ. in: Mater. Proc. 2023, 15, 71, [doi.org/10.3390/materproc2023015071](https://doi.org/10.3390/materproc2023015071)

Rübner, K.; Seher, J.; Müller, A.; Schnell, A.; Müller, C.; Liebezeit, S.; Martin, F.

REALight – Leichtgranulate und REA-Gips aus feinkörnigen sulfatbelasteten Bau- und Abbruchabfällen und industriellen Nebenprodukten. In: Mauerwerk Kalender 2024, Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, 2024

Schnell, A.

Das Verbundprojekt REALight. Vortrag, Kolloquium „Nachhaltig effizient – Ressourcen des zukünftigen Bauens“, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, 18. Januar 2024

Liebezeit, S.

Leichte Gesteinskörnungen aus Mauerwerkbruch – Ergebnisse der kleintechnischen Versuche. Vortrag, Kolloquium „Nachhaltig effizient – Ressourcen des zukünftigen Bauens“, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, 18. Januar 2024

Fenner, J.

Rohstoffassessment zur Erweiterung der Rohstoffbasis. Vortrag, Kolloquium „Nachhaltig effizient – Ressourcen des zukünftigen Bauens“, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, 18. Januar 2024

Schumann, N.

Bauschutttaufbereitung und Leichtgranulate im Garten- und Landschaftsbau. Vortrag, Kolloquium „Nachhaltig effizient – Ressourcen des zukünftigen Bauens“, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, 18. Januar 2024

Seher, J.

Anwendung der Leichtgranulate in Mörtel und Beton. Vortrag, Kolloquium „Nachhaltig effizient – Ressourcen des zukünftigen Bauens“, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, 18. Januar 2024

Schnell, A.; Rübner, K.; Seher, J.; Müller, C.; Müller, A.; Liebezeit, S; Fenner, J.; Martin, F.; Pniok, N.:

Manufacturing and application of lightweight aggregates from construction and demolition waste. In: Themenheft Recycling von Kompositwerkstoffen, Chemie Ingenieur Technik 2024 <https://doi.org/10.1002/cite.202300211>

Schnell, A.:

REALight – Leichtgranulate und REA Gips aus feinkörnigen sulfatbelasteten Bau und Abbruchabfällen und industriellen Nebenprodukten, Vorträge und Poster zu den ReMin Statuskonferenzen:

- Auftaktveranstaltung Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Bauen und Mineralische Stoffkreisläufe (ReMin) Clausthal-Zellerfeld, 7.7.2022
- Statuskonferenz Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Bauen und Mineralische Stoffkreisläufe (ReMin) Clausthal-Zellerfeld, 21.6.2023
- Abschlusskonferenz Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Bauen und Mineralische Stoffkreisläufe (ReMin) Clausthal-Zellerfeld, 20.6.2024

## Quellen

- [1] Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB), Anhang 10: Anforderungen an bauliche Anlagen bezüglich der Auswirkungen auf Boden und Gewässer (ABuG), Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Berlin 2023, S. 239-259
- [2] Riley, C.M., Relation of chemical properties to the bloating of clays. J. Am. Ceram. Soc. 34, 1951, S. 121–128
- [3] White, W.A., Lightweight aggregate from Illinois shales. Illinois State Geological Survey, Urbana, Circular 290, 1960
- [4] Choudhry, V.; Kwan, S.; Hadley, S. R., Utilization of Lightweight Materials Made from Coal Gasification Slags. Cooperative Agreement No. DE-FC21-94MC30056. Final Technical Report, 2001
- [5] Hannig, H.; Wachtl, K., Beitrag zur Ermittlung von Apparatekennlinien an Drehrohröfen für die Herstellung von Blähton. Dissertation, HAB Weimar, 1982
- [6] Kool, M. (Argex), Persönliche Mitteilung 2022
- [7] Vogt, R.; Jahn, A., Rohstoffenthalpie grobkeramischer Rohstoffe (Teil 1). Ziegelindustrie International, April 2021
- [8] W. M. Swift et al., Decomposition of Calcium Sulfate: A review of the literature. Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois, 1976
- [9] Müller, A.; Liebezeit, S.; Palzer, U., Aufbaukörnungen aus gipshaltigem Ziegelmauerwerk. In Mauerwerk-Kalender 2023, D. Schermer und E. Brehm [Hrsg.], 2023, S. 317-324.
- [10] Julia Seher, Katrin Rübner, Constanze Müller, Falk Martin, Nicole Pniok, Bianca Dreisow, Lightweight aggregates made from construction and demolition waste – application in lightweight concrete and mortars, in proceedings of V International Conference of Recycling in the Built Environment, Weimar 2023, RILEM PRO 137, RILEM Publications S.A.R.L., Champs-sur-Marne 2023, pp 85-92.
- [11] Rübner, K.; Seher, J.; Müller, A.; Schnell, A; Müller, C; Liebezeit, S; Martin, F.

REALight – Leichtgranulate und REA-Gips aus feinkörnigen sulfatbelasteten Bau- und Abbruchabfällen und industriellen Nebenprodukten. In: Mauerwerk Kalender 2024, Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, 2024

- [12] Liaver – Expanded Glass technologies, [www.liaver.com](http://www.liaver.com), letzter Zugriff 14.03.2023
- [13] Celitement – Das neue hydraulische Bindemittel, [www.celitement.de](http://www.celitement.de), letzter Zugriff 14.03.2023
- [14] Constanze Müller, Julia Seher, Falk Martin, Alexander Schnell, Katrin Rübner: Leichtgranulate aus gemischtem Mauerwerkbruch für die Anwendung in Infraleichtbeton, BFT International 07/2024, S. 52 - 59
- [15] Infraleichtbeton. Schlaich, Mike; Hückler, Alex; Lösch, Claudia. [Hrsg.] Konrad Bergmeister, Frank Fingerloos und Johann-Dietrich Wörner. Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 2021, Beton-Kalender 2021: Fertigteile; Integrale Bauwerke, S. 909-952.
- [16] C. Lösch, A. Hückler, M. Schlaich, Infraleichtbeton: Grundlagen, bauphysikalische Eigenschaften und Referenzbauwerke, Bauphysik, 2019, 41. Jg., Nr. 1, S. 1-6
- [17] M. Schlaich, A. Hückler, Infraleichtbeton: Reif für die Praxis, Beton- und Stahlbetonbau, 2017, 112. Jg., Nr. 12, S. 772-783
- [18] Schnell, A.; Rübner, K.; Seher, J.; Müller, A.; Liebezeit, S.; Fenner, J.; Martin, F.; Pniok, N.:  
REALight - Leichtgranulate und REA-Gips aus fein-körnigen sulfatbelasteten Bau- und Abbruchabfällen und industriellen Nebenprodukten. 21.  
Internationale Baustofftagung ibausil, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar, 2023, <https://doi.org/10.1002/cepa.2839>