

ORIGINAL ARTICLE



REALight - Leichtgranulate und REA-Gips aus feinkörnigen sulfatbelasteten Bau- und Abbruchabfällen

Alexander Schnell¹ | Katrin Rübner² | Julia Seher² | Anette Müller³ | Steffen Liebezeit³ | Jacob Fenner⁴ | Falk Martin⁵ | Nicole Pniok⁶

Korrespondenz

Dipl.-Ing. Alexander Schnell
Bauhaus-Universität Weimar
F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde
Coudraystr. 11
99423 Weimar
E-Mail: alexander.schnell@uni-weimar.de

- ¹ Bauhaus-Universität Weimar
² Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin
³ IAB - Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH, Weimar
⁴ Technische Universität Clausthal Institut für Aufbereitung, Recycling und Kreislaufwirtschaftssysteme (IFAD), Clausthal-Zellerfeld
⁵ Beton und Naturstein Babelsberg GmbH, Potsdam
⁶ Opus Denkmalpflege GmbH, Berlin
alle Deutschland

Kurzfassung

Ziel des Projekts REALight ist die Entwicklung einer Referenzanlage zur Herstellung von Leichtgranulaten (leichte Gesteinskörnungen) aus Bau- und Abbruchabfällen und zur Gipsrückgewinnung. Als Rohstoffe werden bisher ungenutzte oder auf niedrigerem Niveau eingesetzte Bau- und Abbruchabfälle und industrielle Nebenprodukte verwendet. Als Produkte werden leichte Gesteinskörnungen hergestellt. Die Sulfatabtrennung durch eine thermische Zersetzung bildet die Grundlage für die zusätzliche Gewinnung von Rauchgasentschwefelungs-Gips (REA-Gips). Das Projekt wird im Rahmen der Fördermaßnahme „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Bauen und Mineralische Stoffkreisläufe (ReMin)“ gefördert. ReMin ist eine Maßnahme zur Umsetzung des BMBF-Forschungskonzepts „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft“ als Teil der BMBF Strategie „Forschung für nachhaltige Entwicklung – FONA“. Ziel der Förderung ist es, den Ausbau der Kreislaufwirtschaft voranzutreiben. Im Mittelpunkt steht dabei die Bauwirtschaft mit ihrer hohen Nachfrage nach Rohstoffen und gleichzeitig großen Mengen an anfallenden mineralischen Abfällen. Am Projekt REALight sind 12 Partner aus verschiedenen Bereichen der Baustoffherstellung und -anwendung, Abfallaufbereitung, Verfahrenstechnik sowie Forschung und Entwicklung beteiligt.

Schlüsselwörter

Baustoffrecycling, Leichtgranulate, Gips, leichte Gesteinskörnungen, Drehrohrofen, Recycling, Mauerwerkbruch, Infraleichtbeton

1 Motivation

In Deutschland fallen jährlich mehr als 60 Millionen Tonnen Bauschutt an, der aus Beton- und Mauerwerkbruch besteht [1]. Gemischter Mauerwerkbruch ist in seiner Verwertung stark eingeschränkt, da er als Gemisch verschiedener Wandbaustoffe wie Ziegel verschiedener Güte, Kalksandstein, Leichtbeton und Porenbeton sowie Mörtel und Putz anfällt. Der Hauptgrund für die schlechte Verwertbarkeit sind die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der einzelnen Baustoffkörnungen, beispielsweise ihre Porosität und Festigkeit, ihr Frostwiderstandverhalten oder das Vorhandensein von Störstoffen, wie sulfathaltige Bestandteile. Der Einsatz ist deshalb auf Anwendungen mit geringen Qualitätsanforderungen, wie beispielsweise die Verfüllung von Schächten und Gruben vor Ort auf Baustellen oder für Baumaßnahmen und Profilierungen auf Deponien beschränkt. Bei hohen Sulfatgehalten kann der Einsatz sogar für diese Anwendungen aus Gründen des Grundwasserschutzes unzulässig sein. Um

eine kostenintensive und nicht kreislaufgerechte Deponierung zu vermeiden, müssen völlig neue Wege der Baustoffaufbereitung und -verwertung eingeschlagen werden. In den deutschen Kohlekraftwerken werden pro Jahr mehr als 6 Millionen Tonnen REA-Gips produziert, die nahezu vollständig in der Gips- und Zementindustrie als Rohstoff eingesetzt werden [2]. Mit dem umweltpolitisch notwendigen Ausstieg aus der Energiegewinnung aus Kohle wird dieser wertvolle Sekundärrohstoff wegfallen. Hier müssen Ersatzquellen erschlossen werden. Die Probleme der Verknappung heimischer Primärrohstoffe und des fehlenden REA-Gipses wird durch aktuelle Publikationen, beispielsweise der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe [3] und des Umweltbundesamtes [4] bekräftigt. Der Bedarf an leichten Gesteinskörnungen und Gips für das Bauwesen wird aller Voraussicht nach auch in Deutschland in Zukunft nicht rückläufig sein, da bauklimatisch funktionierende, energetisch effiziente Gebäude nicht nur im Trend liegen, sondern eine tragende Säule für das nachhaltige Bauen sind [5].

Vor diesem Hintergrund ist die die Zielstellung des Forschungsprojekts REALight von großer volkswirtschaftlicher Relevanz. Schwerpunkt von REALight ist die Weiterentwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von Leichtgranulaten unter Erweiterung der Technologie, um Gips zurückzugewinnen und weitere mineralische Einsatzstoffe zu nutzen [6]. Dazu werden in einem thermischen Verfahren mineralische Bau- und Abbruchabfälle über ein rohstoffliches Recycling, d. h. einen thermisch-chemischen Stoffumwandlungsprozess, zu leichten Gesteinskörnungen verarbeitet. Im Bauschutt vorhandene Sulfate werden dabei zersetzt und mit Hilfe einer anschließenden Rauchgaswäsche wieder abgetrennt. Sie können als Ersatz für herkömmlichen REA-Gips verwendet werden.

2 Prozessschema und Erkenntnisse aus bereits abgeschlossenen Projekten

2.1 Prozessschema und Rohstoffe

Die Projektidee, leichte Gesteinskörnungen aus Bauschutt herzustellen, hat ihren Ursprung bereits Anfang der 2000er Jahre. An der Bauhaus-Universität Weimar wurden im Labor an einem Gemisch aus Mauerwerkbruch und Porenbeton erste Vorversuche durchgeführt [7]. Auf der Basis dieser erfolgreichen Tests wurde eine Technologie zur Herstellung von Leichtgranulaten aus ziegelhaltigen Bau- und Abbruchabfällen durch thermische Porosierung entwickelt, die in Abbildung 1 dargestellt ist. In einem mehrstufigen mechanischen Prozess mit Brechen, Sieben, Mahlen, Blähmittelzugabe, Homogenisieren und finalem Granulieren werden die Grüngranulate hergestellt. Im Anschluss erfolgt im Drehrohrföfen eine thermische Behandlung der Granulate, die zu ihrer Volumenzunahme bei gleichzeitiger Verfestigung führt.



Abbildung 1 Prozessschema zur Herstellung von leichten Gesteinskörnungen aus Mauerwerkbruch

Die Ergebnisse aus den Projekten „Aufbaukörnungen“ (BMBF, FONAR², koordiniert durch die Bauhaus-Universität Weimar) [8], „RC-Leichtgranulate“ (BMWⁱ, ZIM, koordiniert durch die Bauhaus-Universität Weimar) [9] und „Vietgran“ (BMWⁱ, ZIM, koordiniert durch das IAB - Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH) [10] bildeten insgesamt die Grundlage für die Technologie zur Herstellung von Leichtgranulaten aus feinkörnigen und heterogenen Bau- und Abbruchabfällen. Aus mineralischen Bauabfällen mit Ziegelgehalten zwischen 30 und 100 Masse-% sowie aus Gemischen von Bauschutt und Tonen konnten dabei Leichtgranulate mit Rohdichten zwischen 250 und 1700 kg/m³ hergestellt werden. Weitere Erkenntnisse zu den Prozessparametern waren:

- günstige Partikelgröße des Aufgabematerials < 100 µm mit mehrgipfliger Verteilung
- Blähmittelanteil Siliciumcarbid-Pulver (SiC) zwischen 1 und 3 Masse-%
- SiC-Abfälle aus Schleif- und Schneidprozessen sind verwendbar

- erforderliche Brenntemperatur im Drehrohrföfen 1180 bis 1230 °C bei Verweilzeiten von bis zu 12 min
- erste Nachweise der Eignung als leichte Gesteinskörnung

Die Ergebnisse aus diesen bereits abgeschlossenen Projekten zur Herstellung von leichten Gesteinskörnungen haben bereits Eingang in zahlreiche Veröffentlichungen gefunden [8-22].

Es wurden inzwischen unterschiedlichste Rohstoffe analysiert und daraus Leichtgranulate im Labormaßstab hergestellt. Die Palette der Ausgangsstoffe reichte von Mauerwerkbruch, sortenreinen Abbruchziegeln, Leichtbetonbruch, Altglas, bis zu lehmigen Böden, blähfähigen und nicht blähfähigen Tonen sowie Schiefern. Zur Erweiterung der Rohstoffbasis erfolgten erste Untersuchungen mit sogenannten Shredder-Sanden [23]. Dabei zeigte sich, dass die Einschätzung der Eignung verschiedener Ausgangsmaterialien anhand ihrer Lage im Dreistoffdiagramm Al₂O₃-SiO₂-Flussmittel nach Riley [24] und White [25] (Abbildung 2) nur bedingt möglich ist.

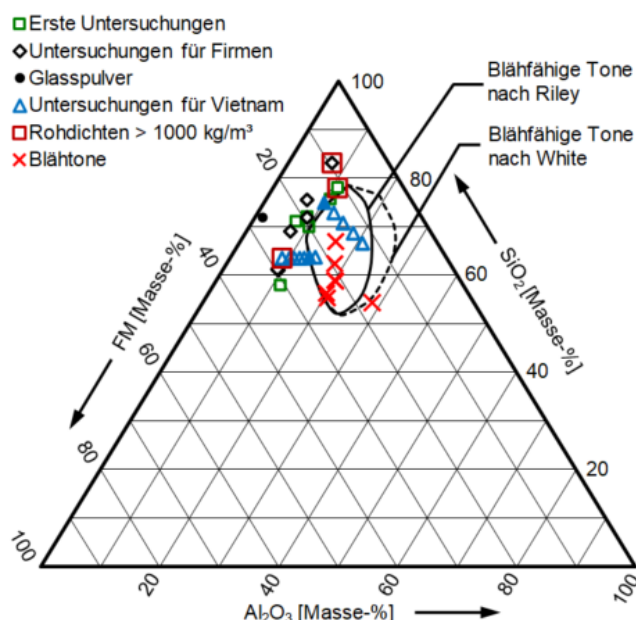


Abbildung 2 Dreistoffdiagramm mit Rohstoffen, die zu Leichtgranulaten verarbeitet wurden (mit blähfähigen Materialien innerhalb des Blähbereichs und ungeeigneten Materialien außerhalb)

Auch Rohstoffe, die etwas außerhalb der für blähfähige Tone definierten Bereiche lagen, waren zur Leichtgranulatherstellung geeignet, andere Rohstoffe in unmittelbarer Nähe hingegen nicht. Vom technologischen Standpunkt folgt daraus, dass das Produkt robust gegenüber Schwankungen der chemischen Zusammensetzung des Ausgangsmaterials ist und bestimmte Schwankungsbreiten toleriert werden können. Vom wissenschaftlichen Standpunkt ist dies jedoch nicht befriedigend.

2.2 Ansätze zum Scale-up

Neben den Laborversuchen wurden größere Mengen Leichtgranulate, aus Mauerwerkbruch [8] und Mauerwerkbruch-Ton-Gemischen [9, 11], bisher nur in einzelnen

Das Potential des Prozesses für eine Sulfatentfrachtung wurde bestätigt. Welche SO₂-Konzentration sich letztlich bei Verwendung sulfathaltiger Ausgangsmaterialien im Rauchgas ergeben und ob hier eine Rückgewinnung von verwertbarem REA-Gips möglich ist, muss untersucht werden.

3 REALight – Verbundstruktur und Aufgaben

Das Verbundprojekt BMBF ReMin - REALight mit dem Ziel der Entwicklung einer Referenzanlage zur Leichtgranulatherstellung und Gipsrückgewinnung wurde in folgende Schwerpunkte unterteilt:

- Rohstoffassessment zur Erweiterung der Rohstoffbasis über Bau- und Abbruchabfälle hinaus einschließlich notwendiger Vorbehandlung und Aufbereitung
- Entwicklung der 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

Am Verbundprojekt [6] sind 12 Partner aus verschiedenen Bereichen der Baustoffherstellung und -anwendung, Abfallaufbereitung, Verfahrenstechnik sowie Forschung und Entwicklung beteiligt. Tabelle 2 enthält einen Überblick der Projektpartner und ihrer Arbeitsschwerpunkte.

Tabelle 2 Projektpartner in BMBF ReMin - REALight

Verbundpartner in BMBF ReMin REALight	Schwerpunkt im Teilprojekt
Bauhaus-Universität Weimar	Koordination
IAB - Institut für angewandte Bauforschung Weimar gGmbH	Pilotanlage, Granulatherstellung und -charakterisierung, Blähstudien
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)	Typprüfung LWA, Umweltverträglichkeit, Mörtel- und Betonprüfungen
Technische Universität Clausthal, IFAD	Erweiterung Rohstoffbasis
T.B.R. Teltower Baustoffrecycling GmbH	Garten- und Landschaftsbau
Mendiger Basalt Schmitz Naturstein GmbH & Co.KG	Mineralische Reststoffe
Beton und Naturstein Babelsberg GmbH	Leichtbeton, Musterbauteile
Sievert Baustoffe GmbH & Co. KG	Trockenmörtel und Mörtelsysteme
Heidemann Recycling Thüringen GmbH & Co. KG	Bau- und Abbruchabfälle
Opus Denkmalpflege GmbH	Steinergänzungsmörtel in der Denkmalpflege
IBU-tec advanced materials AG	Thermische Verfahrenstechnik
HanseGrand Klimabaustoffe e.K.	Ungebundene Systeme

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, die dann gezielt eingestellt werden müssen. Dazu wurden in das Projekt nicht nur zwei unterschiedliche Recyclingspezialisten einbezogen, sondern auch vier Unternehmen, die jeweils für die folgenden unterschiedlichen Anwendungsgebiete stehen:

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

In allen 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.

4 Zwischenergebnisse

4.1 Rohstoffassessment

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. Neben feinen Ziegelmaterialein wurden auch Brechsande und Stäube von Grauwacke, Tuff, Rhyolith und Dolomit sowie ein eisenhaltiger Schlamm in die Untersuchungen einbezogen. Die Untersuchungen zum Blähverhalten am IAB Weimar ergaben zumindest für Grauwacke und Rhyolith gute Bläheigenschaften. Eine Zugabe von Fe-Schlamm beeinflusste die Bläheigenschaften dagegen nicht oder nur geringfügig. Die Eignung weiterer Reststoffe, wie Elektroofenschlacke, Konverterschlacken (LDS) und Schlacken aus der Müllverbrennung, wird derzeit noch untersucht. Der Fokus der laufenden Arbeiten liegt auch auf Untersuchungen zur Identifikation wirtschaftlicher Blähmittel als Ersatz für Siliciumcarbid-Pulver (SiC). Bisher wurde noch kein Blähmittel identifiziert, das als vollwertiger Ersatz des kostenintensiven SiC dienen kann und gleichzeitig kontinuierlich in ausreichender Menge am Markt verfügbar ist. Untersuchungen zur Eignung von zwei recycelten SiC-Materialien, Grauwacke und einem SiC-freien Compound als Blähmittel laufen derzeit noch.

4.2 Herstellung der Leichtgranulate und Sulfatabtrennung

In der Pilotanlage der IAB Weimar gGmbH wurden mehrere Versuchskampagnen zur Herstellung von Leichtgranulaten durchgeführt. Abbildung 5 veranschaulicht den

Brennvorgang im direkt beheizten Drehrohrofen, der in Abbildung 6 dargestellt. Die Sulfatabtrennung durch eine thermische Zersetzung bildet die Grundlage für die Gewinnung von REA-Gips. Die grundsätzliche Machbarkeit der Sulfatabtrennung im Brennprozess wurde bestätigt. Durch die erfolgte Installation eines Nasswäschers und einer stationären Gasanalyse soll die Gewinnung von REA-Gips aus dem Rauchgas ermöglicht werden. Weiterführende Untersuchungen sind derzeit noch nicht abgeschlossen.



Abbildung 5 Brennen von Leichtgranulaten im direkt beheizten Drehrohrofen der IAB Weimar gGmbH

Für die Anwendungstests der leichten Gesteinskörnungen bei den Projektpartnern wurden bisher 2,4 Tonnen Leichtgranulate unterschiedlicher Körnung in der Pilotanlage hergestellt. Einen detaillierten Überblick zu den technischen Parametern der Pilotanlage und den aktuellen Ergebnissen der Herstellung der Leichtgranulate gibt der Beitrag „Leichte Gesteinskörnungen aus Mauerwerkbruch“ der IAB Weimar gGmbH auf der ibausil 2023. [28]



Abbildung 6 Drehrohrofen mit 6 Metern Länge und 0,6 Meter Durchmesser am IAB – Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH

4.3 Anwendung der Leichtgranulate

Für die Untersuchungen zum Einsatz in ungebundenen Anwendungen wurden HanseGrand und T.B.R. vorwiegend größere Körnungen zur Verfügung gestellt. Der mögliche Einsatz als Pflanzsubstrat konnte bereits nachgewiesen werden.

Im besonderen Fokus steht die Anwendung der Leichtgranulate in gebunden Systemen, wie in Infraleichtbetonen der Beton und Naturstein Babelsberg GmbH und in leichten Steinersatzmassen der Opus Denkmalpflege GmbH. Die bautechnischen Eigenschaften und die umweltanalytische Unbedenklichkeit der eingesetzten Leichtgranulate werden fortlaufend an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) untersucht. Die Kennwerte Korngrößenverteilung, Schüttdichte, Kornrohddichte, Reindichte, Gesamtkornporosität, Wasseraufnahme und Kornfestigkeit werden bestimmt. Auf schädigende Bestandteile, wie lösliche Alkalien, Schwermetalle, Arsen, TOC, Chlorid und Sulfat, wird ebenfalls geprüft. Die Leichtgranulate erfüllen alle notwendigen Anforderungen.

Der Projektpartner Beton und Naturstein Babelsberg GmbH hat für die Applikationsversuche im Beton Rezepturen für einen Infraleichtbeton unter Verwendung von Blähglas Liaver und des CO₂-armen Bindemittels Celitement entwickelt. An der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) erfolgte eine Anpassung der Betonrezeptur für den Einsatz der Leichtgranulate der Körnungen 2-4 mm und 4-8 mm. Die Gesteinskörnungen der Betonmischung bestanden damit zu etwa 65 Volumen-% aus Leichtgranulaten. Der angestrebte Infraleichtbeton konnte tatsächlich auch mit den Leichtgranulaten hergestellt werden. Er weist folgende Eigenschaften bei Prüfung von Betonwürfeln mit 150 mm Kantenlänge auf: Trockenrohddichte 800 kg/m³, Druckfestigkeit 10,8 MPa, Gesamtporosität 63,5 %. Das angestrebte Ziel der Herstellung eines Infraleichtbetons wurden erreicht. Erste Wandelemente für einen Pavillon wurden damit bereits hergestellt (Abbildung 7).



Abbildung 7 Wandelement aus Infraleichtbeton als Demonstrator (Hersteller: Beton und Naturstein Babelsberg GmbH, Foto: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM))

Die OPUS Denkmalpflege GmbH entwickelt mit feinkörnigen, gebrochenen Leichtgranulaten der Körnung 0-0,5 mm, 0,5-1 mm, 1-2 mm und 2-4 mm leichte Füllmörtel und der Körnung 0-0,5 mm leichte Deckmörtel für die Steinerfüllung von Cottaer Sandstein. Das zweistufige Mörtelsystem soll zum Auffüllen größerer Fehlstellen dienen.

Mit dem Deckmörtel erfolgt eine Anarbeitung der Oberfläche und Ergänzung an den umliegenden Bestand des zu restaurierenden Steins. Für Füll- und Deckmörtel werden kalkbasierte Mörtelsysteme bevorzugt entwickelt. Aber

auch die Zugabe hydraulischer Bindemittelkomponenten wird getestet. Verschiedene Deck- und Füllmörtelrezepturen werden gegenwärtig erprobt. Abbildung 8 zeigt beispielhaft ein Prisma aus Deck- und Füllmörtel auf Kalkbasis. Der Füllmörtel enthält gebrochene Leichtgranulate. Von den am besten geeigneten Mörtelrezepturen werden dann an der BAM die Materialkennwerte, wie z. B. die Festigkeit und das Schwindverhalten, ermittelt. Detaillierte Ergebnisse zur Anwendung der Leichtgranulate in Steinerfüllmassen der Denkmalpflege sind im Beitrag „Leichte Gesteinskörnungen hergestellt aus Bau- und Abbruchabfällen – Applikation in der Denkmalpflege“ der BAM in Zusammenarbeit mit der Opus Denkmalpflege GmbH zur ibausil 2023 zu finden. [29]



Abbildung 8 Prisma aus Deck- und Füllmörtel mit Leichtgranulaten, Mörtel auf Kalkbasis (Opus Denkmalpflege GmbH)

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Eignung von heterogenem ziegelhaltigen Bauschutt als Ausgangsstoff zur Herstellung von leichten Gesteinskörnungen in einem mehrstufigen Prozess wurde wiederholt im Labor und im Technikumsmaßstab nachgewiesen. Das Projekt REALight stellt einen weiteren Schritt für das Scale-up der Technologie dar. Erstmals wird 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.

Vor allem im Bereich feinerer, nicht gebrochener Körnungen für die Anwendung in Leichtmörteln oder Trockenmörtelsystemen sollen im aktuell noch laufenden Projekt weitere Brennversuche und Anwendungstests erfolgen. Außerdem werden weitere grundlegende Untersuchungen an verschiedenen Rohstoffmischungen zum Blähverhalten durchgeführt, um auf Grundlage dieser Erkenntnisse den Herstellungsprozess der Leichtgranulate gezielter steuern zu können. Hierbei wird auch von Interesse sein, ob die beiden untersuchten SiC-Reststoffe als Blähmittel dienen können.

Dank

Das Forschungsprojekt „REALight“ (FKZ 033R257) wird

durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Förderrichtlinie „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Bauen und Mineralische Stoffkreisläufe (ReMin)“ gefördert. „ReMin“ ist Teil des BMBF-Forschungskonzepts „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft“ und zielt auf ressourceneffizientes Bauen sowie die erweiterte Nutzung mineralischer Sekundärrohstoffe aus Baurestmassen, Schlacken, Aschen und bergbaulichen Rückständen ab.

Referenzen

- [1] Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. [Hrsg.] (2023) *Mineralische Bauabfälle Monitoring 2020. Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2020*. Berlin.
- [2] Wirtschaftsverband Mineralische Nebenprodukte e.V. [Hrsg.] (2018) *Produktinformation REA-Gips*.
- [3] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe [Hrsg.] (2017) *Heimische Mineralische Rohstoffe – unverzichtbar für Deutschland!*
- [4] Kommission Nachhaltiges Bauen am Umweltbundesamt (KNBau) [Hrsg.] (2019) *Schonung natürlicher Ressourcen durch Materialkreisläufe in der Bauwirtschaft*. Dessau-Roßlau.
- [5] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit [Hrsg.] (2014) *Leitfaden Nachhaltiges Bauen*. Berlin.
- [6] Bundesministerium für Bildung und Forschung [Hrsg.] (2021) *Projektblatt REALight – Leichtgranulate und REA-Gips aus Bauschutt und industriellen Nebenprodukten*. www.remin-kreislaufwirtschaft.de/fileadmin/ReMin/documents/09_realight.pdf [letzter Zugriff: 1. Feb. 2023]
- [7] Reinhold, M.; Mueller, A. (2002) *Lightweight aggregate produced from fine fractions of construction and demolition waste*. Conference: Design for Deconstruction and Materials Reuse. Karlsruhe, Germany. CIB Publication 272, Paper 3.
- [8] Schnell, A.; Müller, A.; Rübner, K. (2013) *Entwicklung von Leichtgranulaten aus Mauerwerkbruch für die Betonherstellung, Innovative Technologien für Ressourceneffizienz in rohstoffintensiven Produktionsprozessen*. Fraunhofer Verlag, Stuttgart, S. 300-316.
- [9] Rübner, K.; Schnell, A.; Ihlenfeldt, T.; Vöge, M. (2018) *Lightweight concrete with recycling aggregates made from masonry rubble and rubble-clay mixtures*. Proceedings IV International Conference Progress of Recycling in the Built Environment 11-12 October 2018 – Lisbon, Portugal, RILEM Proceedings PRO 124, RILEM Publications S.A.R.L., Paris, S. 323-331.
- [10] Nguyen, H.; Mueller, A.; Nguyen, V.; Nguyen, C. (2021) *Development and characterization of lightweight aggregate recycled from construction and*

- demolition waste mixed with other industrial by-products*. Construction and Building Materials, Volume 313, ISSN 0950-0618.
- [11] Schnell, A.; Rübner, K.; Ihlenfeldt, T.; Vöge, M.; Ludwig, H.-M. (2018) *Leichtbetone mit Recycling-Granulaten aus Mauerwerkbruch-Ton-Mischungen*. Tagungsband der 20. Internationalen Baustofftagung ibausil, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar, Band 2, S. 381-388.
- [12] Müller, A.; Schnell, A.; Rübner, K. (2012) *Aufbaukörnungen aus Mauerwerkbruch*. Chemie Ingenieur Technik 84, S. 1780-1791.
- [13] Müller, A.; Schnell, A.; Rübner, K. (2015) *The Manufacture of Lightweight Aggregates from Recycled Masonry Rubble*. Construction and Building Materials 98, S. 376-387.
- [14] Müller, A.; Weiß, A.; Schnell, A. (2011) *Up-Cycling von Mauerwerkbruch*. Recycling Magazin 04, S. 30-33.
- [15] Schnell, A.; Müller, A. (2011) *Heterogeneous Construction and Demolition Waste as Raw Material for the Production of Lightweight Aggregates*. Proceedings of the 26th International Conference on Solid Waste Technology and Management, Philadelphia, PA, S. 134-140.
- [16] Schnell, A.; Müller, A.; Ludwig, H.-M. (2012) *Heterogener Mauerwerkbruch als Rohstoffbasis zur Herstellung von leichten Gesteinskörnungen*. Tagungsband der 18. Internationalen Baustofftagung ibausil, Band 2, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar, S. 1098-1106.
- [17] Schnell, A.; Müller, A.; Rübner, K.; Ludwig, H.-M. (2012) *Mineralische Bauabfälle als Rohstoff für die Herstellung leichter Gesteinskörnungen*. Recycling und Rohstoffe, Band 5, TK Verlag, Neuruppin, S. 469-494.
- [18] Schnell, A.; Müller, A.; Rübner, K.; Ludwig, H.-M. (2015) *Herstellung von Leichtgranulaten aus mineralischen Reststoffen für die Anwendung in Leichtbetonen und Mörteln*. Tagungsband der 19. Internationalen Baustofftagung ibausil, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar, Band 2, S. 259-266.
- [19] Schnell, A.; Rübner, K.; Vöge, M.; Ludwig, H.-M. (2017) *Halbtechnische Herstellung von Recycling-Granulaten aus Mauerwerkbruch-Ton-Mischungen und ihre Anwendung in Leichtbeton*. In: Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 4., TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, S. 329-342.
- [20] Rübner, K.; Prinz, C.; Adolphs, J.; Hempel, S.; Schnell, A. (2015) *Microstructural characterisation of lightweight granulaes made from masonry rubble*. Microporous and Mesoporous Materials 209, S. 113-121.
- [21] Rübner, K.; Schnell, A.; Peplinski, B.; Zimathies, A.; Hempel, S. (2015) *Mikrostrukturelle und mineralogische Eigenschaften leichter Gesteins-körnungen aus Mauerwerkbruch*. Tagungsband der 19. Internationalen Baustofftagung ibausil, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar, Band 2, S. 1329-1336.
- [22] Rübner, K.; Schnell, A.; Haamkens, F.; Jakubcova, P.; Müller, A. (2012) *Leichtbeton aus Aufbaukörnungen*. Chemie Ingenieur Technik 84, S. 1792-1797.
- [23] Duwe, C.; Schnell, A.; Rübner, K. (2014) *Ein vielversprechender Ansatz*. RECYCLING magazin 07, S. 36-38.
- [24] Riley, C.M. (1951) *Relation of chemical properties to the bloating of clays*. J. Am. Ceram. Soc. 34, S. 121-128.
- [25] White, W.A. (1960) *Lightweight aggregate from Illinois shales*. Illinois State Geological Survey, Urbana, Circular 290.
- [26] Swift, W.M. et al. (1976) *Decomposition of Calcium Sulfate: A review of the literature*. Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois.
- [27] Müller, A.; Liebezeit, S.; Palzer, U. (2023) *Aufbaukörnungen aus gipshaltigem Ziegelmauerwerk*. In Mauerwerk-Kalender 2023, D. Schermer und E. Brehm [Hrsg.] S. 317-324.
- [28] Liebezeit, S.; Müller, A.; Palzer, U. (2023) *Leichte Gesteinskörnungen aus Mauerwerkbruch*. 21. Internationale Baustofftagung ibausil, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar.
- [29] Seher, J.; Rübner, K.; Müller, C.; Pniok, N.; Dreisow, B. (2023) *Leichte Gesteinskörnungen hergestellt aus Bau- und Abbruchabfällen – Applikation in der Denkmalpflege*. 21. Internationale Baustofftagung ibausil, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar.