

# Leichte Gesteinskörnungen hergestellt aus Bau- und Abbruchabfällen – Applikation in der Denkmalpflege

Julia Seher<sup>1</sup> | Katrin Rübner<sup>1</sup> | Constanze Müller<sup>1</sup> | Nicole Pniok<sup>2</sup> | Bianca Dreisow<sup>2</sup>

## Korrespondenz

Dr. Julia Seher  
Bundesanstalt für Materialfor-  
schung und -prüfung (BAM)  
Unter den Eichen 87  
12205 Berlin  
E-Mail: [julia.seher@bam.de](mailto:julia.seher@bam.de)

<sup>1</sup> Bundesanstalt für Materialfor-  
schung und -prüfung (BAM), Ber-  
lin, Deutschland

<sup>2</sup> Opus Denkmalpflege GmbH, Ber-  
lin, Deutschland

## Kurzfassung

Im Rahmen des BMBF-geförderten Forschungsprojekts ReMin – REALight werden in einem Projektteam aus Industriepartnern und Forschungseinrichtungen unter Koordination der Bauhaus-Universität Weimar leichte Gesteinskörnungen aus Bau- und Abbruchabfällen und industriellen Nebenprodukten auf thermischem Weg hergestellt. Die Aufgabe der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) ist es, diese im Drehrohrföfen erzeugten Blähgranulate für gebundene Anwendungen in Beton und Mörtel umfassend zu charakterisieren. Gemeinsam mit der Opus Denkmalpflege GmbH wird die Applikation feiner, gebrochener Blähgranulate in leichten Steinerfüllmörteln für die Restaurierung von Sandsteinobjekten untersucht. Hierzu wird ein zweischichtiges Mörtelsystem bestehend aus einem Füll- und einem Deckmörtel entwickelt. Erste Ergebnisse der Rezepturenentwicklung verschiedener kalkhaltiger Leichtmörtel mit gebrochenen Blähgranulaten werden vorgestellt. Die neuen Leichtmörtel sind hinsichtlich der entwickelten Druckfestigkeit gleichwertig gegenüber herkömmlichen Restauriermörteln.

## Schlüsselwörter

Baustoffrecycling, Mauerwerkbruch, leichte Gesteinskörnungen, Denkmalpflege, Restauriermörtel, Steinerfüllmassen

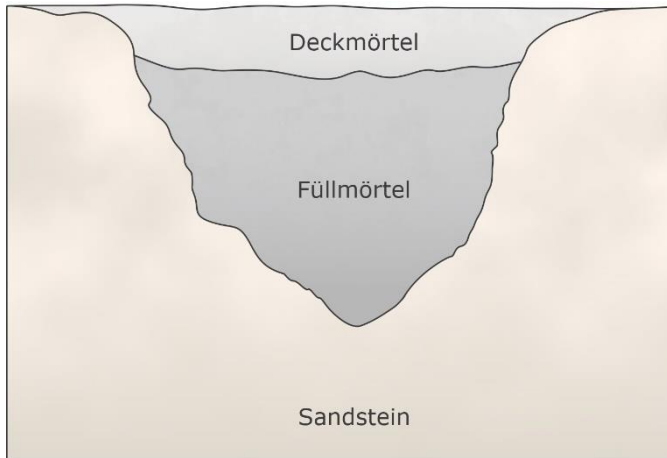
## 1 Einleitung

Die Herstellung und Anwendung von leichten Gesteinskörnungen aus thermisch aufbereiteten Bau- und Abbruchabfällen ist Gegenstand des BMBF-geförderten Forschungsprojekts ReMin – REALight [1]. Die Erzeugung der leichten Gesteinskörnungen erfolgt im Drehrohrföfen über einen thermischen Blähprozess, sodass diese als Blähgranulate bezeichnet werden können. Diese Granulate sind in ihren Eigenschaften Blähtonen sehr ähnlich und können diese in typischen Anwendungen, wie z. B. als Gesteinskörnung in Leichtmörtel und -beton, substituieren. Der Einsatz leichter Gesteinskörnungen, die aus Sekundärrohstoffen hergestellt werden, schont primäre Rohstoffquellen und reduziert die unnötige Deponierung mineralischer Abfälle.

Leichtmörtel können in der Denkmalpflege für die Restaurierung von Natursteinen wie Sandstein eingesetzt werden. Interessant ist dabei das geringere Gewicht der Ergänzungs- masse gegenüber herkömmlichen Produkten. Dies kann speziell bei überhängenden Partien von Architekturteilen von Vorteil sein, bei denen das Eigengewicht des Mörtels eine Ergänzung mittels Restauriermörtel nur schwer haltbar macht. Bei tiefen oder größeren Fehlstellen innerhalb eines Steinquaders spielt das Gewicht des Mörtels weniger eine Rolle.

Die chemischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften und das Erscheinungsbild des zu entwickelnden Leichtmörtels und von Steinerfüllstoffen im Allgemeinen müssen stets individuell auf das Restaurierungsobjekt abgestimmt werden. Das geschädigte Gestein muss bestmöglich nachempfunden werden. Gleichzeitig muss ein langlebiger Verbund zwischen der Ergänzung und dem restaurierten Stein ausgebildet werden, um die Entstehung neuer Schäden sowie Folgeschäden durch die ausgeführten Maßnahmen zu vermeiden. Wichtige zu berücksichtigende physikalische und mechanische Kenngrößen sind hierbei unter anderem Druckfestigkeit, Schwindverformung, dynamischer Elastizitätsmodul, Feuchtedehn-, Wärmedehn- und Wasseraufnahmekoeffizient, Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl und Haftzugfestigkeit [2].

Im Rahmen des Forschungsprojekts REALight erfolgt die Entwicklung von Leichtmörteln unter Verwendung von gebrochenen Blähgranulaten zur Restaurierung von Objekten aus Cottaer Sandstein. Dieser Naturstein fand und findet vielfach für zierende Bauelemente Verwendung. Für das Schließen größerer Fehlstellen eignet sich ein zweischichtiges Mörtelsystem bestehend aus einem Füll- und einem Deckmörtel. Abbildung 1 zeigt schematisch den Aufbau des Mörtelsystems. Der Füllmörtel (F) dient zum



**Abbildung 1** Restaurierung einer Fehlstelle mit dem zweischichtigen Mörtelsystem aus Deck- und Füllmörtel

Ausgleich größerer Volumina, wohingegen der Deckmörtel (D) zur Anarbeitung an den Bestand des zu restaurierenden Steins verwendet wird. Als Restauriermörtel werden bevorzugt kalkhaltige Mörtelsysteme eingesetzt. Die Druckfestigkeit der Mörtel darf nicht zu hoch sein und sollte maximal 60 % der des zu bearbeitenden Gesteins betragen. Die Ergänzung soll das schwächste Glied im Verbund sein. Bei einem Verlust oder Schaden des Mörtels soll das System entweder im Mörtel selbst oder an der Grenzfläche versagen, jedoch niemals im Stein [2].

Der Einsatz puzzolanischer und hydraulischer Bindemittel zur Anpassung der Druckfestigkeiten leichter, kalkhaltiger Restauriermörtel unter Verwendung von gebrochenen Blähgranulaten wird gegenwärtig erprobt. Erste Ergebnisse werden nachfolgend vorgestellt.

## 2 Herstellung der Blähgranulate

Die für die Entwicklung leichter Restauriermörtel verwendeten gebrochenen Blähgranulate wurden durch das IAB – Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH im Rahmen des gemeinsamen Forschungsprojekts REALight zur Verfügung gestellt [1]. Die Blähgranulate wurden aus gemischtem Mauerwerkbruchmehl, welches aus 60 Ma.-% Dachziegeln und 40 Ma.-% Betonbruch bestand, unter Zugabe von 2 Ma.-% SiC-Pulver als Blähmittel im Drehrohofen hergestellt [3-4]. Anschließend wurden diese Blähgranulate der Körnung 4-16 mm im Backenbrecher zerkleinert und der Bruch in verschiedene Fraktionen gesiebt.

## 3 Versuchsdurchführung

### 3.1 Charakterisierung der Blähgranulate

Die Charakterisierung der gebrochenen Blähgranulate erfolgte nach DIN EN 13055:2016-11 [5]. Die Korngrößenverteilungen wurden mittels Trockensiebung nach DIN EN 933-1:2012-03 bestimmt [6]. Die Kornform wurde mit dynamischer Bildanalyse (CAMSIZER®, Retsch) charakterisiert. Die Bestimmung der Wasseraufnahme und der Kornrohddichte der Blähgranulate erfolgte nach DIN EN 13055:2016, Anhang D bzw. dem BVK-Prüfverfahren mit 10 min Wassersättigung [5,7]. Die Reindichte der gebrochenen Blähgranulate wurde nach DIN 66137-2:2019-03 mit Heliumpyknometrie bestimmt [8]. Die Berechnung der Gesamtporosität erfolgte abschließend nach DIN 66137-1:2019-03 [9].

Zur Bestimmung der Umweltverträglichkeit wurden von den einzelnen Blähgranulatfraktionen wässrige Eluate (Feststoff/Wasser = 1 kg/10 L) im Schüttelverfahren nach DIN EN 12457-4:2003-01 hergestellt [10]. Die Ergebnisse wurden in Anlehnung an die Anforderungen an bauliche Anlagen bezüglich der Auswirkungen auf Boden und Gewässer (ABuG) für rezyklierte Gesteinskörnungen bewertet [11]. Für die Prüfung der wasserlöslichen Alkalien wurde jeweils eine aufgemahlene und getrocknete Granulatprobe im Verhältnis 1:50 mit demineralisiertem Wasser versetzt und eine Stunde bei Raumtemperatur geschüttelt. Die Konzentration der Natrium- und Kaliumionen wurde mittels Ionenchromatografie bestimmt [12].

### 3.2 Mörtelherstellung und -prüfung

Als Bindemittel für die kalkbasierten Leichtmörtel wurden Weißkalkhydrat (Fels), natürlich hydraulischer Kalk (Calcidur® NHL 3,5, Otterbein), Tuffmehl und Portlandzement (CEM I 42,5, Dyckerhoff) in unterschiedlich zusammengesetzten Mischungen verwendet. Als Additive kamen Tylose und Rheoplus zum Einsatz. Als Gesteinskörnung wurden die gebrochenen Blähgranulate 0-0,5 mm, 0,5-1 mm und 1-2 mm sowie Quarzsand 0,04-0,25 mm verwendet. Die Zusammensetzungen der Mörtel können Tabelle 1 entnommen werden.

Die Mörtel wurden im Mörtelmischer (DIN EN 196-1:2016-11 [13]) oder manuell hergestellt. Für die Herstellung des Füllmörtels F1 wurde die Gesteinskörnung mit Wasser gesättigt. Die Trockenmörtelmischung, welche im Vorfeld durch Homogenisierung aller trockenen Bestandteile hergestellt wurde, und die wassergesättigte Gesteinskörnung wurden in den Mischer gegeben und 2 min bei niedriger Geschwindigkeit gemischt. Anschließend wurde das Restwasser bei Stillstand des Mixers innerhalb von 1 min hinzugeben und dann 1 min weitergemischt. Für die manuelle Mörtelherstellung (Deckmörtel D1-D4, Füllmörtel F2-F5) wurde Wasser in einer Schüssel vorgelegt, die Trockenmörtelmischung hinzugegeben und 1-2 min gemischt. Vor der Verarbeitung wurden die Frischmörtel jeweils ca. 2 min stehen gelassen und anschließend in Schalungen gefüllt. Ein Verdichten erfolgte durch Verpressen mit Lanzette und Stampfer. Für alle Prüfungen wurden Würfel mit 20 mm Kantenlänge hergestellt.

Die Trockenrohddichte und die Wasseraufnahme der Festmörtel wurden mit dem Drahtkorbverfahren im Probenalter von 40 Tagen in Anlehnung an DIN EN 1097-6:2013-09 bestimmt [14]. Die Prüfung der Druckfestigkeit wurde an mindestens 3 Würfeln pro Mörtelmischung unter Verwendung einer Druck- und Biegeprüfanlage ToniPRAX (Belastungsgeschwindigkeit 240 N/s,  $F_{\max}$  10 kN) durchgeführt. Die Prüfung der Druckfestigkeit erfolgte im Probenalter von 7, 14 und 28 Tagen. Die Prüfkörper wurden jeweils unmittelbar vor der Prüfung der Druckfestigkeit ausgeschalt.

Tabelle 1 Übersicht über die Rezepturen der Deck- und Füllmörtel

Rezeptur	D1 (KT)	D2 (KZ)	D3 (NT)	D4 (NZ)	F1 (KT)	F2 (KT)	F3(KZ)	F4 (NT)	F5 (NZ)
Vol.-% bezogen auf den Trockenmörtel									
CL 90	22,5	12,4	-	-	13,7	25,9	14,1	-	-
NHL 3,5	-	-	22,5	12,4	-	-	-	25,9	14,1
CEM I 42,5	-	12,4	-	12,4	-	-	14,1	-	14,1
Tuff	9,0	-	9,0	-	5,9	10,4	-	10,4	-
Tylose	0,7	0,7	0,7	0,7	0,2	0,7	0,6	0,7	0,6
Rheoplus	-	-	-	-	0,9	-	-	-	-
Quarz	45,1	49,5	45,1	49,5	-	-	-	-	-
BG 0-0,5 mm	22,7	25,0	22,7	25,0	15,9	23,6	28,4	23,6	28,4
BG 0,5-1 mm	-	-	-	-	21,1	22,1	28,7	22,1	28,7
BG 1-2 mm	-	-	-	-	42,3	17,4	14,1	17,4	14,1
w/b	0,97	1,23	0,97	1,23	1,40	0,94	1,20	0,94	1,20

Abkürzungen:

BG = Blähgranulat, w/b = Wasser-Bindemittel-Verhältnis, D = Deckmörtel, F = Füllmörtel

KT = Kalk-Tuff-Mörtel, KZ = Kalk-Zement-Mörtel, NT = Kalk-Tuff-Mörtel auf NHL-Basis, NZ = Kalk-Zement-Mörtel auf NHL-Basis

## 4 Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Eigenschaften der gebrochenen Blähgranulate

Die Sieblinien aller für die Mörtelentwicklung verwendeten Blähgranulate sind in Abbildung 2 gezeigt. Die einzelnen Fraktionen besitzen bis zu 30 % Unterkorn und maximal 3 % Überkorn.

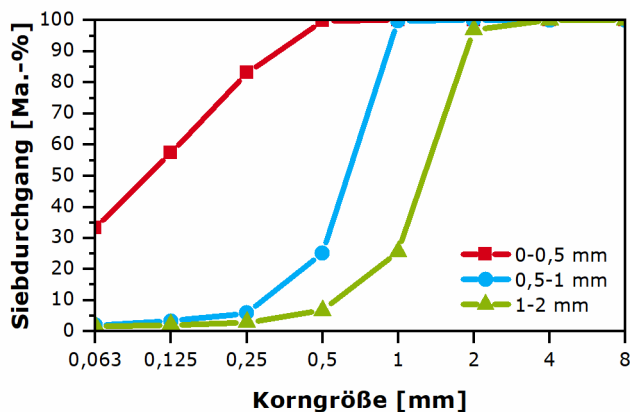


Abbildung 2 Korngrößenverteilung der Blähgranulate (Trockensiebung mit Siebverfahren nach DIN EN 933-1:2012 [6])

Die Kornform der Blähgranulate kann anhand der ermittelten Werte ( $< 1$ ) für die Spherizität und das Seitenverhältnis  $b/l$  (Tabelle 2) als unregelmäßig beschrieben werden, was für gebrochene Körnungen zu erwarten ist. Partikel mit einem Partikeldurchmesser  $< 30 \mu\text{m}$  können mit dem verwendeten Messsystem (CAMSIZER®, Retsch) nicht korrekt vermessen werden, so dass keine Charakterisierung der Fraktion 0-0,5 mm möglich war. Es ist jedoch

ebenfalls von einer unregelmäßigen Kornform auszugehen.

Die physikalischen Eigenschaften der Blähgranulate sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Aufgrund der Kornrohdichten  $\leq 2000 \text{ kg/m}^3$  können die Fraktionen der Blähgranulate als leichte Gesteinskörnungen gemäß DIN EN 13055:2016-11 bezeichnet werden [5]. Die Gesamtporosität und Wasseraufnahme steigen mit der Korngröße von 26,5 % (0-0,5 mm) auf 44,0 % (1-2 mm) bzw. von 13,6 Ma.-% (0-0,5 mm) auf 23,1 Ma.-% (1-2 mm). Dieser Trend liegt in der Korngröße und vor allem der Porenstruktur des ungebrochenen Blähgranulats begründet. Die Korngröße der ungebrochenen Blähgranulate betrug überwiegend 4-16 mm. Blähgranulate besitzen hauptsächlich Makroporen im Bereich von 0,1-320  $\mu\text{m}$  [15]. Beim Zerkleinern der Blähgranulate im Backenbrecher sinkt die Gesamtporosität mit abnehmendem Korndurchmesser. Eine mögliche Ursache hierfür ist, dass die Brüche vorwiegend durch die Poren verlaufen. Je kleiner die Bruchstücke werden, desto mehr Poren werden aufgebrochen.

Die umweltanalytische Prüfung der Blähgranulatfraktionen ergab, dass die Grenzwerte in Anlehnung an die ABuG eingehalten werden [11]. Darüber hinaus lag der Gehalt an wasserlöslichen Alkalien unterhalb der Nachweisgrenze von 0,01 Ma.-%.

**Tabelle 2** Übersicht über die Eigenschaften der gebrochenen Blähgranulate

<b>Kornfraktion</b>	<b>Spherizität</b>	<b>Seitenverhältnis b/l</b>	<b>Kornroh-dichte</b>	<b>Reindichte</b>	<b>Gesamtporo-sität</b>	<b>Wasserauf-nahme</b>
<b>in mm</b>			<b>in kg/m<sup>3</sup></b>	<b>in kg/m<sup>3</sup></b>	<b>in %</b>	<b>in Ma.-%</b>
<b>0-0,5</b>	-	-	1980	2690	26,5	13,6
<b>0,5-1</b>	0,693	0,673	1760	2680	34,5	18,9
<b>1-2</b>	0,765	0,699	1490	2660	44,0	23,1

## 4.2 Mörtelentwicklung

### 4.2.1 Rezepturenentwicklung aus denkmalpflegerischer Sicht

Die Verarbeitbarkeit der Deck- und Füllmörtel aus Sicht der Denkmalpflege standen für die Entwicklung der Mörtelrezepturen zunächst im Vordergrund. Für weiterführende Prüfungen wurden vier Deck- und fünf Füllmörtel ausgewählt (vgl. Tabelle 1), welche sich durch sehr gute Modellierbarkeit, sehr gutes Standvermögen, sehr gute Haftfestigkeit auf Cottaer Sandstein und eine Trocknungszeit von 2-3 Tagen auszeichneten. Die Farbe der Mörtel ist ebenfalls ausschlaggebend für die spätere Anwendung, jedoch können Anpassungen gezielt mit Pigmenten erfolgen. Nur eine zu intensive Eigenfärbung würde die Anwendbarkeit einschränken. Die grau-beige Farbe der Deckmörtel ist für die Restaurierung von Cottaer Sandstein annehmbar.

### 4.2.2 Untersuchungen an den Deck- und Füllmörteln

In der Praxis werden Restauriermörtel in maximal 20 bis 30 mm dicken Schichten aufgetragen, um den Trocknungsprozess zu begünstigen und damit Spannungen im Mörtel und die Gefahr der Schwindrissbildung zu minimieren. Darüber hinaus wird durch das schichtweise Auftragen ein Verlust des angetragenen Frischmörtels durch zu hohe Lasten verhindert. Daher wurden als Prüfkörper für die nachfolgenden Untersuchungen der verschiedenen Mörtelmischungen (vgl. Tabelle 1) kleine Würfel mit einer Kantenlänge von 20 mm ausgewählt. Darüber hinaus kann die Rezepturenentwicklung auf diese Weise materialsparend durchgeführt werden.

In Tabelle 3 wird eine Übersicht über die Trockenroh-dichte und die Wasseraufnahme (24 h) der verschiedenen Mörtel gegeben. Alle mit gebrochenen Blähgranulaten hergestellten Füllmörtel können in Anlehnung an DIN EN 998-2:2017-02 [16] als Leichtmörtel bezeichnet werden, da sie Trockenroh-dichten kleiner 1300 kg/m<sup>3</sup> aufweisen. Die Deckmörtel hingegen besaßen etwas höhere Trockenroh-dichten von etwa 1400 kg/m<sup>3</sup>, was in der Auswahl der Blähgranulatfraktionen begründet ist. Die Wasseraufnahmen betragen 20-32 Ma.-%, wobei die Füllmörtel etwas höhere Wasseraufnahmen erreichten als die Deckmörtel, was auch von der Auswahl der Blähgranulatfraktionen und somit der resultierenden Gesamtporosität der Leichtmörtel verursacht wird. Ein Ziel im weiteren Verlauf des Projekts ist die Annäherung der Wasseraufnahme der Füllmörtel an den Wert des Cottaer Sandsteins von 6-15 Ma.-% [17] durch die Anpassung der Sieblinie der eingesetzten Blähgranulate. Die Bildung von Feuchtigkeitsdepots im Stein-

Mörtel-Verbund soll vermieden werden und damit einhergehend die Bildung von mikrobiellem Befall und die Kristallisation von Salzen, die zu Transportprozessen und Spannungen führen.

In Vorversuchen zur Prüfkörperherstellung nach DIN EN 1015-11 [18] zeigte sich, dass ein Ausschalen der Mörtel innerhalb der ersten sieben Tage nicht möglich war und keine formstabilen Prüfkörper erhalten werden konnten. Um auszuschließen, dass die unzureichende Festigkeit der verschiedenen Mörtelrezepturen nur in der Wahl der Lagerungsbedingungen begründet war und nicht in der Mörtelzusammensetzung, wurde die Druckfestigkeitsentwicklung bei vier verschiedenen Lagerungsbedingungen anhand des Kalk-Tuff-Füllmörtels F1 untersucht. Die Prüfkörper wurden bei einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit (RH) von 30 % RH, 65 % RH und 95 % RH sowie bei 21 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 60 % RH mit erhöhtem CO<sub>2</sub>-Gehalt (4 Vol.-%) für 28 Tage gelagert. Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsentwicklung sind in Abbildung 3 gezeigt. Die höchste Druckfestigkeit (28 d) von 2,4 MPa konnte bei der Lagerung bei erhöhtem CO<sub>2</sub>-Gehalt erreicht werden. Der Überschuss an CO<sub>2</sub> führt

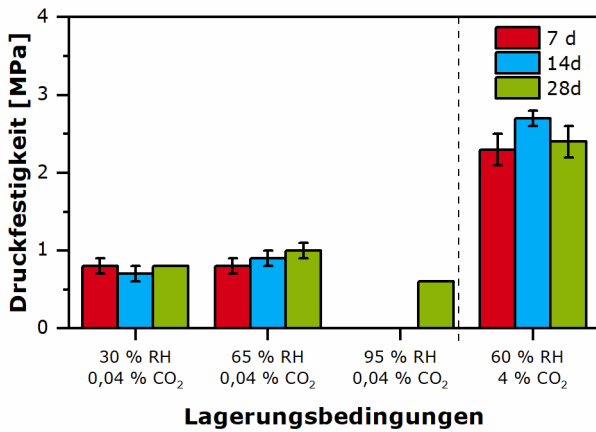
**Tabelle 3** Übersicht über die Trockenroh-dichte und die Wasseraufnahme der Deck- und Füllmörtel im Probenalter von 40 Tagen (Prüfkörper: Würfel mit Kantenlänge 20 mm)

	<b>Trockenroh-dichte</b>	<b>Wasseraufnahme</b>
	<b>in kg/m<sup>3</sup></b>	<b>in Ma.-%</b>
<b>D1 (KT)</b>	1360	23,1
<b>D2 (KZ)</b>	1430	21,3
<b>D3 (NT)</b>	1380	24,1
<b>D4 (NZ)</b>	1430	20,8
<b>F1 (KT)</b>	1100	31,5
<b>F2 (KT)</b>	1250	28,4
<b>F3 (KZ)</b>	1190	30,1
<b>F4 (NT)</b>	1250	26,1
<b>F5 (NZ)</b>	1230	28,3

Abkürzungen:

D = Deckmörtel, F = Füllmörtel

KT = Kalk-Tuff-Mörtel, KZ = Kalk-Zement-Mörtel, NT = Kalk-Tuff-Mörtel auf NHL-Basis, NZ = Kalk-Zement-Mörtel auf NHL-Basis

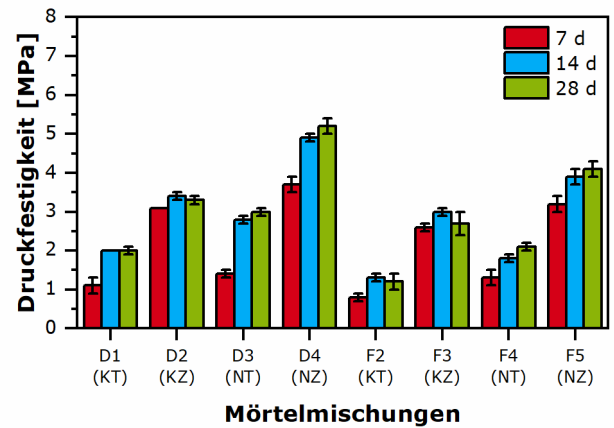


**Abbildung 3** Druckfestigkeitsentwicklung des Kalk-Tuff-Füllmörtels F1 bei verschiedenen Lagerungsbedingungen (Prüfkörper: Würfel mit Kantenlänge 20 mm)

zu einer beschleunigten Carbonatisierung des Mörtels, was zu einem Erreichen der Endfestigkeit in kürzester Zeit führt. Weitere Versuche sind zur Bestimmung der Korrelation und Vergleichbarkeit zwischen natürlicher und beschleunigter Festigkeitsentwicklung der geprüften Leichtmörtel nötig.

Die Lagerung der Prüfkörper bei verschiedenen relativen Luftfeuchtigkeiten und einem natürlichen CO<sub>2</sub>-Gehalt (0,04 Vol.-%) ergab den höchsten Wert der 28 d-Druckfestigkeit von 1,0 MPa bei 65 % RH und den geringsten von 0,6 MPa bei 95 % RH. Die erreichten Werte liegen alle unterhalb der anvisierten Druckfestigkeit der Mörtelklasse M 2,5 (2-3 MPa) [19]. Bei feuchter Lagerung war ein Ausschalen der Prüfkörper vor einem Probenalter von 21 Tagen nicht möglich. Bei einer sehr hohen relativen Luftfeuchtigkeit bleibt der Porenraum im Mörtel überwiegend mit Wasser gesättigt, sodass keine Luft und damit auch kein CO<sub>2</sub> eindringen kann. Die Carbonatisierung des Mörtels bzw. des Kalks wird dadurch behindert und die Festigkeitsentwicklung kann nur sehr langsam voranschreiten. Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 30 % RH konnte noch eine Druckfestigkeit von 0,8 MPa erreicht werden. Eine zu geringe Luftfeuchtigkeit führt zu schnellem Austrocknen des Mörtels, was starkes Trockenschwinden und Rissbildung zur Folge haben kann. Für die weiteren Versuche wurden die Prüfkörper für die Prüfung der Druckfestigkeit ausschließlich bei 20 °C und 65 % RH gelagert, was auch grundsätzlichen Erfahrungen aus der Literatur entspricht [20-21].

Die Druckfestigkeitsentwicklung der ausgewählten Deck- und Füllmörtel wurde bei 20 °C und 65 % RH untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4 dargestellt. Die Mörtel können gemäß ihrer Druckfestigkeit den Mörtelklassen M1, M 2,5 und M 5 zugeordnet werden [16]. Die höchste Druckfestigkeit entwickelte sich nach 28 Tagen bei dem Kalk-Zement-Deckmörtel D4 (5,2 MPa), die geringste beim Kalk-Tuff-Füllmörtel F2 (1,2 MPa). Die angestrebte Druckfestigkeit (28 d) von 3 MPa wurde von nahezu allen zementhaltigen Mörteln erreicht. Die tuffhaltigen Mörtel erzielten durchschnittlich eine Druckfestigkeit von 2 MPa. Die Druckfestigkeitsentwicklung war in der Regel nach 14 Tagen abgeschlossen bzw. es kann keine oder nur eine geringe Steigerung der Druckfestigkeit nach 28 Tagen festgestellt werden. Die Bestimmung der maximal erreich-



**Abbildung 4** Druckfestigkeitsentwicklung der Deck- und Füllmörtel in Abhängigkeit vom Probenalter (Lagerung bei 20 °C und 65 % RH, Prüfkörper: Würfel mit Kantenlänge 20 mm)

baren Druckfestigkeit könnte zusätzlich noch durch beschleunigte Carbonatisierung erfolgen.

Allgemein kann festgestellt werden, dass die Druckfestigkeitsentwicklung der verschiedenen kalkhaltigen Deck- und Füllmörtel den Anforderungen an Restauriermörteln genügen. Der Einsatz der gebrochenen Blähgranulate als leichte Gesteinskörnung in Restauriermörteln ist demnach basierend auf den ersten Prüfergebnissen möglich. Die maximal erreichbare Druckfestigkeit ist vor allem von der Wahl der Bindemittelkombination abhängig, nicht aber von der eingesetzten leichten Gesteinskörnung.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des BMBF-geförderten Forschungsprojekts ReMin – REALight wurde ein zweischichtiges Mörtelsystem aus Deck- und Füllmörtel zur Restaurierung von Cottaer Sandstein entwickelt. Für die Herstellung der leichten, kalkhaltigen Restauriermörtel wurden gebrochene Blähgranulate, die thermisch aus Mauerwerkbruch hergestellt und anschließend aufgebrosen wurden, verwendet. Es konnte gezeigt werden, dass die gebrochenen Blähgranulate 0-2 mm als leichte Gesteinskörnung in Restauriermörteln geeignet sind. Die geprüften Leichtmörtel erzielten Druckfestigkeiten vergleichbar mit denen herkömmlicher Restauriermörtel der entsprechenden Mörtelklassen.

Im weiteren Verlauf des Projekts ist ein umfangreiches Prüfprogramm mit optimierten Mörtelrezepturen geplant. Darin sollen die oben genannten Mörtel Eigenschaften ermittelt werden. Abschließend ist die Erprobung des Mörtelsystems auf einer Musterfläche eines Restaurierungsobjekts aus Cottaer Sandstein geplant.

## 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] Schnell, A.; Rübner K.; Seher, J.; Liebezeit, S.; Müller, A.; Fenner, J.; Martin, F.; Pniok, N. (2023) *REA-Light – Leichtgranulate und REA-Gips aus feinkörnigen sulfatbelasteten Bau- und Abbruchabfällen und industriellen Nebenprodukten*. 21. Internationale Baustofftagung ibausil, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar, Weimar.
- [2] Snethlage, R.; Pfanner, M. (2020) *Leitfaden Steinkonservierung, Planung von Untersuchungen und Maßnahmen zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- [3] Liebezeit, S.; Müller, A.; Palzer, U. (2023) *Leichte Gesteinskörnungen aus Mauerwerkbruch*. 21. Internationale Baustofftagung ibausil, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar, Weimar.
- [4] Müller, A.; Liebezeit, S.; Palzer, U. (2022) *Aufbaukörperungen aus gipshaltigem Mauerwerkbruch – Teil 2: Untersuchungen im Pilotmaßstab*. Chemie Ingenieur Technik. <https://doi.org/10.1002/cite.202200075>
- [5] DIN EN 13055:2016-11 (2016), *Leichte Gesteinskörnungen; Deutsche Fassung EN 13055:2016*. Beuth, Berlin.
- [6] DIN EN 933-1:2012-03 (2012), *Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Siebverfahren; Deutsche Fassung EN 933-1:2012*. Beuth, Berlin.
- [7] Wirtschaftsverband Mineralische Nebenprodukte e. V. (2016) *Merkblatt BVK-Prüfverfahren für Leichtzuschläge*.
- [8] DIN 66137-2:2019-03 (2019) *Bestimmung der Dichte fester Stoffe – Teil 2: Gaspyknometrie*. Beuth, Berlin.
- [9] DIN 66137-1:2019-03 (2019) *Bestimmung der Dichte fester Stoffe – Teil 1: Grundlagen*. Beuth, Berlin.
- [10] DIN EN 12457-4:2003-01 (2003) *Charakterisierung von Abfällen Auslaugung – Übereinstimmungsuntersuchung für die Auslaugung von körnigen Abfällen und Schlämmen, Teil 4: Einstufiges Schüttelverfahren mit einem Flüssigkeits-/Feststoffverhältnis von 10 l/kg für Materialien mit einer Korngröße unter 10 mm (ohne oder mit Korngrößenreduzierung), Deutsche Fassung EN 12457-4:2002*. Beuth, Berlin.
- [11] Deutsches Institut für Bautechnik (2023) *Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB), Ausgabe 2023/1, Anhang 10, Anforderungen an bauliche Anlagen bezüglich der Auswirkungen auf Boden und Gewässer (ABuG)*. Tabelle A-2.
- [12] Knöfel, D.; Schubert P. (1993) *Handbuch Mörtel und Steinerfüllungsmittel in der Denkmalpflege*. Berlin: Ernst & Sohn, Abschnitt 3.6.2.2, S. 49.
- [13] DIN EN 196-1:2016-11 (2016) *Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit; Deutsche Fassung EN 196-1:2016*. Beuth, Berlin.
- [14] DIN EN 1097-6:2013-09 (2013) *Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme; Deutsche Fassung EN 1097-6:2013*. Beuth, Berlin.
- [15] Rübner, K.; Prinz, C.; Adolphs, J.; Hempel, S.; Schnell, A. (2015) *Microstructural Characterisation of Lightweight Granules Made from Masonry Rubble*. *Microporous and Mesoporous Materials* 2015, 209, 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2014.08.060>
- [16] DIN EN 998-2:2017-02 (2017) *Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau – Teil 2: Mauerermörtel; Deutsche Fassung EN 998-2:2016*. Beuth, Berlin.
- [17] Deutsches Naturstein-Archiv (DNSA) [https://www.natursteinonline.de/steinsuche/allgemeine\\_suche.html](https://www.natursteinonline.de/steinsuche/allgemeine_suche.html) [Zugriff: 16. Aug. 2022].
- [18] DIN EN 1015-11:2020-01 (2020) *Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 11: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel; Deutsche Fassung EN 1015-11:2019*. Beuth, Berlin.
- [19] Pacheco-Torgal, F.; Faria, J.; Jalali, S. Some Considerations About the Use of Lime-Cement Mortars for Building Conservation Purposes in Portugal: A Reprehensible Option or a Lesser Evil? *Construction and Building Materials* 2012, 30, 488–494. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.003>
- [20] Alvarez, J. I.; Veiga, R.; Martínez-Ramírez, S.; Secco, M.; Faria, P.; Maravelaki, P. N.; Ramesh, M.; Papayianni, I.; Válek, J. (2021) *RILEM TC 277-LHS Report: A Review on the Mechanisms of Setting and Hardening of Lime-Based Binding Systems*. *Materials and Structures*, 54, 63. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01648-3>
- [21] Groot, C.; Veiga, R.; Papayianni, I.; Hees, R. V.; Secco, M.; Alvarez, J. I.; Faria, P.; Stefanidou, M. (2022) *RILEM TC 277-LHS Report: Lime-Based Mortars for Restoration – a Review on Long-Term Durability Aspects and Experience from Practice*. *Materials and Structures*, 55, 245. <https://doi.org/10.1617/s11527-022-02052-1>