

**Rübner, K., Schnell, A., Haamkens, F., Jakubcová, P., Müller, A.**

## **Leichte Gesteinskörnungen aus Mauerwerkbruch für die Betonherstellung**

### **Einleitung**

Im Forschungsprojekt „Aufbaukörnungen“ wird eine Technologie zur Herstellung hochwertiger Leichtgranulate aus sekundären Rohstoffen auf der Basis von heterogenen und teilweise feinkörnigen Bau- und Abbruchabfällen entwickelt. Im Mittelpunkt der Untersuchungen steht der Mauerwerkbruch. Er fällt in Deutschland mit bis zu 10 Millionen Tonnen pro Jahr an und weist größere Verwertungsdefizite als Betonbruch auf [1]. Der Verwertungsstrategie liegt die Idee des rohstofflichen Recyclings zu Grunde. Das heißt, nicht die physikalisch-mechanischen Eigenschaften des Mauerwerkbruchs, sondern sein Rohstoffpotenzial wird genutzt. Das Recycling baut auf der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung des Ausgangsmaterials auf. Die Leichtgranulate (Aufbaukörnungen) werden am Ende eines mehrstufigen Herstellungsprozesses durch thermische oder hydrothermale Erhärtung produziert.

Ein Einsatzgebiet der Aufbaukörnungen sind die leichten Gesteinskörnungen für gefügedichten Leichtbeton. Die derzeit handelsüblichen leichten Gesteinskörnungen werden hauptsächlich industriell aus natürlichen Rohstoffen, wie Ton und Schiefer, hergestellt. Dabei fallen hohe Energiekosten an, und außerdem sinkt fortwährend die Verfügbarkeit geeigneter Rohstoffe. Andererseits ist in Deutschland das Vorkommen des natürlichen leichten Bimssteins nahezu erschöpft. Andere synthetische leichte Gesteinskörnungen, die aus industrielle Nebenprodukten und Abfällen, wie beispielsweise gesinterter Steinkohlenflugasche, Kesselsand und Altglas, gefertigt werden, erfüllen wiederum nur bedingt die Anforderungen für den Einsatz in hochwertigem Leichtbeton. Eine Alternative stellen hier die Aufbaukörnungen, die die sekundäre Rohstoffquelle Mauerwerkbruch ausbeuten würden, dar. Gemessen an den jährlichen Produktionszahlen von etwa 6,5 Mio. m<sup>3</sup> Leichtbetonmauersteinen, Leichtbetonfertigteilen und Konstruktionsleichtbeton [2-5], ließe sich der gesamte gegenwärtige Bedarf an leichten Gesteinskörnungen für die Leichtbetonproduktion in Deutschland decken. Höhere Produktionsmengen wären möglich, wenn das gesamte Potential an Mauerwerkbruch aus dem Rückbau genutzt würde [1]. Bei konsequenter Entwicklung des Recyclingpfads „Aufbaukörnungen“ könnte die Wirtschaftlichkeit des Leichtbetons verbessert, der Verbrauch an natürlichen Rohstoffen reduziert und letztendlich die Recyclingquote der Baubranche erhöht werden.

In Fortsetzung der Ausführungen des Projektpartners Bauhaus-Universität Weimar in diesem Tagungsband, der über die Optimierung des Herstellungsprozesses der Aufbaukörnungen im Labor- und halbertechnischen Maßstab im Hinblick auf die angezielten Granulateigenschaften berichtet [6], werden im vorliegenden Beitrag die Ergebnisse der Charakterisierung der Leichtgranulate als leichte Gesteinskörnung und der Überprüfung

ihrer Leistungsfähigkeit im Leichtbeton vorgestellt. Auf dieser Grundlage wird dann eine Aussage zur Eignung der Aufbaukörnungen als leichte Gesteinskörnungen für Beton getroffen.

## Eigenschaften der Leichtgranulate aus Mauerwerkbruch

Für die Untersuchungen standen Aufbaukörnungen, die im Rahmen des Projektes von der Bauhaus-Universität Weimar, der E.S.C.H. GmbH, der IBU-tec AG und der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V. hergestellt wurden, zur Verfügung. Das waren thermisch verfestigte Granulate aus der Labor- (LG) und halbtechnischen (HT) Herstellung mit Kornfestigkeiten zwischen 1,5 und 6,5 MPa und Kornrohdichten von 600 bis 1500 kg/m<sup>3</sup> sowie hydrothermal erhärtete Granulate aus der Laborherstellung (LGH) mit 7 bis 13 MPa Festigkeit und 1700 bis 2000 kg/m<sup>3</sup> Rohdichte. Diese Charakteristika zeigen, dass diese Aufbaukörnungen die Optimierungsziele Kornfestigkeit > 1 MPa und Kornrohdichte < 2000 bzw. 1000 kg/m<sup>3</sup> einhalten [6]. Alle Granulate lagen jeweils in den Korngruppen 2/4 und 4/8 mm vor.

Für einen Einsatz als leichte Gesteinskörnung im Beton war die Einhaltung weiterer Anforderungen an chemische und umweltsensitive Bestandteile sowie physikalisch-technologische Eigenschaften zu untersuchen. Die Diagramme in Abbildung 1 und 2, in denen die relativen Salz- bzw. Schwermetallgehalte ausgewählter Granulate bezogen auf die derzeit geltenden Grenzwerte dargestellt sind, verdeutlichen beispielhaft, dass die Aufbaukörnungen die chemischen und umweltanalytischen Anforderungen an eine leichte Gesteinskörnung erfüllen.

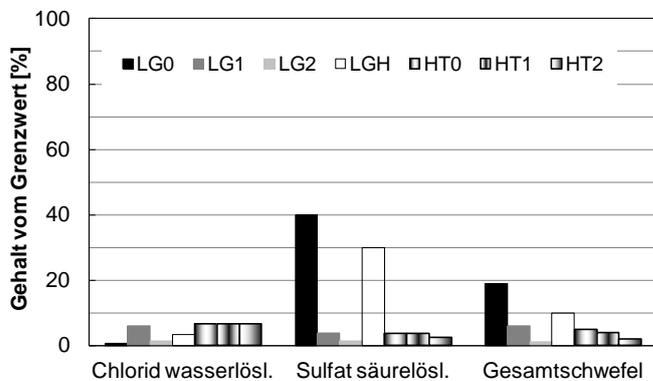


Abbildung 1  
Chlorid-, Sulfat- und Gesamtschwefelgehalte der Leichtgranulate aus unterschiedlicher Herstellung bezogen auf den jeweiligen Grenzwert (LG - thermisch, Labor, LGH - hydrothermal, Labor, HT - thermisch, halbtechnisch)

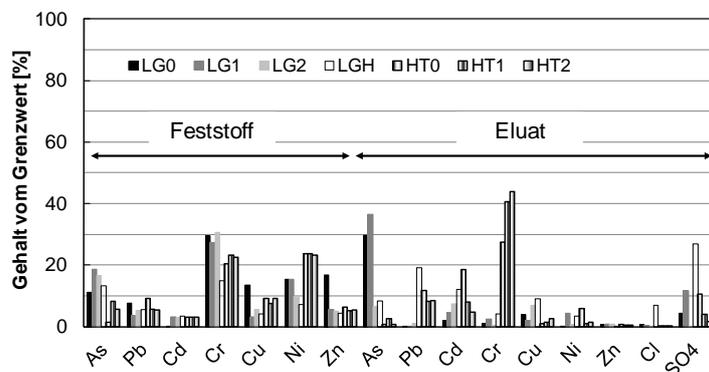


Abbildung 2  
Prozentuale Schwermetall- und Salzgehalte im Feststoff sowie im Eluat der Leichtgranulate aus unterschiedlicher Herstellung bezogen auf den jeweiligen Grenzwert

Für die Betontechnologie sind neben der Kornrohichte vor allem die Porosität und die Wasseraufnahme der leichten Gesteinskörnungen entscheidende Größen, die wiederum von der Kornform, der Oberflächenrauigkeit, der Sinterhautbeschaffenheit und der Porenstruktur der leichten Körnungen beeinflusst werden [7-9]. In Abbildung 3 sind die Porositäten der Leichtgranulate in Abhängigkeit von der Kornrohichte aufgetragen. Die Gesamtporosität wurde aus der Rohdichte und der Reindichte ermittelt, die offene Porosität aus der Wasseraufnahme der Körnungen bei Atmosphärendruck. Die Gesamtporosität der Granulate wächst, wie bei den ähnlichen Reindichten von 2600-2700 kg/m<sup>3</sup> erwartet, linear mit abnehmender Kornrohichte. Die Werte liegen zwischen 30 und 80 %.

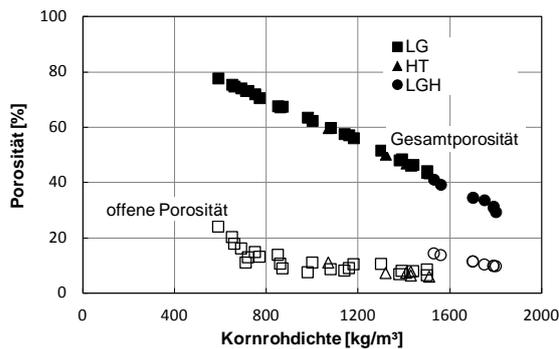


Abbildung 3  
Porosität der Leichtgranulate aus thermischer (LG, HT) und hydrothormaler (LGH) Herstellung in Abhängigkeit von der Kornrohichte

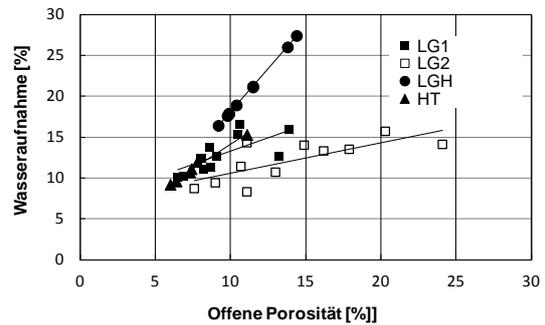


Abbildung 4  
Wasseraufnahme der Leichtgranulate aus thermischer (LG, HT) und hydrothormaler (LGH) Herstellung in Abhängigkeit von der offenen Porosität

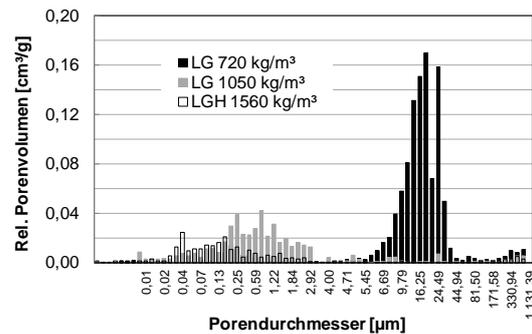
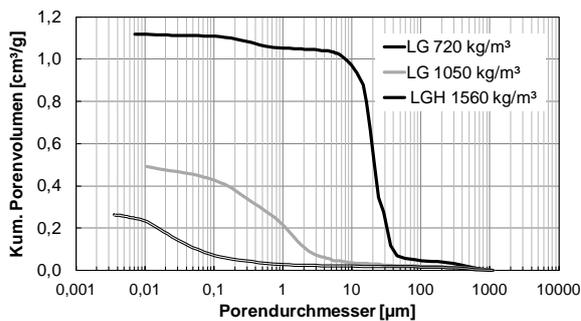


Abbildung 5  
Porenvolumenverteilung der Leichtgranulate unterschiedlicher Kornrohichte aus thermischer (LG) und hydrothormaler (LGH) Herstellung gemessen mittels Quecksilberporosimetrie

Die Veränderungen der Gesamtporosität in Abhängigkeit von der Kornrohichte werden auch von den Ergebnissen der Quecksilberintrusionsmessungen, die nur einen Ausschnitt des Porenspektrums für Porengrößen < 1 mm und genau genommen nur die Größe der Poreneingänge wiedergeben, bestätigt. Wie die Kurven in Abbildung 5 zei-

gen, nimmt auch das Gesamtporenvolumen mit sinkender Kornrohddichte der Leichtgranulate ab. Die Verringerung des Porenvolumens geht außerdem mit einer Verschiebung des häufigsten Porendurchmessers und damit des Hauptporenanteils zu kleineren Porengrößen einher. Ein typisches Verhalten, das auch bei verschiedenen Blättonen beobachtet wird [7, 10].

Die offene Porosität, die für die Transporteigenschaften der Leichtgranulate bestimmend ist, ist 4-8fach geringer als die Gesamtporosität (Abb. 3). So ein Zusammenhang wird auch für verschiedene herkömmliche Blättonen beschrieben, wobei hier die offene Porosität linear mit kleiner werdender Kornrohddichte zunimmt [7]. Bei den Aufbaukörnungen ist diese lineare Abhängigkeit streng nur für die Hydrothermalgranulate und die thermisch erzeugten Blätgranulate mit Kornrohddichten  $< 800 \text{ kg/m}^3$  erkennbar. Für Blätgranulate  $> 800 \text{ kg/m}^3$  schwankt die offene Porosität zwischen 5 und 10 % unabhängig von der Kornrohddichte.

Die Wasseraufnahme der Leichtgranulate variiert zwischen 10 und 30 %. Sie ist in allen Fällen aber etwas geringer als die von Blättonen ähnlicher Rohddichte. Ähnlich wie bei Blättonen festgestellt [9, 11], ergibt eine Auftragung der Wasseraufnahme der thermisch erzeugten Blätgranulate über der Kornrohddichte oder der Gesamtporosität keinen systematischen Zusammenhang [12]. Die Hydrothermalgranulate zeigen im Gegensatz dazu die Abhängigkeit, dass die Wasseraufnahme mit abnehmender Kornrohddichte steigt [12]. In Abbildung 4 ist die Wasseraufnahme über der offenen Porosität aufgetragen. Für alle Leichtgranulate ergeben sich annähernd lineare Korrelationen, wenn die Granulate in Materialklassen entsprechend der Herstellungsart oder/und des Erzeugers unterteilt werden, wobei die Korrelationsgerade jeder einzelnen Materialklasse einen völlig anderen Anstieg hat.

## **Einsatz der Leichtgranulate im Beton**

Zum Nachweis der Verwendbarkeit der Aufbaukörnungen als leichte Gesteinskörnung erfolgte die Herstellung von Leichtbetonen mit einer Sieblinie A/B 8, mit  $450 \text{ kg/m}^3$  Zement CEM I 32,5 R und einem Wasser/Zement-Wert von 0,45. Der Optimierungsfaktor bei der Entwicklung der Betonrezeptur war die angezielte plastische Konsistenz der Klasse F2 (Ausbreitmaß 350 bis 410 mm). Die Korngruppen 2/4 und 4/8 mm bestanden aus den zu prüfenden Leichtgranulaten beziehungsweise zu Vergleichswecken aus marktüblichen Blättonen ähnlicher Rohddichte. Sie nahmen jeweils 54 Vol.-% der verwendeten Gesteinskörnung ein. Die Körnungen  $< 2 \text{ mm}$  waren Natursande aus der Region Okrilla. Für Blätgranulate und Blättonen wurde das zusätzlich Absorptionswasser, dessen Menge 70 % der 60-Minuten-Wasseraufnahme war, zusammen mit dem Anmachwasser zugegeben. Die Hydrothermalgranulate wurden vorab wassergesättigt.

Da die meisten der im Labor hergestellten Granulate nur in kleinen Mengen vorhanden waren, konnten damit ausschließlich  $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$  große Prismen zur Druck- und Biegezugfestigkeitsprüfung nach 28 Tagen hergestellt werden. Weiterführende Betonuntersuchungen waren nur mit einem thermisch verfestigten Laborgranulat LG0 mit der mittleren Rohddichte von  $610 \text{ kg/m}^3$  und drei halbtechnischen Granulaten

HT0, HT1 und HT2 mit etwa  $1250 \text{ kg/m}^3$ , die in größeren Mengen zur Verfügung standen, möglich. Als Festbetoneigenschaften wurden die Druckfestigkeitsentwicklung, die Betonrohddichte, die Wassereindringtiefe und der Frost-Widerstand an Würfeln mit  $150 \text{ mm}$  Kantenlänge, der statische E-Modul an Zylindern mit  $100 \text{ mm}$  Durchmesser und  $200 \text{ mm}$  Höhe sowie der dynamische E-Modul, das Schwindverhalten und die Carbonatisierung an  $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$  Prismen untersucht. Die Prüfungen der Wassereindringtiefe unter Druck und des Frost-Widerstands mittels CF-Test wurden vom Projektpartner IAB - Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH durchgeführt.

Die Festigkeit und die Festbetonrohddichte sind die wichtigsten Eigenschaften zur Beurteilung der Güte eines Leichtbetons. Die an Prismen ermittelten 28-Tage-Druckfestigkeiten der Betone sind in Abbildung 6 über den mittleren Kornrohddichten der Leichtgranulate, die entsprechend ihrer Volumenanteile in der Betonmischung berechnet wurden, aufgetragen. Die Betone mit thermisch verfestigten Blähgranulaten erreichen Druckfestigkeiten zwischen  $33$  und  $52 \text{ MPa}$ . Sie liegen damit in der gleichen Größenordnung wie die Vergleichsbetone mit handelsüblichen Bläh-tonen. Die Druckfestigkeit der Betone nimmt, wie erwartet, mit steigender Rohddichte der Blähgranulate zu und korreliert damit auch mit der Zunahme der Kornfestigkeit [12]. Die mit den Hydrothermalgranulaten hergestellten Betone erreichen trotz höherer Rohdichten nur geringere Druckfestigkeiten bis zu  $42 \text{ MPa}$ . In diesem Ergebnis spiegeln sich die gegenüber den thermischen Granulaten höheren Kornfestigkeiten nicht wider [12]. Als Ursachen dafür können vermutlich die Unterschiede im Wasseraufnahmeverhalten und in der Porenstruktur von Bläh- und Hydrothermalgranulaten angesehen werden. Die Biegezugfestigkeiten aller Betone liegen zwischen  $5$  und  $7 \text{ MPa}$  unabhängig von der Kornrohddichte und der Erhärtungsart der Granulate. Sie erreichen damit mehr als ein Fünftel der Druckfestigkeitswerte, was auf eine bei Leichtbetonen übliche gut ausgebildete Zuschlag/Zementstein-Kontaktzone hindeutet [7].

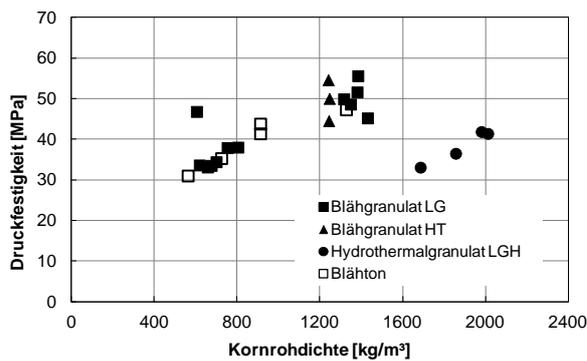


Abbildung 6: Druckfestigkeiten der Betone mit Leichtgranulaten aus thermischer (LG, HT) und hydrothermalmer (LGH) Herstellung bezogen auf die mittlere Kornrohddichte der Granulate (Prismen, 28 Tage)

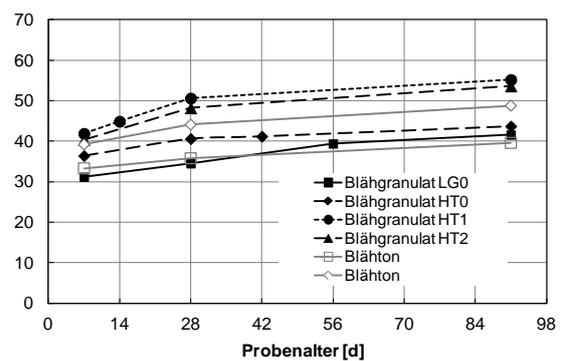


Abbildung 7: Entwicklung der Druckfestigkeit der Betone mit thermisch verfestigten Labor- (LG) und halbertechnischen (HT) Granulaten in Abhängigkeit vom Probenalter (Betonwürfel)

Die Entwicklung der Druckfestigkeiten der Leichtbetone mit thermisch verfestigten Labor- (LG) und halbtechnischen (HT) Granulaten, die an normgemäßen Betonwürfeln ermittelt wurden, in Abhängigkeit vom Probenalter zeigt Abbildung 7. Der Erhärtungsverlauf der Leichtbetone erfolgt stetig und in gleicher Weise wie der der Vergleichsbetone mit handelsüblichem Blähton. Erwartungsgemäß führen höhere Kornrohdichten der leichten Gesteinskörnungen auch zu höheren Würfelfestigkeiten. Mit 28-Tage-Druckfestigkeiten zwischen 35 und 50 MPa (Tabelle 1) können die Leichtbetone den Festigkeitsklassen LC 25/28 bis LC 35/38 zugeordnet werden [13, 14].

Weitere Eigenschaften der Leichtbetone sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Mit Festbetonrohdichten von 1660 kg/m<sup>3</sup> (LG) beziehungsweise 1850 kg/m<sup>3</sup> (HT) handelt es sich um Leichtbetone der Rohdichteklasse D 1,8 bis D 2,0. [13, 14]. Mit Reindichten von jeweils etwa 2500 kg/m<sup>3</sup> weisen die Leichtbetone typische Gesamtporositäten zwischen 27 und 35 % auf [7].

Tabelle 1:

Eigenschaften der Leichtbetone mit Blähgranulaten aus Labor- (LG) und halbtechnischer (HT) Herstellung (Probenalter 28 Tage)

Beton (Rohdichte der Granulate [kg/m <sup>3</sup> ])	Fest- beton- rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Würfel- druck- festigkeit [MPa]	Dynami- scher E-Modul [GPa]	Stati- scher E-Modul [GPa]	Schwind maß (91 d) [mm/m]	Wasser- eindring- tiefe [mm]
LG0 (610)	1660	34,5	22,1	18,0	-0,76	--
HT0 (1240)	1850	40,6	21,7	19,8	-0,83	5
HT1 (1240)	1850	50,6	22,5	22,5	-0,77	13
HT2 (1240)	1850	48,2	22,6	22,2	-0,80	9
Blähton (910)	1780	35,8	18,4	18,5	0,88	5
Blähton (1330)	1800	44,1	21,0	20,8	0,83	--

Der dynamische E-Modul wurde mittels Eigenschwingzeitmessungen nach Impulsanregung jeweils an denselben Betonprismen über einen längeren Zeitraum gemessen. Ähnlich wie bei den Vergleichsbetonen mit Blähton erreicht er nach einem Anstieg in den ersten 7 Tagen der Erhärtung einen relativ konstanten Wert von etwa 22 GPa. Der an Betonzyindern gemessene statische E-Modul erreicht Werte zwischen 18 und 22 GPa, die eine gute Übereinstimmung mit den aus Rohdichte- und Festigkeitsklasse theoretisch erwarteten E-Moduln zeigen [7, 8]. Er wird erwartungsgemäß mit steigender Kornrohdichte der Leichtgranulate beziehungsweise der Betone größer.

Der Schwindprozess der Leichtbetone mit Blähgranulaten verläuft nahezu identisch zu denen der Vergleichsbetone mit Blähton. Nach 91 Tagen erreicht das Schwindmaß etwa -0,8 mm/m, ein unter Berücksichtigung der für die Untersuchungen verwendeten Prismen und Lagerungsbedingungen (23 °C, 50 % rel. Feuchte) akzeptabler Wert [7].

Mit Wassereindringtiefen unter Druck (500 kPa, 72 h) weit unter 50 mm weisen die Betone einen hohen Wassereindringwiderstand auf, was aufgrund der verwendeten Rezeptur auch zu erwarten war [13, 15].

Die Carbonatisierung wurde an Prismen nach Lagerung in Laboratmosphäre bei 23 °C, 50 % rel. Feuchte gemessen. In Abbildung 8 sind die Mittelwerte der Carbonatisierungstiefen über der Wurzel der Zeit aufgetragen. Die Carbonatisierungsgeschwindigkeit der Betone mit Leichtgranulaten ist genauso hoch wie die der Vergleichsbetone mit Blähton beziehungsweise auch Naturkies. Wie erwartet wird das Carbonatisierungsverhalten nicht durch die hohe Porosität der leichten Gesteinskörnungen verschlechtert. Eine hohe Dichtigkeit der Zuschlag/Zementstein-Kontaktzone wird als Ursache der guten Dauerhaftigkeit von Leichtbeton trotz der hohen Porosität der leichter Gesteinskörnungen angesehen [7, 16]. Vorausgesetzt die lineare Korrelation mit der Wurzel der Zeit ist auch für längere Zeiträume gültig, beträgt die Zeit, nach der eine Carbonatisierungstiefe von 20 mm erreicht würde, 6 bis 7 Jahre. Hierbei ist außerdem zu berücksichtigen, dass bei Freibewitterung erheblich geringere Carbonatisierungsgeschwindigkeiten auftreten als unter Laboratmosphäre.

Der Widerstand der Leichtbetone gegen Frost-Tau-Wechsel wurde mittels CF-Test grob beurteilt. Die Auftragung der Abwitterung über der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel zeigt Abbildung 9. Das vom Normalbeton für Leichtbetone mit Natursand adaptierte Abnahmekriterium für einen erhöhten Frostwiderstand von 1000 g/m<sup>2</sup> Abwitterung nach 28 Frost-Tau-Wechseln [7, 17] wird von allen getesteten Betonen mit Leichtgranulaten und Blähton mit Abwitterungen von etwa 200 g/m<sup>2</sup> weit unterschritten. Das heißt, die Betone haben die Frostprüfung bestanden.

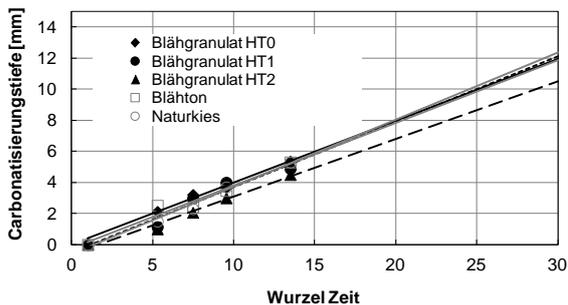


Abbildung 8:  
Carbonatisierung der Betone mit Leichtgranulaten aus halbertechnischer Herstellung (HT) in Laboratmosphäre bei 23 °C, 50 % rel. Feuchte

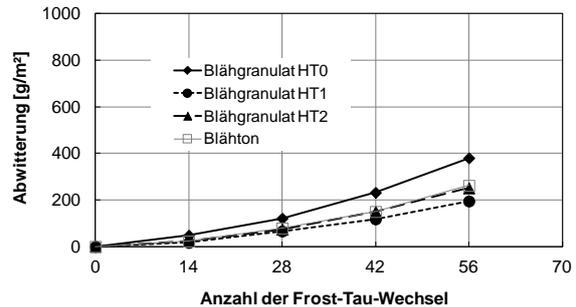


Abbildung 9:  
Abwitterung der Betone mit Leichtgranulaten aus halbertechnischer Herstellung (HT) bei CF-Test

## Zusammenfassung

Die Frage, ob sich aus heterogenen, feinkörnigen mineralischen Bauabfällen hochwertige leichte Gesteinskörnungen für gefügedichten Leichtbeton herstellen lassen, kann anhand der vorliegenden Ergebnisse für den Mauerwerkbruch eindeutig mit ja beantwortet werden. Die Aufbaukörnungen erfüllen die chemischen und umwelttechnischen Anforderungen. Ihre Materialcharakteristika, wie Kornfestigkeit, Rohdichte, Wasseraufnahme und Porosität, sind mit denen handelsüblicher leichter Gesteinskörnungen

sehr gut vergleichbar. Bei den untersuchten Festbetoneigenschaften, wie Festigkeit, Elastizitätsmodul, Schwindverhalten, Carbonatisierung, Wassereindringtiefe und Frost-Widerstand, erzielen die mit den neu entwickelten Leichtgranulaten hergestellten Betone durchweg vergleichbare Werte wie die Vergleichsmaterialien mit herkömmlichem Blähton.

Mit den Aufbaukörnungen ist ein Recyclingprodukt verfügbar, das im konstruktiven Hochbau im Stahlleichtbeton oder Konstruktionsleichtbeton eingesetzt werden kann. Darüber hinaus erscheinen auch Anwendungen in leichten Mörteln, Betonsteinen oder Betonwaren beziehungsweise im Garten und Landschaftsbau möglich.

Um die Eigenschaften der Granulate und damit auch der Leichtbetone weiter verbessern, stabilisieren und gezielter einstellen zu können, besteht noch weiterer Forschungsbedarf. Neben der weiteren Optimierung der Herstellungstechnologie soll der Fokus der weiterführenden Arbeiten auf die Struktur-Eigenschafts-Beziehungen zwischen der Porenstruktur der Aufbaukörnungen und ihren makroskopischen Eigenschaften gerichtet werden. Weitere Untersuchungen an Betonen oder Mörteln sollen sich an den ausgewählten Applikationsgebieten orientieren.

## **Dank**

Das Forschungsprojekt „Aufbaukörnungen“ wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Die am Verbundprojekt beteiligten Partner aus Forschung und Praxis sind auf der Webseite [www.aufbaukoernung.de](http://www.aufbaukoernung.de) aufgeführt.

## **Literatur**

- [1] Müller, A.; Schnell, A.; Rübner, K.: Aufbaukörnungen aus Mauerwerkbruch, Chem. Ing. Tech. (2012), eingereicht
- [2] Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V.: Jahresbericht 2010/2011, Duisburg, 2011, S. 61
- [3] DGfM Deutsche Gesellschaft für Mauerwerksbau und Wohnungsbau e.V.: Jahresbericht 2009/10, Berlin, 2011
- [4] bbs Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V.: Konjunkturperspektiven 2011, Druckwerkstatt Lunow, Berlin, 2011, S. 45
- [5] Thienel, K.-C.: Materialtechnologische Eigenschaften der Leichtbetone aus Blähton, Baustoffe in Praxis, Lehre und Forschung, Heft 128, iBMB, TU Braunschweig, 1997
- [6] Schnell, A.; Müller, A.; Ludwig, H.-M.: Heterogener Mauerwerkbruch als Rohstoffbasis zur Herstellung von leichten Gesteinskörnungen, Tagungsband der 18. Internationalen Baustofftagung ibausil 2012, Bauhaus-Universität Weimar, 2012, eingereicht

- [7] Faust, T.: Leichtbeton im Konstruktiven Ingenieurbau, Ernst & Sohn, Berlin, 2003
- [8] Scheerer, S.: Hochleistungsleichtbeton unter mehraxialer Druckbeanspruchung, Dissertation, TU Dresden, 2009
- [9] Zhang, M.-H.; Gjorv, O. E.: Characteristics of lightweight aggregates for high-strength concrete, ACI Materials Journal 88 (1991) 2, S. 150-158
- [10] Faust, T., Beck, M.: Pore structure of different LWAs, Leipzig Annual Civil Engineering Report (1999) 4, S. 123-132
- [11] Neisecke, J.; Schlothfeld, P.: Einfluss der Leichtzuschlag-Oberfläche auf Festigkeit und Feuchtigkeitshaushalt von Leichtbeton, Mitteilungsblatt für die amtliche Materialprüfung in Niedersachsen (1982/82), S. 34-39
- [12] Schnell, A., Müller, A., Rübner, K., Ludwig, H.-M.: Mineralische Bauabfälle als Rohstoff für die Herstellung leichter Gesteinskörnungen, Recycling und Rohstoffe, Band 5, TK Verlag, Neuruppin, 2012, S. 469-494
- [13] DIN EN 206-1: Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, Beuth Verlag, Berlin, August 2008
- [14] DIN 1045-2: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, Beuth Verlag, Berlin, August 2008.
- [15] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton (WU-Richtlinie), Beuth Verlag, Berlin, November 2003
- [16] König, G.; Faust, T.: Zur Bemessung von Leichtbeton und Konstruktionsregeln, DAfStb-Heft 525, Teil 2, 1. Auflage, Beuth-Verlag, Berlin, September 2003, S. 140-146
- [17] Bundesanstalt für Wasserbau: BAW-Merkblatt Frostprüfung von Beton, Karlsruhe, Hamburg, Ilmenau, Dezember 2004

### **Verfasser**

Dr. Katrin Rübner, Dipl.-Ing. (FH) Frank Haamkens, Dr. Petra Jakubcová  
 BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung  
 Fachbereich Betontechnologie  
 Unter den Eichen 87, 12205 Berlin  
 E-Mail: [katrin.ruebner@bam.de](mailto:katrin.ruebner@bam.de)

Dipl.-Ing. Alexander Schnell  
 Bauhaus-Universität Weimar  
 F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde  
 Coudraystraße 7, 99423 Weimar

Prof. Dr.-Ing. habil. A. Müller  
 IAB – Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH  
 Über der Nonnenwiese 1, 99428 Weimar