

Coarse Granulates of Autoclaved Aerated Concrete (AAC) Rubble in Foamed Matrix – a Sustainable Strategy of Application

Frank Hlawatsch, Ricarda Küstermann and Jörg Kropp

At present, demolition waste in Germany contains up to 1 million tons of AAC rubble from buildings and industrial structures per year. It is expected for the future that AAC rubble in construction and demolition (C&D) waste will further increase and even will exceed the corresponding annual production rates of building elements.

As for now, there are only limited opportunities to re-use AAC rubble as a substitute for virgin raw materials in the production of AAC, and further applications for AAC wastes may only absorb small volumes of the emerging wastes, e.g. finely granulated AAC rubble as substrate in green roofs, granulates in thermal insulation layers or absorbents for oil spill. Therefore, high-grade applications for recycled AAC rubble are needed, which may also absorb a large volume of the expected waste stream.

Considering the expected amount of AAC waste on one hand, and on the other hand the outstanding technical performance of the primary building material AAC strategies are needed for a recycling of AAC in the building sector at a high technical level in order to preserve the specific benefits of the building material AAC.

In cooperation of Bremen Institute for Materials Testing, a Department of Leibniz Institute for Materials Engineering IWT, Bremen University of Applied Sciences and the Research Association Recycling & Use of Secondary Materials (RWB) building products for masonry structures were developed over the past 20 years on the basis of AAC rubble from C&D wastes. Especially fine Granulates from processed AAC rubble were introduced as aggregates in dry premixed masonry mortars and in masonry blocks to replace completely natural aggregates.

On a next step the research consortium proposes a further application especially for a new RC-building material, which consists of coarse granulates of AAC imbedded in a foamed mineral matrix. With this new approach it's possible to produce recycled AAC-products with similar characteristics to primary AAC.

The new high-grade application fills the gap for coarse granulates which were not suitable as a constituent in the earlier development of recycling mortars or in recycling products for masonry structures. In the meantime three different applications for AAC-wastes in high grade building products form a sustainable strategy for the re-use of AAC, thus AAC rubble is not waste – it becomes a valuable resource.

Grobe Rezyklat-Körnungen aus Porenbetonbruch in geschäumten Mauerwerkselementen – eine nachhaltige Verwertungsstrategie

Frank Hlawatsch, Ricarda Küstermann und Jörg Kropp

1.	Aufkommen des Porenbetonbruches	425
2.	Verwertungsmöglichkeiten für Porenbetonbruch.....	426
3.	Eigene entwickelte Verwertungswege aus früheren Forschungsvorhaben	426
4.	Bauprodukte aus groben Porenbeton-Granulaten.....	427
4.1.	Methodik.....	429
4.2.	Arbeitspaket 1 – Vorbereitungen/Erstellung des Versuchsaufbaus	430
4.3.	Arbeitspaket 2 – Konzeption des geschäumten Mörtels zur Injektion ..	430
4.4.	Arbeitspaket 3 – Injektionsversuche	433
4.5.	Mechanische und physikalische Eigenschaften.....	437
4.6.	Ergänzende Mikroskopische Untersuchungen	438
4.7.	Ansätze für weitere Entwicklungen	440
5.	Zusammenfassung	441
6.	Quellen	442

Seit den 1960er Jahren nahm der Einsatz von Porenbetonsteinen und -platten für die Errichtung von Gebäuden zu, da bereits vor einem halben Jahrhundert die Einsparung von Heizenergie in den Vordergrund rückte. Grundlage für die breite Verwendung von Porenbeton sind bis heute seine entscheidenden Vorteile gegenüber den klassischen Wandbaustoffen Ziegel und Kalksandstein:

- die geringe Wärmeleitfähigkeit erlaubt die Errichtung von Gebäuden mit geringem Heizenergiebedarf ohne separate Wärmedämmschichten,
- durch geringeres Gewicht sind größere Steinformate üblich, dadurch wird ein schneller Baufortschritt ermöglicht,
- mit handgeführter Säge sind Produkte aus Porenbeton bearbeitbar.

Der mineralische Baustoff Porenleichtbeton entsteht aus einem Gemisch aus feinem Quarzsand, Kalk und Wasser, dem als Treibmittel Aluminium zugesetzt wird, das durch Gasbildung zum Aufschäumen des Feinmörtels führt. Die Zugabe von Zement bewirkt eine ausreichende Frühfestigkeit für die anschließende Härtung des geschäumten Feinmörtels im Autoklaven, wobei es zu einer Festigkeitsbildung durch die Reaktion zwischen Quarzsand und dem Kalk kommt. Um das Schwinden der gehärteten Steine zu reduzieren bzw. zu kompensieren, werden üblicherweise dem Frischmörtel noch Gipse zugesetzt in Konzentrationen von etwa 2–4 Ma.-%.

Die in einer großen Bandbreite von gängigen Formaten hergestellten Bauprodukte weisen physikalische Eigenschaften auf, die in Tabelle 1 zusammengestellt sind.

Tabelle 1: Typische Eigenschaften von Porenleichtbetonsteinen

Rohdichte	0,35 – 1,00 t/m ³
Druckfestigkeit	2,5 – 10 N/mm ²
Porosität	50 bis über 80 %
Diffusionswiderstandszahl μ	5/10
Wärmeleitfähigkeit	0,11 – 0,31 W/(m*K)
Besonderheiten	bei direktem Kontakt mit feuchtem Erdreich können Aluminium und Gips ausgelaugt werden; ökologische Bedenklichkeit führt zu entsprechend höherer Deponieklasse



Bild 1:

Primärbaustoff Porenbetonplanstein

Heute ist Porenbeton (Bild 1) im Bauwesen insbesondere im Wohnungsbau ein weit verbreiteter, etablierter mineralischer Wandbaustoff.

Zum anfänglichen Bestreben, lediglich den Energieverbrauch einzugrenzen, rückte letztlich das Bewusstsein der Gesellschaft in den Vordergrund, dass natürliche Ressourcen zur Neige gehen, die Umwelt durch freigesetzte Schadstoffe zerstört wird und

die Gesellschaft in ihren eigenen Abfallströmen zu ersticken droht. Um nachfolgenden Generationen vergleichbare Lebensgrundlagen zu erhalten, wurde ein nachhaltiges Wirtschaften gefordert, das neben einem weit ausgedehnten Ressourcenschutz auch ökologische, ökonomische und soziale Belange berücksichtigt. Entsprechende gesetzliche Rahmenbedingungen sind heutzutage in allen Wirtschaftsbereichen verankert, in sehr allgemeiner Form z.B. in den 7 Hauptforderungen der Bauproduktenverordnung.

Mit einer der Lebensdauer von Gebäuden entsprechenden Phasenverschiebung erscheint nunmehr das Material Porenleichtbeton zunehmend aus Rückbaumaßnahmen im Bauschutt. Nach der Nutzungsphase kehrt sich nun die positive Wertung der spezifischen Porenleichtbetoneigenschaften um in Nachteile des Materials für den Einsatz in üblichen Recyclingwegen.

Die geringe Festigkeit ist die Folge der hohen Porosität des Porenbetonbruches, die einhergeht mit einem ausgeprägten Wasseraufnahmevermögen und dadurch mit einer fehlenden Froststabilität, sie schließt somit den Einsatz in den für Bauschutt üblichen Verwertungswegen (im Wesentlichen als Bettungsmaterial/Frostschuttschicht im Straßenbau usw.) aus.

- Die Granulate sind ungünstig geformt für den Einsatz in mineralischen Vor- oder Bauprodukten.
- Porenleichtbeton ist ein zellporiges Material mit kugeligen Poren im Größenbereich von wenigen Millimetern: Fein- und Grobkorn im Rezyklat unterscheiden sich daher im Aufbau und den Eigenschaften. Die Feinkörnung besteht hauptsächlich aus den Porenstegen während die groben Granulate mit zunehmender Korngröße steigende Anteile ungestörtes Porenbetongefüge beinhalten.
- Fremdstoffe gelangen durch den Rückbau in den Porenbetonbruch, z.B. Putzanhaltungen (meist Gips- oder Kalkputze), Tapetenreste, Mörtelreste, Gipsreste von Elektrikerarbeiten.
- Neben einer Entfestigung durch ständige Feuchteinwirkung sind Bestandteile des Porenbetonbruches auch auslaugbar, z.B. Aluminium- und Sulfatverbindungen. Hieraus können Einschränkungen für die Deponierung entstehen.

1. Aufkommen des Porenbetonbruches

Derzeit wird davon ausgegangen, dass der Rücklauf von Porenleichtbeton mit 0,5 bis 1,0 Mio. Tonnen pro Jahr [4] im Vergleich zu den zukünftig zu erwartenden Mengen noch relativ gering ausfällt. Umfragen, durchgeführt von Stier und Forberger [8], ermitteln sogar mögliche Mengen von bis zu 2,05 Mio. Tonnen pro Jahr. Genaue Mengen werden aufgrund eines fehlenden porenbetonspezifischen Abfallschlüssels nicht erfasst (gem. [9] Abfallschlüssel 17 01 01 für Beton) und können nur geschätzt werden. Mit hoher Wahrscheinlichkeit werden zukünftige Mengen die heutigen Produktionsmengen, beispielsweise in 2004 von über 3,6 Mio. m³ (entspricht bei einer Rohdichte von etwa 0,4 t/m³ einer jährlichen Menge von mehr als 1,4 Mio. Tonnen) übersteigen.

Die anfallenden Mengen müssen dann aus dem Bauschutt aussortiert und deponiert werden. Gemäß dem Kreislaufwirtschaftsgesetz [5] wird Porenleichtbetonbruch der untersten Hierarchie-Stufe *Beseitigung* zugeordnet. Zu beachten ist dabei, dass derzeit Deponie-Gebühren von z.T. weit über 100 EUR je Tonne Porenleichtbetonbruch in Rechnung gestellt und somit hohe Kosten verursacht werden, während keine Wertschöpfung für den mittelstandsgeprägten Wirtschaftszweig der Abbruchunternehmer, der Aufbereiter und letztlich auch der Baustoffhersteller erzielt werden kann. Erschwerend kommt hinzu, dass Deponieraum nur begrenzt vorhanden ist. Zudem müssen dabei die ökologischen Einschränkungen (Auslaugung von Aluminium und Sulfaten) berücksichtigt werden.

2. Verwertungsmöglichkeiten für Porenbetonbruch

Porenleichtbetonbruch zur Produktion von neuem Porenleichtbeton zu verwenden, ist konzeptbedingt nur im eingeschränkten Maße möglich, maximale Konzentrationen von etwa 15 Ma.-% wurden berichtet [4, 6]. In der Regel decken werkseigene Ausschussmengen diese Möglichkeit vollständig ab. Ein klassisches stoffliches Recycling ist nicht möglich, da die Eigenschaften des Porenbetonbruchs einen Einsatz in Anwendungen ausschließen, die üblich sind für rezyklierte Stoffströme, wie z.B. als Frostschuttschicht im Straßenbau. Verwertungswege können daher ausschließlich am Eigenschaftskatalog des Porenbetonbruchs abgeleitet werden. So kann das enorme Saugvermögen des Porenbetonbruchs genutzt werden im Einsatz als Ölbinder oder Hygienestreu, bevor er schließlich beseitigt wird. Die gleiche Eigenschaft und das Wasser-Speichervermögen kommt Porenbetonbruch beim Einsatz als Substrat in Dachbegrünungen zu gute. Bei der Verwendung als Schüttung im Trockenbau nutzt man die schon im Primärbaustoff positiven Eigenschaften der geringen Rohdichte, des hohen Wärmedämmvermögens und als Sicherheitsaspekt die Tatsache, dass Porenbeton nicht brennbar ist.

Diese Nutzungsansätze verfügen jedoch nicht über die erforderlichen Kapazitäten, um die erwarteten Volumina an Porenleichtbeton im Bauschutt zukünftig aufzunehmen. Zudem müssen die genutzten Ölbinder und Hygienestreugebinde ebenso beseitigt werden.

3. Eigene entwickelte Verwertungswege aus früheren Forschungsvorhaben

Die MPA Bremen, die Hochschule Bremen und die Forschungsvereinigung RWB beschäftigen sich seit vielen Jahren mit der Entwicklung von Verwertungsweisen für Porenbetonbruch. Seit im Jahr 1998 das erste Forschungsvorhaben zur Erprobung von feinen Porenbetonbrechsanden zur Erstellung von Mörteln startete, wurden bis heute von diesem Forschungskonsortium mehrere z.T. bereits in einem Praxisvorhaben umgesetzte Verwertungswege entwickelt. Arbeitsansatz dieser Entwicklungsprojekte

war stets die gezielte Nutzung der Porenbetonbrechsande und Splitte entsprechend ihrer charakteristischen Eigenschaften, um Ressourcen für die Herstellung von neuen Primärbaustoffen zu schonen und gleichzeitig hochwertige Recycling-Baustoffe aus dem anfallenden Bauschutt zu entwickeln, so dass Abfälle zur Beseitigung minimiert und damit auch Deponiekapazitäten eingespart werden können. Die Motivation der Entwicklungsarbeit lag stets darin, für Porenbetonbruch solche Verwertungswege zu erstellen, die im besten Sinne nachhaltig sind, d.h. dass die für die Produktion des Primärbaustoffes eingesetzten Ressourcen und die aufgebrauchte Energie so lange wie möglich auf hohem technischen Niveau in wiederholten Produktlebenszyklen Verwendung finden können.

Der Verwertungsweg *Methanox* nutzt das enorme Wasseraufnahme- und Speichervermögen der Porenbeton(PB)-Granulate. Die PB-Granulate wurden mit methanoxidierenden Bakterien beimpft und gemeinsam mit einem stabileren mineralischen Stützkorn als *bioaktivierte Funktionsschicht* auf Deponiekörpern aufgebracht, um dort die klimaschädlichen Methanabgasungen abzubauen.

Eine zweite Arbeitshypothese basiert darauf, PB-Granulate aufgrund ihrer spezifisch leichten, wärmedämmenden Eigenschaften bautechnisch zu nutzen, indem sie eingebunden werden in eine mineralisch gebundene Matrix. Mit dieser Arbeitshypothese konnten unterschiedliche Leichtmörtel sowie ein wandbildender Formstein erstellt werden. Beide Verwertungswege enthalten als neue Recycling(RC)-Baustoffe Porenbetonbrechsande mit einem Größtkorn von maximal 8 mm anstelle natürlicher Gesteinskörnungen. Die Kombination dieser Leichtmörtel und Formsteine erlaubt die Erstellung einer neuartigen Wand, komplett errichtet aus RC-Baustoffen. Der Beitrag in [3] berichtet über diese Baustoffentwicklungen.

4. Bauprodukte aus groben Porenbeton-Granulaten

In den bereits aufgezeigten Verwertungswegen Mörtel und Formstein können die Porenbetonbrechsande von 0 bis maximal 8 mm Korngröße genutzt werden. Größere Granulate erwiesen sich hingegen für diese Verwertungswege als ungünstig.

Besonders grobe Granulate mit einer Korngröße von deutlich mehr als 8 mm verfügen aber gegenüber den feinen Brechsanden über einen größeren Anteil an ungestörtem Porenbetongefüge und könnten daher die vorteilhaften Eigenschaften des Primärbaustoffes Porenbeton umfassender auch in den Sekundärbaustoff aus Porenbetonschutt übertragen, um sie in vergleichbarer Funktion nutzbar zu machen. Dieser neue Verwertungsweg kann nicht nur den Aufbereitungsaufwand für Porenbetonbruch reduzieren, weil nunmehr ein sehr breites Kornband direkt rezykliert werden kann, sondern er liefert einen Sekundärbaustoff mit vergleichbaren Eigenschaften wie der Primärbaustoff. Damit wäre nicht nur ein rein stoffliches Recycling erreicht, sondern auch die Leistungsfähigkeit des Primärbaustoffes könnte für einen weiteren Lebenszyklus erhalten werden.

Im derzeit laufenden Forschungsvorhaben IGF 18745 N gelang es, diese Überlegungen als Konzept in einen neuen spezifisch leichten Recyclingstein einzubringen, dessen Volumen zum überwiegenden Teil grobe Porenleichtbetongranulate enthält. Ausschließlich grobe Porenleichtbetongranulate werden in eine Schalung durch Schütten eingebracht. Der verbleibende Haufwerksporenraum wird sodann mit einer künstlich geschäumten mineralischen Matrix durch Injektion gefüllt, deren Eigenschaftsprofil dem Primärbaustoff Porenbeton im Rahmen der technischen Möglichkeiten anzugleichen ist. In der nachfolgenden Darstellung ist das Schema der Schaummörtelinjektion dargestellt.

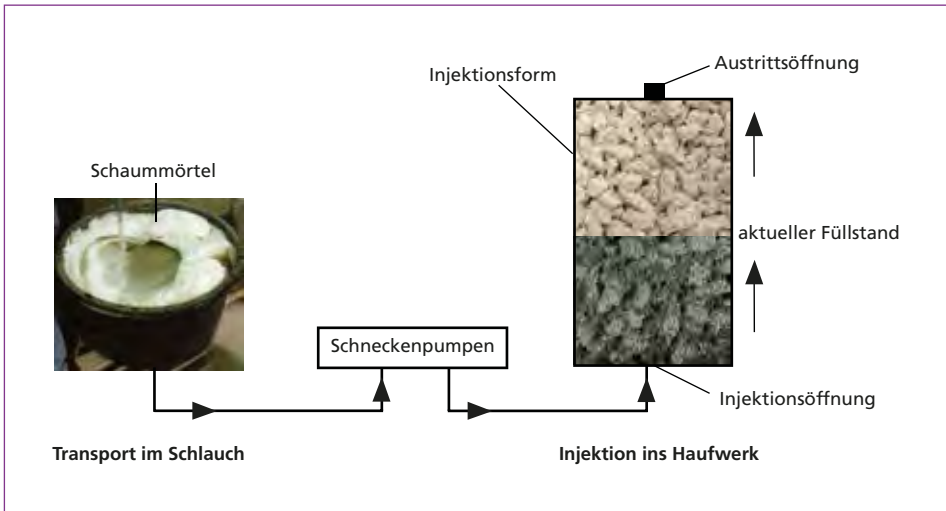


Bild 2: Schema der Schaummörtelinjektion

Die Herstellung des Schaummörtels erfolgt zweistufig. Zunächst werden die Bindemittelkomponenten und Wasser homogen zu einem Bindemittelleim miteinander vermischt. Anschließend wird dem Bindemittelleim ein separat produzierter Schaum auf Tensidbasis volumetrisch zudosiert und schonend mit geringem Energieeintrag untergemischt.

Bezüglich der Bindemittelwahl für die Erstellung der Injektionsschaummörtel kommen mehrere Varianten infrage. Das Entwicklungsprojekt greift in Bindemittel-Variante 1 zunächst den vom Seyfarth et al. [7] verfolgten bekannten Weg auf, einen zementären Mörtel mit Schaum auf Tensidbasis einzusetzen. Hier wird in einem Musterversuch in [7] sogar der Versuchsaufbau mit Porenbeton als Schüttmaterial beschrieben, dessen Haufwerksporenraum mit einem zementären Injektionsschaummörtel verfüllt wird.

Die Bindemittel-Variante 2 besteht in der Verwendung eines sulfatischen Binders. Gewählt wurde ein technischer Anhydrit aus der Rauchgasentschwefelung vom Produktionsstandort Boxberg (zur Verfügung gestellt von Fa. Gylvon).

Schließlich wurde noch ein dritter vielversprechender Bindemittelansatz verfolgt (Bindemittel-Variante 3), der nach dem Vorbild des Primärbaustoffes gewählt wurde.

Der Feinmörtel enthält zum einen Zement für eine geringe Frühfestigkeit, weiterhin aufgemahlenen Quarzsand und Kalk zur Ausbildung der angestrebten Endfestigkeit, die sich im Zuge einer erforderlichen Autoklavhärtung unter Bildung von Calcium-Silicat-Hydrat-Phasen einstellt.

Bei allen drei Bindemittelvarianten erfolgt die Aufschäumung des Feinmörtels durch die volumetrisch dosierte Zugabe von extern maschinell produzierten Schaum auf Wirkstoffbasis Tensid (zur Verfügung gestellt von Fa. Sika) zum Bindemittelleim. Somit erreicht man eine flexible Ausgangsbasis zur Steuerung von Verarbeitbarkeit und Festigkeitsbildung für die anschließende Injektion. Bezüglich der Variante 3 besteht in dieser Art der Porosierung der wesentliche Unterschied zur klassischen Herstellung von primärem Porenbeton.

4.1. Methodik

Das Forschungsvorhaben wurde inhaltlich in drei Arbeitspakete unterteilt. Die Bearbeitung des ersten Arbeitspaketes umfasst die Bereitstellung erforderlicher Fertigungstechnik, bestehend aus Mischer, leistungsstarkem Kompressor, Schaumgenerator, Schneckenpumpe, Ausgangsmaterialien (sämtliche Bindemittelkomponenten, Zusätze und Zusatzmittel, Porenbetonplansteine, aufbereiteter Porenbetonbruch, bezogen über die Fa. Brockmann Recycling GmbH).

Im zweiten Arbeitsschritt wurden die Schaummörtel entwickelt. Die drei unterschiedlichen Bindemittelkonzepte wurden systematisch betrachtet. Dabei wurden in mehreren Versuchsserien Schaummörtelzusammensetzungen erarbeitet, deren Eigenschaften hinsichtlich der Rohdichte und der Druckfestigkeit so eingestellt wurden, dass sie im vorgesehenen Verbund mit Porenbeton-Granulaten ein möglichst homogenes Baustoffverhalten bewirken. Neben den jeweiligen bindemittelspezifischen Einflussgrößen ist der eingebrachte Schaumgehalt die entscheidende Steuerungsgröße.

Der dritte Arbeitsschritt beschreibt den wesentlichen Ansatz der Arbeitshypothese, das Injizieren der unterschiedlichen Schaummörtel in die Haufwerksporen der Granulat-Schüttungen. In diesem verfahrenstechnisch geprägten Arbeitsschritt wird erprobt, bis zu welcher Mindestkorngröße Injektionen durchgeführt werden können, und ob die Granulate ausgleichsfeucht oder vorgehäst eingesetzt werden müssen. Neben charakterisierenden Parameterbestimmungen der neuen injizierten Recyclingbaustoffe werden Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit durchgeführt, die grundsätzlich in der Bestimmung des Schwindens zu sehen sind. Einige Versuchsserien werden nach dem Erreichen stabiler Längenänderungszustände Wechsellagerungen unterworfen, um deren Einfluss auf das Formstabilität zu ergründen.

Hinweis: Die nachfolgende aufgeführten Untersuchungsergebnisse geben den aktuellen Kenntnisstand zum Zeitpunkt der Projektbearbeitung wider. Eine abschließende Zusammenstellung aller Ergebnisse erfolgt nach Abschluss der Projektbearbeitung und der abschließenden Auswertung der Versuche.

4.2. Arbeitspaket 1 – Vorbereitungen/Erstellung des Versuchsaufbaus

Im Arbeitspaket war die Fertigungstechnik bereit zu stellen, so dass die unterschiedlichen injizierbaren Schaummörtel entwickelt und die Injektionsversuche durchgeführt werden konnten.

Anzumerken sind die Schwierigkeiten in der Beschaffung von Porenbeton-Granulaten. Die vorliegenden Zahlen über anfallende Mengen belegen zwar den schon heute beachtlichen Volumenstrom des Porenbetonbruchs. Da jedoch für den Reststoff noch kein Markt und dadurch keine wirtschaftlich orientierte Stoffstromkette/Infrastruktur bestehen, wird Porenbeton meist direkt beseitigt.

Für die Durchführung des Forschungsvorhabens erklärte sich die Firma Brockmann Recycling GmbH aus Nützen dankenswerter Weise dazu bereit, eingehenden Porenbeton in einer Halle zu sammeln, durch Brechen und Sieben aufzubereiten und zur Forschungseinrichtung zu transportieren.

Neben dem Recyclingmaterial wurden im Versuchsprogramm zusätzlich primäre Porenbetonblöcke betrachtet. Zur Verfügung gestellt wurden diese freundlicherweise von Fa. Cirkel GmbH. Primäre Porenbetonblöcke und daraus gewonnene Granulate wurden eingesetzt, um die Eigenschaften der Recyclingprodukte mit dem Primärbaustoff zu vergleichen. Am Primärbaustoff konnte auch untersucht werden, ob die zusätzliche Autoklavhärtung in Bindemittel-Variante 3 einen Einfluss auf die Eigenschaften der Granulate selbst ausübt.

4.3. Arbeitspaket 2 – Konzeption des geschäumten Mörtels zur Injektion

Das zweite Arbeitspaket umfasst die experimentelle Entwicklung der verschiedenen Injekttagemörtel für jede Bindemittelvariante. Um den Einfluss des Pumpendurchlaufes auf die Mörtel Eigenschaften zu erfassen, wurden alle Untersuchungen an Probenmaterial durchgeführt, das die vorgesehene Schneckenpumpe durchlief.

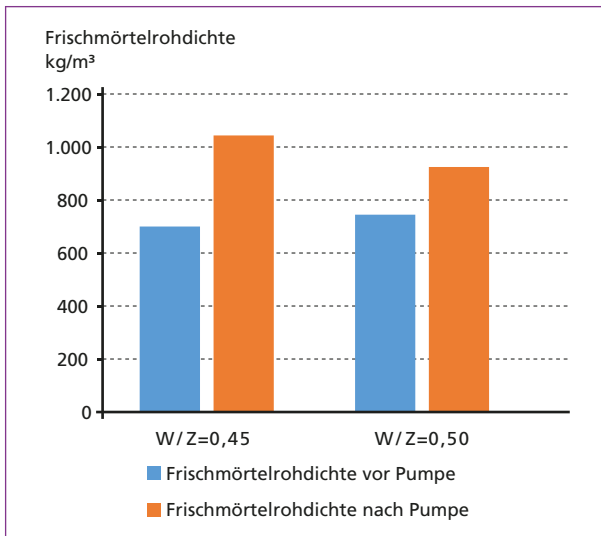


Bild 3:

Rohdichteerhöhung durch Schaumzerstörung nach Pumpendurchlauf eines porosierten zementären Schaummörtels mit unterschiedlichem W/Z-Wert

Das Bild 3 zeigt beispielhaft den Grad der Rohdichteerhöhung zweier zementärer porosierter Schaummörtel (Bindemittelleim:Schaum 1:1) infolge des Durchlaufes durch die Schneckenpumpe.

Neben üblichen Auswirkungen von Einflüssen einzelner Parameter, wie beispielsweise dem W/Z-Wert auf die Druckfestigkeit, wurde – wie erwartet – der große Einfluss des Schaumgehaltes insbesondere auf die Feststoffeigenschaften ersichtlich. Diesbezüglich zeigt das nachfolgende Bild 4 exemplarisch den Einfluss des Schaumgehaltes auf die Trockenrohddichte und somit auf die erreichbare Druckfestigkeit der Bindemittel-Variante 1.

In Bild 4 wird der Umfang der Steuerungsmöglichkeit über den Schaumgehalt zur Erzielung des anvisierten Festigkeitsbereiches ersichtlich. Steuert man eine Druckfestigkeit von etwa 3 N/mm² an, so stellt sich bei einem Volumenverhältnis von Schaum zu Bindemittelleim von 1:1 eine Trockenrohddichte von etwa 600 kg/m³ ein, die für die anvisierte Nutzung als Haufwerksporenfüllgut der PB-Granulatschüttung eine vertretbare Größe erreicht.

Weiter zeigte sich, dass ein sonst für zementäre Baustoffe üblicher signifikanter Festigkeitszuwachs zwischen dem 7. und dem 28. Tag nach Herstellung hier nicht beobachtet wurde.

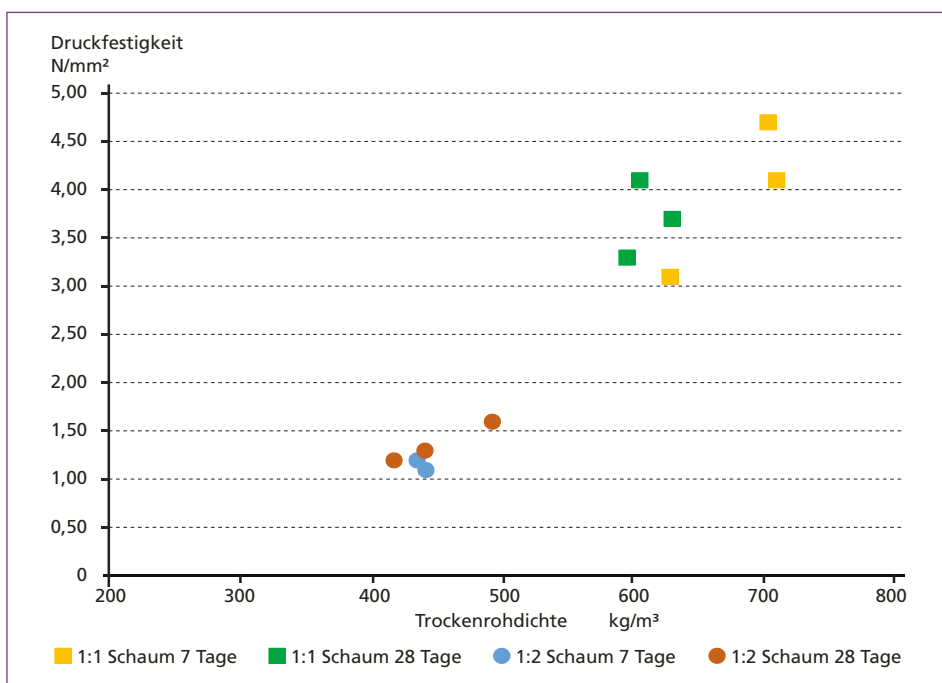


Bild 4: Variante 1; Zusammenspiel zwischen Trockenrohddichte und Druckfestigkeit als Funktion des Schaumgehaltes am Beispiel einer microsilikahaltigen Rezeptur

Die Untersuchung unterschiedlicher Schaumgehalte führte bei Bindemittelvariante Anhydrit bei höheren Schaumgehalten zu sehr starken Festigkeitseinbußen, die keine prüfbaren Proben lieferten. Somit konnte für diese Bindemittelvariante lediglich ein Verhältnis von Schaum zu Anhydritleim von 1:1 genutzt werden.

In Bild 5 ist die Steuerungsmöglichkeit der Druckfestigkeit über den Schaumgehalt der Bindemittel-Variante 3 dargestellt. Steigt der Schaumgehalt, sinken die Trockenrohichte und die Druckfestigkeit. Die Steuerung der Trockenrohichte und somit der Druckfestigkeit erfolgt dabei einerseits über den wählbaren Schaumgehalt bezüglich der gewählten Volumenteile von Feinmörtel zu Schaum, z.B. 1:1, 1:1,5 und 1:2. Indirekt wird die Druckfestigkeit über den Grad der Schaumzerstörung zusätzlich durch den Pumpendurchlauf beeinflusst (Bild 3).

Legt man die Ergebnissätze der Bindemittelvarianten 1 und 3 übereinander, so stellt man fest, dass sich die Datenpaare der Variante 3 im Bereich mit geringerer Trockenrohichte bei gleich hoher Druckfestigkeit befinden. Dies ist als günstigeres Zusammenspiel zwischen Trockenrohichte und Druckfestigkeit der Variante 3 im Vergleich zu Variante 1 zu sehen.

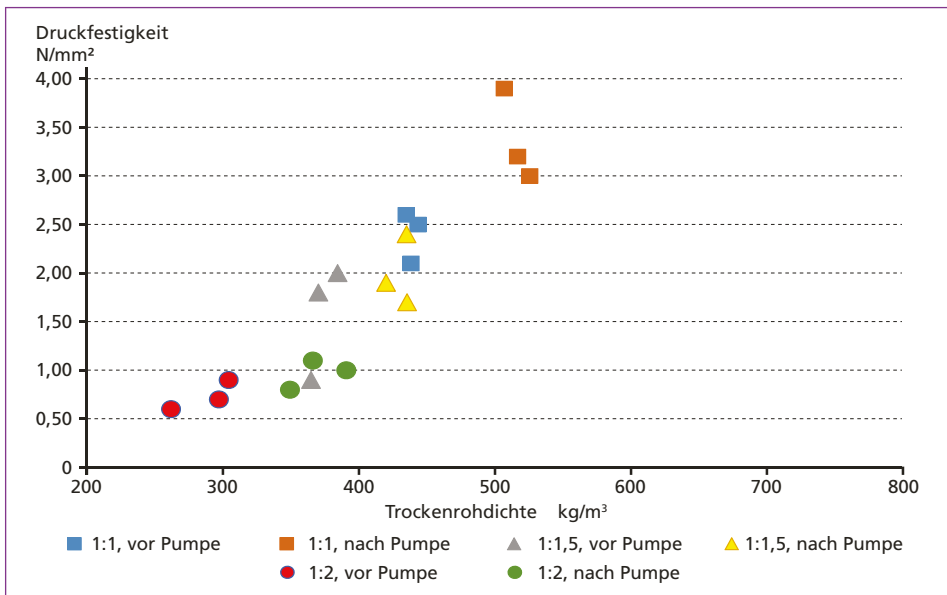


Bild 5: Variante 3; Zusammenspiel zwischen Trockenrohichte und Druckfestigkeit als Funktion des Schaumgehaltes

Unter Berücksichtigung aller Frisch- und Feststoffuntersuchungen und aller gewonnenen Erfahrungen beim Umgang mit den Schaummörteln wurde je Bindemittelvariante eine Rezeptur (Tabelle 2) für die Injektionsversuche festgelegt.

Tabelle 2: Festgelegte Schaummörtel-Rezepturen aus Arbeitspaket 2

Variante 1	Variante 2	Variante 3
Zement CEM I 42,5 R HS	Anhydrit	30 % Zement CEM I 52,5 R
W/Z = 0,50	W/B = 0,5	W/Z = 0,60
15 % Steinkohlenflugasche	1 % Kaliumsulfat	10 % Weißkalkhydrat
1,1 % Stabilisierer ST3 (SIKA)	7 % Weißkalkhydrat	60 % Quarzmehl
Bindemittelleim:Schaum 1:1	0,05 % Methylcellulose	0,075 % Methylcellulose
	Bindemittelleim:Schaum 1:1	Bindemittelleim:Schaum 1:1

4.4. Arbeitspaket 3 – Injektionsversuche

Das dritte Arbeitspaket beschreibt das Erstellen der Granulatschüttungen und das Injizieren der geschäumten Mörtel in deren Haufwerksporen. Dabei waren folgende Kernfragen zu klären:

- Welche Einzelfractionen bzw. welche gestuften Körnungen ergeben einen Haufwerksporenraum, der mit einem Injektionsschaummörtel möglichst vollständig gefüllt werden kann?
- Wie stark wirkt sich das ausgeprägte Saugverhalten der Porenbeton-Granulate auf die Injizierbarkeit des Haufwerksporenraumes aus?
- Schützt das alleinige Vornässen der Granulate die porosierten Schaummörtel vor dem Zerstören der Poren im Kontaktbereich?

In den Bildern 6 und 7 sind Anschnitte von erhärteten Proben mit unterschiedlichen Granulat-Korngrößen dargestellt, die während des Injektionsprozesses mit zementärem Schaummörtel (Variante 1) ausgleichsfeucht waren (jeweils links) oder für 10 Minuten unter Wasser vorgelagert wurden (jeweils rechts).

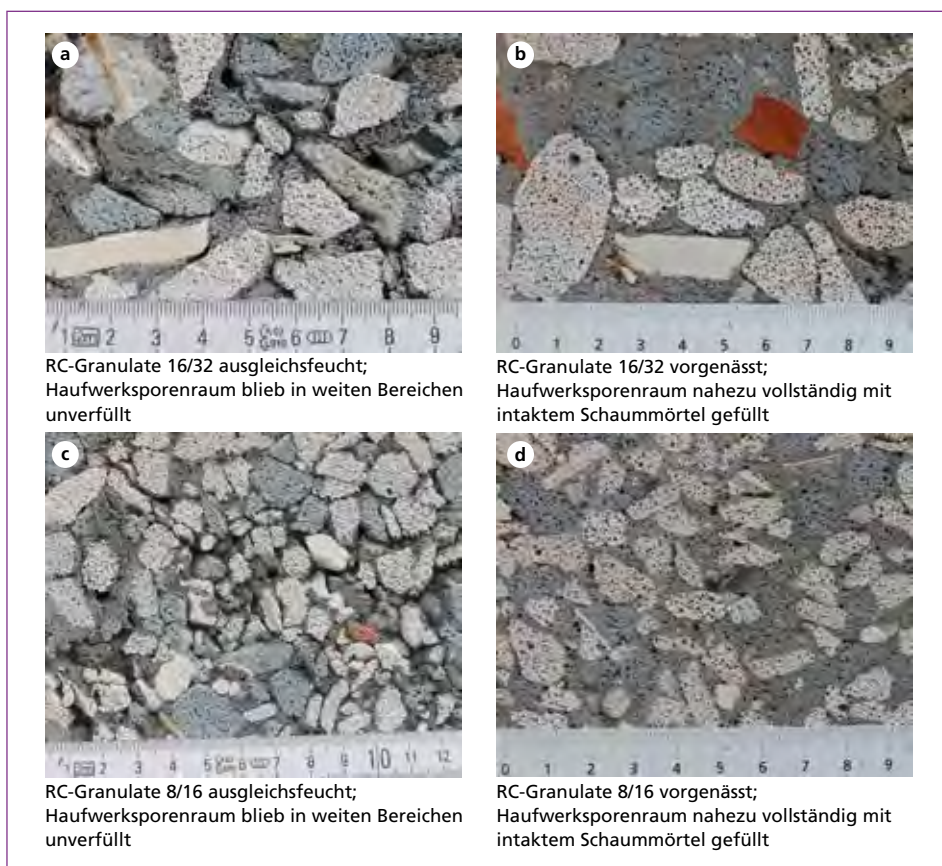
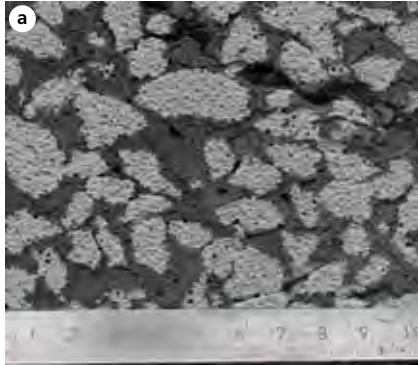


Bild 6: Anschnitte von erhärteten Proben der Variante 1 mit Recycling-Porenbeton-Granulat



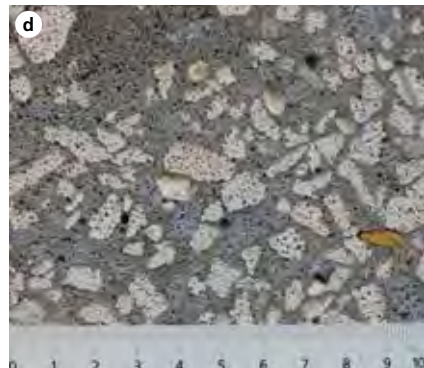
Primär-Granulate 8/16 ausgleichsfeucht



Primär-Granulate 8/16 vorgehäst;
Haufwerksporenraum nahezu vollständig mit
intaktem Schaummörtel gefüllt



RC-Granulate 4/32 ausgleichsfeucht;
Haufwerksporenraum blieb in weiten Bereichen
unverfüllt



RC-Granulate 4/32 vorgehäst;
Haufwerksporenraum nahezu vollständig mit
intaktem Schaummörtel gefüllt

Bild 7: Anschnitte von erhärteten Proben der Variante 1 mit Primär- und Recycling-Porenbeton-Granulaten

Die Gegenüberstellungen der Gefüge belegen die negativen Auswirkungen des starken Saugvermögens von ausgleichsfeuchten Porenbeton-Granulaten auf die Stabilität der geschäumten Mörtel während des Injektionsprozesses. Trifft der geschäumte Mörtel im Zuge des Verfüllens der Haufwerksporen auf die Wandungen der Porenbeton-Granulate, so wird von den Kontaktflächen der Porenbeton-Granulate sofort ein Teil des Anmachwassers weggesaugt, dabei kollabieren die feinen Luftporen des Schaumes. Zurück bleibt eine entlüftete Schaummörtelmatrix. Damit einher geht ein Ansteifen des Schaummörtels. Der angesteifte Schaummörtel ist trotz des anliegenden Injektionsdruckes immer weniger in der Lage, kleine Haufwerksporen zu erreichen und zu füllen. Durch weiteres Ansteifen auf dem Transport durch das Granulathaufwerk verliert schließlich der porosierte Injektgemörtel zunehmend sein Fließvermögen, bis die Injektage zum Erliegen kommt. Zurück bleiben ein entschäumter Feinmörtel sowie unverfüllte Haufwerksporen.

Hingegen bilden Proben mit vorgehässsten Porenbeton-Granulaten das angestrebte Leichtbeton-Gefüge aus. Der Schaummörtel dringt sogar bis in sehr kleine Zwischenräume vor. Es zeigt sich ein fast vollständig verfüllter Haufwerksporenraum. Der Schaummörtel weist nur in wenigen Kontaktzonen einzelner Granulate ein gestörtes Gefüge auf. Anhand dieser Gegenüberstellung kann abgeleitet werden, dass das ausreichende Vornässen der Granulate ein vollständiges Verfüllen des Haufwerksporenraumes stark begünstigt.

Die Gegenüberstellung der Gefügeanschnitte belegt weiter, dass auch der Haufwerksporenraum von Granulaten mit einer Korngröße von 4 mm vollständig injiziert werden kann. Diese Korngröße stellt jedoch eine Grenze dar. Im Gefüge sind an zahlreichen Stellen größere Lufteinschlüsse innerhalb der Schaummörtelmatrix erkennbar, die jeweils durch lokale Porenbrüche verursacht sein können. Einige Versuche mit nicht vorgehässsten Granulaten mit der unteren Fraktion 4 mm mussten wegen frühem, schlagartigem Druckanstieg während der Injektion abgebrochen werden (*Stopfer*). Somit stellt sich die Granulat-Fraktion 4/8 mm als nur eingeschränkt tauglich für die Injektage heraus. Für die obere Fraktion der Granulate besteht hingegen keine Grenze für die Korngröße. Für die praktische Umsetzung der Arbeitshypothese sollte man sich an allgemeine Grundsätze aus der Betontechnik orientieren. So könnte in Großversuchen erprobt werden, ob die kleinste oder dünnste Abmessung eines Bauteils das Drei- bis Fünffache des eingesetzten Größtkorns nicht übertreffen sollte.

Hinsichtlich des Größtkorns wählte die Forschungseinrichtung die Kornobergrenze von 16 mm unter der Vermutung, dass die betontechnologischen Erfahrungen über Korngrößen und Transportvorgänge während des Pumpens übertragbar sind, um auch schlankere Bauteile in einem größeren Laboratoriumsversuch durchführen zu können. Für die weiteren Versuche wurde daher die Fraktion 8/16 mm gewählt.

Im nachfolgenden Bild 8 sind Gefügeanschnitte aus Injektionsversuchen mit poriertem Anhydritleim dargestellt, bei denen – in gleicher Weise – die RC-Porenbetongranulate ausgleichsfeucht waren (Bild 8 a) oder aber für 10 min unter Wasser gelagert wurden (Bild 8 b).

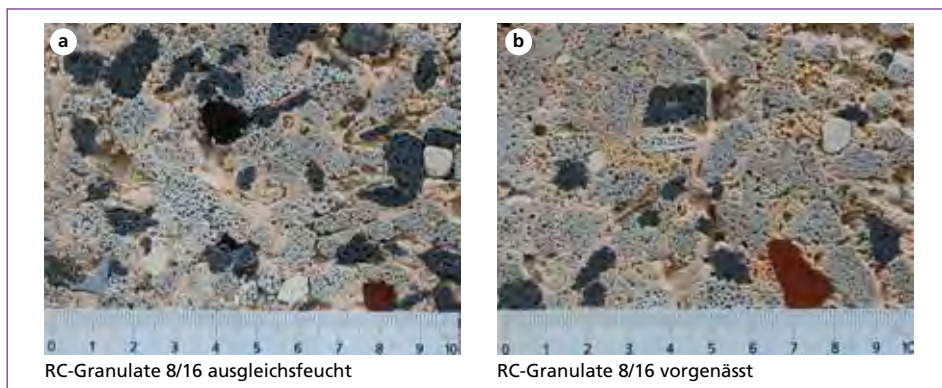


Bild 8: Anschnitte von erhärteten Proben der Variante 2 mit Recycling-Porenbeton-Granulat

Die visuelle Untersuchung der Anschnitte deutet darauf hin, dass die für Variante 1 angenommenen Feststellungen zu den Korngrößen und insbesondere zum Feuchtezustand der Porenbeton-Granulate aus den zementären Mörteln direkt übertragbar sind auf das Bindemittelsystem Anhydrit (Variante 2). Auch für Variante 2 wurden Bereiche des Haufwerksporenraumes festgestellt, die nicht mit dem Schaummörtel verfüllt waren bzw. entschäumte Mörtelschichten in der Kontaktzone zu den nur ausgleichfeuchten Porenbeton-Granulaten auftraten.

Hingegen weist das Gefüge aus vorgemischten RC-PB-Granulaten eine fast vollständige Füllung des Haufwerksporenraumes auf.

Das Bild 9 vergleicht Gefügeanschnitte von Proben aus Injektionsversuchen mit porierten Mörteln der Variante 3, bei denen die RC-Porenbeton-Granulate ausgleichsfeucht waren (Bild 9 a) bzw. für 10 min unter Wasser gelagert wurden (Bild 9 b).

Auch bei diesen Versuchsserien deutet die visuelle Untersuchung der Anschnitte darauf hin, dass die Feststellungen zu den Korngrößen und insbesondere zum Feuchtezustand der Porenbeton-Granulate auch auf Mörtel der Variante 3 direkt übertragbar sind. Wieder wurden bei der Injektion des Haufwerksporenraumes der Schüttung aus ausgleichsfeuchten RC-PB-Granulaten Probenbereiche festgestellt, die nicht mit dem Schaummörtel verfüllt waren. In diesem Gefüge wurden ausgeprägte entschäumte Mörtelschichten in der Kontaktzone zu den ausgleichfeuchten Porenbeton-Granulaten festgestellt.

Hingegen weist das Gefüge aus vorgemischten RC-PB-Granulaten eine fast vollständige Füllung des Haufwerksporenraumes auf (Bild 9 b).



RC-Granulate 8/16 ausgleichsfeucht



RC-Granulate 8/16 vorgemischt

Bild 9: Anschnitte von erhärteten Proben der Variante 3 mit Recycling-Porenbeton-Granulat

Aus den Versuchen mit unterschiedlichem Feuchtezustand der Granulate, den unterschiedlichen Korngrößen der Porenbeton-Granulate und den erprobten unterschiedlichen Bindemittelansätzen der Varianten 1 bis 3 konnte somit nachgewiesen werden, dass die Arbeitshypothese des Forschungsprojektes umsetzbar ist.

Kleine Granulate erzeugen schmale Haufwerksporen, deren Verfüllung nur möglich ist, wenn das Saugvermögen der Porenbeton-Granulate die Konsistenz des injizierten Schaummörtelteilmes nicht nachteilig beeinflusst.

Das Vornässen der Granulate hat sich als sehr wirksames Mittel erwiesen, die Porosierung der Schaummörtel während des Injizierens und während des Erstarrens hinreichend zu schützen. Einige Fehlstellen auch im Gefüge mit vorgehästeten Granulaten belegen jedoch auch, dass das Vornässen oder andere Ansätze zum Schutze der frischen Schaummörtel ein Optimierungspotenzial aufweisen.

4.5. Mechanische und physikalische Eigenschaften^{*)}

Die optimierten Mörtel aus Arbeitspaket 2 und die favorisierten *Schaumstein*-Variationen wurden und werden hinsichtlich der mechanischen und physikalischen Eigenschaften untersucht. Die zum Redaktionsschluss vorliegenden Ergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Ergebnis-Übersicht physikalischer Eigenschaften

Bindemittel-Variante	Proben-Angaben	Rohdichte	Druckfestigkeit	$\lambda_{10\text{tr}}$ ¹⁾	μ ²⁾	ΔI Schwinden ^{*)}
		kg/m ³	MPa	W/(m*K)	–	mm/m
Variante 1	Schaummörtel nach Pumpendurchlauf	740	6,8	0,064	4,8	-3,8
	Schaumstein; ISM im Haufwerk aus Primär-Porenbeton-Granulaten	620	2,6	0,059	6,6	-1,1
	Schaumstein; ISM im Haufwerk aus Recycling-Porenbeton-Granulaten	680	1,8	0,062	6,6	-1,2
Variante 2	Schaummörtel nach Pumpendurchlauf	800	1,2	0,072	3,7	0,08
	Schaumstein; ISM im Haufwerk aus Primär-Porenbeton-Granulaten	750	2,1	Messungen in Bearbeitung	4,9	-0,04
	Schaumstein; ISM im Haufwerk aus Recycling-Porenbeton-Granulaten	820	1,3		4,8	-0,02
Variante 3	Schaummörtel nach Pumpendurchlauf	510	3,7	0,051	3,8	0,37
	Schaumstein; ISM im Haufwerk aus Primär-Porenbeton-Granulaten	610	2,6	0,052	5,6	0,38
	Schaumstein; ISM im Haufwerk aus Recycling-Porenbeton-Granulaten	530	2,8	0,054	5,4	0,39

ISM: Injektionsschaummörtel

*) Endschwindmaß bei Lagerung 20 °C / 65 % rel. Feuchte

1) Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl – Messungen in Anlehnung an DIN EN 12667:2001-05 Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplattengerät – Produkte mit hohem und mittleren Wärmedurchlasswiderstand; Angabe von $\lambda_{10\text{tr}}$ Abweichung bei der Probengröße

2) Messungen gemäß DIN EN ISO 12572:2017-05: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit – Verfahren mit einem Prüfgefäß (ISO 12572:2016); Deutsche Fassung EN ISO 12572:2016

Bei Untersuchungen im Rahmen von früheren Entwicklungsprojekten, bei denen Porenbeton eingesetzt wurde, fiel im Vergleich zu anderen mineralischen Baustoffen ein ausgeprägtes Quellen bei einer Lagerung der Proben in hoher Luftfeuchte auf. Ähnliches wird auch in der Literatur von Seyfarth [7] beschrieben. Um ein solches Längenänderungsverhalten im Zuge wechselnder Feuchtebelastungen bewerten zu

können, wurden einzelne Rezepturen nach dem Erreichen des Endschwindmaßes bei Lagerung im Normalklima 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte umgelagert in ein feuchteres Klima bei 20 °C und 95 % relativer Luftfeuchte. Nach dem Erreichen eines stabilen Längenwertes erfolgte wieder eine Umlagerung auf 20 °C und 65 % relativer Feuchte. Diese Wechsellagerung wurde mehrfach wiederholt. Die grafische Darstellung dieser Untersuchungen zeigt das Bild 10.

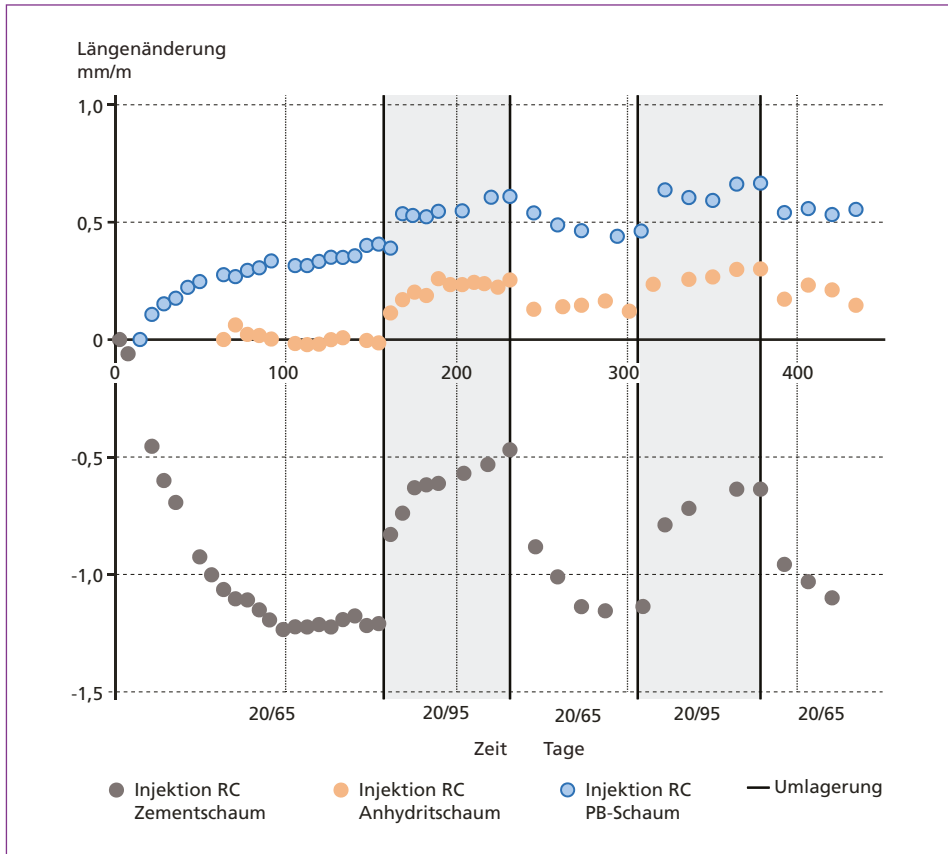


Bild 10: Längenänderung unter Wechsellagerung bei 20 °C zwischen 65 % relativer Feuchte und 95 % relativer Feuchte

Grundsätzlich verkürzen sich alle wechselgelagerten Proben wieder nach der Umlagerung in das trockenere Klima. Jedoch wird bei keiner Bindemittel-Variante der Ausgangswert (das Endschwindmaß) erreicht. Die Untersuchungen werden noch weiter durchgeführt bis zum Abklingen der zweiten anschließenden Trockenlagerung.

4.6. Ergänzende Mikroskopische Untersuchungen

Mikroskopische Analysen mit einem Durchlichtmikroskop an Dünnschliffpräparaten wurden durchgeführt mit dem Ziel, die vermuteten Mechanismen zu verifizieren, die das Injizieren der Schaummörtel in die Schüttungen der Porenbeton-

Granulate beeinflussen. Zudem soll die vorhandene Ausbildung der Kontaktzone zwischen Porenbeton-Granulaten und Schaummörteln beschrieben werden, um eventuelle Ansätze für weitere Optimierung der Herstellungsparameter abzuleiten.

Das Bild 11 a bis c zeigt die Kontaktzonen zwischen dem porosierten Mörtel aller drei Bindemittelvarianten und der Oberfläche des Porenbeton-Granulates. Die dunklen Gefügebereiche bilden die Porenbeton-Granulate ab, die helleren Bereiche zeigen die jeweilige Schaummörtelmatrix. Bei diesen Beispielen wurden die Porenbeton-Granulate stets vor dem Injizieren des Schaummörtels vorgehäst.

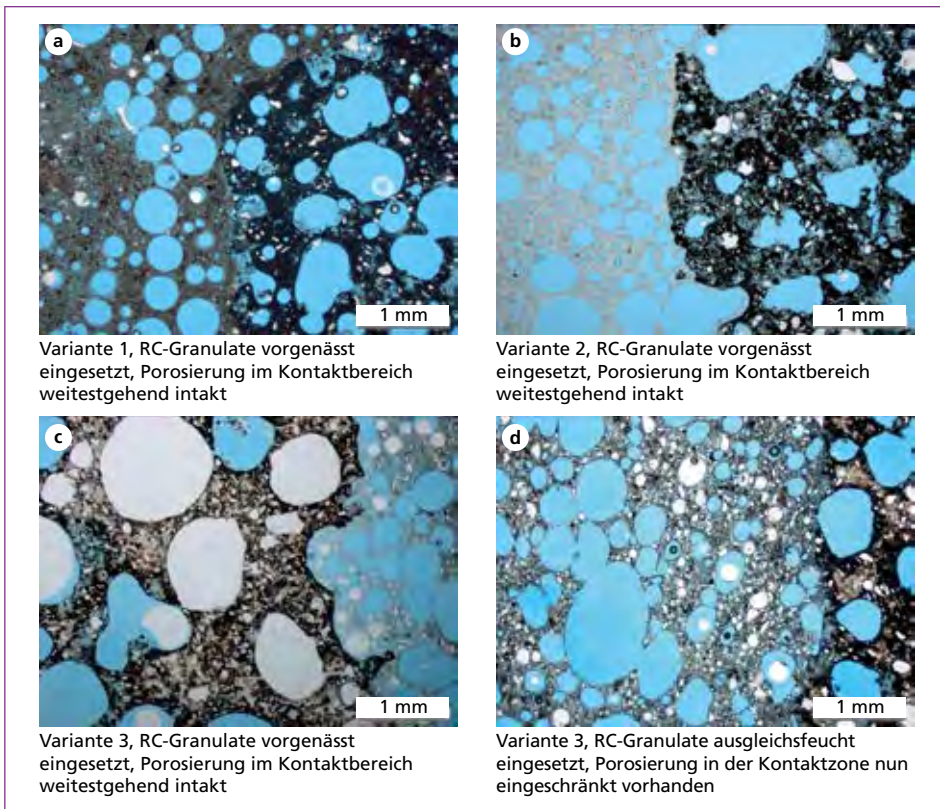


Bild 11: Dünnschliff-Bilder von einem Durchlichtmikroskop von ausgehärteten Proben mit Recycling-Porenbeton-Granulat der verschiedenen Bindemittelvarianten

In allen mikroskopischen Aufnahmen zeigt sich ein inniger Kontakt zwischen Schaummörtel und Porenbeton-Granulat. Lediglich in der Kontaktzone des zementären Systems sind bereichsweise sehr dünne Ablösungen und Risse erkennbar, die auf das für Zementleim typische Schwinden zurückgeführt werden. Die Schaummörtelrandzonen aller drei Bindemittelvarianten zeigen eine präsenzte Aufporosierung, erkennbar an den zumeist ideal runden Luftporen. Ein negativer Einfluss auf die Porosierung durch Saugwirkungen der Porenbeton-Granulate konnte in diesen Bereichen nicht festgestellt werden. Das Vornässen der Porenbeton-Granulate schützt die Schaumstruktur der Mörtel offensichtlich sehr effektiv.

Bild 11 d zeigt die Kontaktzone zwischen Matrix und PB-Granulatoberfläche einer Probe der Bindemittelvariante 3. Bei dieser Probenserie wurden die Granulate ausgleichsfeucht eingesetzt. Auch diese Probe zeigt einen innigen Verbund zwischen Matrix und Kornoberfläche. Jedoch ist an dieser Probe im Kontaktzonenbereich deutlich eine Porenverarmung zu erkennen. In einem Bereich von 1 mm bis 2 mm ist hier die Bindemittelmatrix sehr viel dichter ausgebildet als in den kornabgewandten Bereichen. Diese verdichtete Randzone ist bei allen untersuchten Proben z.T. mit bloßem Auge festzustellen und wird zurückgeführt auf das starke Saugen der Granulate, was beim Injizieren zur lokal begrenzten Zerstörung der eingebrachten Poren und zu einem Ansteifen des Schaummörtels führte. Dieser Effekt wird als Ursache dafür gesehen, dass bei der Injektion von Schaummörtel in nicht vorgehästete Porenbeton-Granulate insbesondere kleine Haufwerksbereiche unverfüllt bleiben.

4.7. Ansätze für weitere Entwicklungen

Der in diesem Beitrag vorgeschlagene Verwertungsweg für grobe Porenbeton-Granulate mit injizierter Schaummörtelmatrix wurde erstellt, weil in Vorversuchen beim Mischen von Schaummörtel und Porenbeton-Granulaten beobachtet wurde, wie die eingebrachten Poren zerstört wurden. Am Rande des Forschungsvorhabens wurde nun der optimierte Mörtel der Variante 3 mit vorgehästeten RC-PB-Granulaten behutsam gemischt und in Formen gefüllt anstelle der Injektage eines Haufwerkes. Eine ausgeprägte Porenerstörung konnte beim Mischen der Komponenten nicht beobachtet werden. Das so erzeugte Gefüge ist in Bild 12 dargestellt. Auf Basis dieser Erkenntnis lässt sich auch diese Arbeitshypothese aufgreifen, technisch optimieren und baupraktisch umsetzen.



Bild 12: Gefüge aus miteinander gemischtem Bindemittelleim der Variante 3 und Recycling-Porenbeton-Granulaten (keine Injektion)



Bild 13: Variante 3; Primär-Granulate 8/16 vorgeschlämmt, kaum Unterscheidung zwischen eingebrachten Granulaten und Schaummörtelmatrix möglich; Probenbreite 15 cm

Bild 13 zeigt das Gefüge einer Probe, deren Haufwerksporenraum aus primären, vorgehärteten Porenbeton-Granulaten mit dem Feinmörtel der Variante 3 verfüllt und anschließend autoklav gehärtet wurde. Eine Abgrenzung zwischen Porenbetongranulat und neu eingebrachter Matrix ist hier nur schwer möglich.

5. Zusammenfassung

Die vorgestellten Ergebnisse des noch laufenden Forschungsvorhabens stellen einen Verwertungsweg für grobe Porenbeton-Granulate vor, bei dem diese in eine porierte Matrix mit dem Porenbeton angepassten Eigenschaften eingebettet werden. Vorgeschlagen werden drei Bindemittelvarianten, von der Variante 3 angelehnt ist an die Herstellung von klassischem Porenbeton und daher die Fertigung eines sehr homogenen Recycling-Baustoffes ermöglicht.

In Anlehnung an den *R-Beton*, wobei das *R* nicht für Recycling, sondern für ressourceneffizient steht, kann der vorgestellte Leichtbaustoff mit mehr als 70 Vol.-% Porenbeton-Granulaten aus der Bauschutttaufbereitung als *R-Porenbeton* bezeichnet werden.

Dieser nachhaltige Arbeitsansatz bietet groben Porenbeton-Granulaten einen weiteren Lebenszyklus in derselben Funktion wie im primären Einsatz. Natürliche Ressourcen für die Herstellung von primärem Porenbeton und wertvolle Deponie-Kapazitäten können geschont werden.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens bietet die Basis für Werkentwicklungen für Porenbeton-Hersteller, um mit entsprechenden Recycling-Produkten den wachsenden Volumenstrom von Porenbetonbruch aufzunehmen. Aufgrund der flexiblen Fertigungstechnologie eignet sich das vorgestellte Konzept besonders für unregelmäßig geformte Sonderbauteile.

Der vorgestellte Verwertungsweg für grobe Porenbeton-Granulate ergänzt die von der MPA Bremen, Hochschule Bremen und der Forschungsvereinigung RWB bislang entwickelten nachhaltigen Verwertungswege für feine Porenbetonbrechsande und bietet somit eine Verwertungsstrategie für das gesamte Kornband des aufbereiteten Porenbetonbruchs, bei der die jeweiligen Fraktionen entsprechend ihrer spezifischen Eigenschaften in einem Werk trockenmörtel, wandbildenden Formstein oder *R-Porenbeton* eine nachhaltige Wiederverwendung finden.

Die aufgezeigte Verwertungsstrategie wird mit zunehmender Umsetzung dazu führen, dass Porenbetonbruch zukünftig als Ware für die Herstellung hochwertiger Recyclingbaustoffe wertgeschätzt werden kann.

Das IGF-Vorhaben 18745 N der Forschungsvereinigung Recycling und Wertstoffverwertung im Bauwesen e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

7. Quellen

- [1] DIN EN 12667:2001-05 Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplattengerät – Produkte mit hohem und mittleren Wärmedurchlasswiderstand
- [2] DIN EN ISO 12572: 2017-05: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit – Verfahren mit einem Prüfgefäß (ISO 12572:2016); Deutsche Fassung EN ISO 12572:2016
- [3] Hlawatsch, F.; Aycil, H.; Kropp, J.: Hochwertige Verwertungswege für Porenbetonbruch in Mörteln und Leichtsteinen für Mauerwerk. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 3 – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2016, S. 433-453, ISBN 978-3-944310-28-2
- [4] Kreft, O.: Geschlossener Recyclingkreislauf für Porenbeton, Mauerwerk 20 (2016), Heft 3, S. 183-190
- [5] Kreislaufwirtschaftsgesetz
- [6] Patentschrift DE 3537265 C2: Verfahren zur Herstellung von dampfdruckgehärtetem Porenbeton, insbesondere Gasbeton
- [7] Seyfarth, K.; Mielke, I.; Stark, J.: Dauerhaftigkeit haufwerksporiger Leichtbetone mit Schaumörtelbindung; Fraunhofer IRB-Verlag, ISBN 3-8167-6010-4
- [8] Stier, C.; Forberger, J.: Ergebnisse einer Befragung zum Umgang mit Porenbetonabfällen aus dem Abbruch von Gebäuden; Chemie Ingenieur Technik 2016, 88, No. 4; S. 506-513
- [9] Xella Baustoffe GmbH: Umwelt-Produktdeklaration, Ausstellungsdatum: 09.11.2017

Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Frank Hlawatsch

Amtliche Materialprüfungsanstalt (MPA)
der Freien Hansestadt Bremen
Stellv. Leiter Überwachungs- & Zertifizierungsstelle
für Bauprodukte
Bauwesen
Paul-Feller-Straße 1
28199 Bremen
Telefon: 0049-(0)421-5370822
E-Mail: hlawatsch@mpa-bremen.de



Weitere Institutionen

Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien – IWT

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar

Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky,
Bernd Friedrich, Thomas Pretz, Peter Quicker, Dieter Georg Senk, Hermann Wotruba (Hrsg.):

Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 5
– Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –

ISBN 978-3-944310-41-1 Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Copyright: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc., Dr.-Ing. Stephanie Thiel
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH • Neuruppin 2018

Redaktion und Lektorat: Dr.-Ing. Stephanie Thiel, Dr.-Ing. Olaf Holm,
Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc.

Erfassung und Layout: Claudia Naumann-Deppe, Janin Burbott-Seidel, Sandra Peters,
Ginette Teske, Roland Richter, Cordula Müller, Gabi Spiegel

Druck: Universal Medien GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.