

Aycil, H.; Hlawatsch, F.; Kropp, J.

Hochwertige Verwertungsmöglichkeiten für Porenbetonrezyklate

Einleitung

Porenbeton wird aus feiner quarzitischer Gesteinskörnung, Bindemittel, Treibmittel, ggf. Zusätzen und Wasser mittels Dampfhärtung hergestellt und ist aufgrund seiner hohen Porosität ein vergleichsweise leichter mineralischer Baustoff [1]. Aufgrund seiner leichten Verarbeitbarkeit und seiner guten Dämmeigenschaft wird Porenbeton, auch wegen gestiegener Anforderungen an die Dämmung der Gebäudehülle, im Hochbau seit mehreren Jahrzehnten verstärkt eingesetzt. Der jährliche Absatz von Porenbeton in Deutschland lag im Zeitraum von 1996 bis 2008 zwischen 2,5 und 5 Mio. m³ [2, 3]. Ein Großteil der bisher verbauten Porenbetonsteine und -elemente befinden sich noch im Gebäudebestand.

Im Gegensatz zu anderen mineralischen Baurestmassen, z. B. aus Beton, ist eine Verwendung von Porenbetonbruch im Straßenbau oder für die Herstellung von Recyclingbeton als Gesteinskörnung angesichts seiner verhältnismäßig geringen Festigkeit und geringen Frostbeständigkeit ausgeschlossen. Ungenutztes sortenreines Material kann aufbereitet und in geringen Mengen in der Produktion von neuen Porenbetonsteinen bzw. als Ölbinder, Wärmedämmschüttung, Dachbegrünungssubstrat oder Hygienestreu eingesetzt werden. Hierfür werden Produktionsabfälle der Porenbetonwerke verwendet. Im Gegensatz zu diesen Produktionsabfällen enthält Abbruchmaterial i. d. R. Fremdstoffe, wodurch die Möglichkeit einer Wiederverwertung dieses Materials erschwert wird. Derzeit landet Porenbeton nach seiner Nutzung auf der Deponie. Auch die Porenbetonindustrie bietet keine alternativen Verwertungswege an [4, 5]. Es wird lediglich auf die Deponierbarkeit von Porenbeton gemäß Klasse I nach der TA Siedlungsabfall hingewiesen. In [6] werden aber auch Bemühungen zur Verwendung von Porenbetonschutt für die Produktion von neuen Steinen erwähnt. Aufgrund geringer Deponiekapazitäten, hoher Deponiegebühren, gesetzlicher Verpflichtungen zur Recyclingfähigkeit von Produkten und deren Abfällen sowie zur Schonung von Primärstoffen ist es unabdingbar, Verwertungsalternativen für dieses problematische Abbruchmaterial zu finden.

Die Amtliche Materialprüfungsanstalt der Freien Hansestadt Bremen (MPA Bremen, ein Geschäftsbereich der Stiftung Institut für Werkstofftechnik Bremen) in Kooperation mit der Forschungsvereinigung Recycling und Wertstoffverwertung im Bauwesen e. V. (RWB Bremen) sowie der Hochschule Bremen hat daher Verwertungsstrategien auf einem hohen Niveau im Labormaßstab für Abbruch aus Porenbeton entwickelt [7, 8, 9] und diese bereits erfolgreich auf industriellen Anlagen [10] umgesetzt. Es wurden Recyclingprodukte für den Mauerwerksbau (Formsteine und Mörtel) mit guten bautechnischen Eigenschaften hergestellt. In einem derzeit laufenden Demonstrationsvorhaben [11] werden die Recyclingbaustoffe zur Errichtung von nicht tragenden Innenwänden in einem Bremer Bauvorhaben eingesetzt.

Weitere Untersuchungen zur Verwertung von Porenbetonrezyklaten sind in [12] bis [17] beschrieben.

Porenbetonrezyklat

Das Porenbetonrezyklat in [7] wurde von einer Bauschutttaufbereitungsanlage (Firma Manzke aus Volksdorf) bezogen, die Porenbeton aus Produktionsabfällen sowie aus der Bauschutttaufbereitung als Granulat zur Dachbegrünung vermarktete. Für die Zerkleinerung des Porenbetons wurde ein Backenbrecher verwendet. Teilweise wurde ergänzend ein Granulat eingesetzt, das aus Bruchmaterial der Porenbetonproduktion bestand und vom Porenbetonhersteller als Hygienestreu vertrieben wurde.

Nachdem sich die Firma Manzke aus dem Gebiet der Porenbetonaufbereitung zurückgezogen hatte, wurde im Folgevorhaben [8] zunächst aus Produktionsausschuss eines Porenbetonwerkes gewonnenes Material und anschließend auch aus Porenbetonabbruch aufbereitetes Rezyklat eingesetzt. Dieses stammte von der Firma Brockmann Recycling GmbH aus Nützen. Auch in den folgenden Vorhaben [9, 10, 16] und dem aktuell laufenden Demonstrationsvorhaben [11], gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, wurde das Porenbetonrezyklat von diesem Recyclingunternehmen bezogen. Der Porenbetonabbruch war von den angelieferten Abbruchmaterialien aussortiert worden und zwecks Lufttrocknung in Containern auf einer überdachten Fläche gelagert. Die Aufbereitung des Recyclingmaterials erfolgte in einem Backenbrecher mit nachgeschalteter Klassierung über Siebe. Vor dem Brechvorgang wurden Fremdstoffe manuell wie auch maschinell aussortiert. Das gebrochene und klassierte Material wurde homogenisiert und anschließend in Big Bags gefüllt. Das aufbereitete Rezyklat wies einen hohen Feinkornanteil auf und wurde bis zu einer Korngröße von 8 mm in den Vorhaben verwendet.



Abb. 1: Aufbereitung des Porenbetonrezyklats

Gegenüber den aus neuen, noch unverbauten Porenbetonsteinen hergestellten Rezyklaten können Porenbetonrezyklate aus der Bauschutttaufbereitung Fremdstoffe wie z. B. anhaftenden Putz und Tapetenreste aufweisen. Durch die Verwendung bereits genutzten Abbruchmaterials sollte gewährleistet werden, dass die zu entwickelnden Rezepturen und Herstellungsverfahren unmittelbar auf die Praxis

übertragbar sind, da Einflüsse aus der Aufbereitung und von typischen Verunreinigungen implizit erfasst werden.

Die untersuchten Rezyklatkörnungen in den F&E-Projekten wiesen abschlämmbare Bestandteile zwischen 12 M.-% und 21 M.-% auf, die auf Basis der Erkenntnisse in [7] bewusst im Rezyklatgemisch verblieben. Die Rohdichte der Körnungen 0/2 mm lag zwischen 1,1 und 1,3 Mg/m³ bei einer Wasseraufnahme nach 24 Stunden von 38 bis 43 M.-%. Ein Großteil dieser Wassermenge war bereits nach wenigen Minuten Kontaktzeit mit Wasser aufgenommen.

Gegenüber der feinen Kornfraktion weisen grobe Körnungen auch im gebrochenen Zustand die für Porenbeton typischen Kugelporen auf. Aufgrund des Brechprozesses werden diese Kugelporen mit fortschreitender Zerkleinerung der Körnung aufgeschlossen, wodurch ein ausgeprägter Anteil an Porenbeton-Feinbrechsand entsteht, der im Wesentlichen aus den Porenwandungen des Porenbetons besteht. Dies bedingt, dass die groben Kornfraktionen spezifisch leichter sind. Die Kornrohichten der Rezyklatkörnungen 2/8 mm bewegten sich zwischen 0,9 und 1,1 Mg/m³ bei Wasseraufnahmen nach 24 Stunden von 41 bis 51 M.-%.

Im Vergleich zu den Rezyklatkörnungen wiesen die in [8] verwendeten Körnungen aus Produktionsausschuss tendenziell geringere Dichten und höhere Wasseraufnahmen auf.

Der Sulfatgehalt der Porenbetonrezyklate betrug i. d. R. 1 bis 3 M.-%. Lediglich in [9] wurden höhere Sulfatgehalte, vermutlich verursacht durch hohe Anteile an Gipsputz im Abbruchmaterial, festgestellt.



Abb. 2: Körnungen 0/2 und 2/8 mm aus Produktionsausschuss
(links: feiner Porenbetonbrechsand, dessen Kugelporen zu einem hohen Grad aufgeschlossen sind; rechts: grobe Porenbetongranulate, deren typische Kugelporen-Struktur weitestgehend intakt ist)

Tabelle 1: Eigenschaften der Rezyklatkörnungen

Eigenschaft / Rezyklat aus		[7] von Fa. Manzke		[8] aus Produktionsausschuss		[8, 9, 10, 11] von Fa. Brockmann	
		0/2	2/8	0/2	2/8	0/2	2/8
Kornrohichte	[Mg/m ³]	1,2	0,9	1,1	0,8	1,2-1,3	0,9-1,1
Schüttdichte	[Mg/m ³]	0,7	0,4	0,5	0,3	0,6-0,7	0,5-0,6
Wasseraufnahme nach 10 Minuten	[M.-%]	41	47	49	58	36-40	39-50
Wasseraufnahme nach 24 Stunden	[M.-%]	42	53	52	65	38-43	41-51
Sulfatgehalt	[M.-%]	1	2	2	2	1-3 *	2-3 *
Abschlämbbare Bestandteile (< 0,063 mm)	[M.-%]	21	1	13	1	12-17	1-2

* Vorhaben [9] ausgenommen

Mörtel aus Porenbetonrezyklaten

Machbarkeitsstudie (PB-Mörtel I)

Aufgrund der hohen Porosität von Porenbetonrezyklaten und der dadurch bedingten hohen Wasseraufnahme und relativ geringen Kornfestigkeit sowie der äußerst rauen Kornoberfläche wurde in einem ersten Mörtelprojekt [7] der Frage nachgegangen, ob sich überhaupt mit Rezyklaten aus Porenbeton verarbeitungsfähige Mörtel herstellen lassen. Hierbei sollten die Vorzüge des Porenbetons wie geringe Rohdichte und geringe Wärmeleitfähigkeit sinnvoll ausgenutzt werden. Angestrebt wurden bevorzugt Einsatzbereiche im Gebäudeinneren, z. B. als Verfüll-, Mauer- oder Putzmörtel.

In umfassenden Versuchsserien wurde der Kornaufbau, das Verhältnis vom Rezyklat zum Bindemittel, die Bindemittelart und die Konsistenz in weiten Grenzen variiert. Anfangs wurden gewaschene Körnungen für die Herstellung von Mörteln ohne Feinsand untersucht. Diese Mörtel verhielten sich sperrig und neigten zur Entmischung. In weiteren Versuchen wurden Mörtel mit Feinsanden, aber ohne abschlämbbare Bestandteile, erprobt. Auch diese Mörtel wiesen eine nur mäßige Verarbeitbarkeit auf. Generell wurde aber mit zunehmender Feinheit des Korngemisches eine Verbesserung der Verarbeitbarkeit beobachtet. Im Folgeschritt wurde die Verarbeitbarkeit durch die Erhöhung des Bindemittelgehaltes sowie durch den Einsatz mehlkornreicher Feinsande durch Verwendung der Rezyklate im Lieferzustand weiter verbessert. Bei einem Verhältnis von Bindemittel zu Porenbetonbrechsand von 1:3 Raumteilen konnten auch weiche Mörtel gut verarbeitet werden. Die Hafteigenschaften auf mineralischen Untergründen waren jedoch unzureichend. Nach der Optimierung von Kornzusammensetzung, Bindemittel- und Mehlkorngehalt wurde versucht, mit chemischen Zusätzen die Verarbeitbarkeit und das Haftvermögen zu verbessern. Als günstig hat sich für diese neuen Recyclingmörtel mit Porenbetonbrechsanden die Zugabe von Luftporenbildner und Methylhydroxyethylcellulose erwiesen. Bis zu einer Korngröße von 8 mm wurden sogar eine sehr gute Verarbeitbarkeit und ein angemessenes Haftungsvermögen erzielt. Optimal

verarbeitbare Mörtel ergaben sich unter Verwendung eines ungewaschenen Kornbandes von 0/2 mm. Optimierte Mörtel ließen sich nicht nur manuell mit der Kelle sondern auch maschinell im Trocken- und Nassspritzverfahren verarbeiten. Zusammenfassend konnte mit der Machbarkeitsstudie eindrucksvoll nachgewiesen werden, dass vielversprechende Mörtel mit Porenbetonrezyklaten hergestellt werden können.

Eigenschaften der Rezyklatmörtel (PB-Mörtel II)

Im Anschlussvorhaben [8] wurden die in der Machbarkeitsstudie entwickelten Rezepturen bezüglich der anwendungsrelevanten Eigenschaften umfangreich charakterisiert. Hierzu zählen die mechanisch-technologischen Kennwerte sowie die bauphysikalischen Materialparameter. Zudem wurden mögliche Einsatzgebiete für Mörtel aus Porenbetonrezyklaten aufgezeigt.

Am Frischmörtel wurden die Konsistenz, das Ansteifverhalten innerhalb einer Stunde, die Frischmörtelrohddichte sowie das Wasserrückhaltevermögen geprüft. Am Festmörtel wurden die Trockenrohddichte, die Biegezug- und die Druckfestigkeit, die kapillare Wasseraufnahme sowie Formänderungen im Normal- (20°C / 65 % rel. Luftfeuchte) und Feuchtklima (20°C / 95 % rel. Luftfeuchte) ermittelt. An ausgesuchten Rezepturen wurden der Elastizitätsmodul, die Wasserdampfdurchlässigkeit sowie die Wärmeleitfähigkeit untersucht.

Gegenstand der Untersuchungen waren plastische und erdfeuchte Mörtel mit einem Größtkorn von 2 und 8 mm. Das Verhältnis von Bindemittel zu Porenbetongranulat betrug 1:3 RT (Raumteile). Als Bindemittel wurden Zement, ein Gemisch aus Hochhydraulischem Kalk und Zement, ein Gemisch aus Zement und Weißkalkhydrat, ein Putz- und Mauerbinder sowie ein Maschinenputzgips verwendet. Des Weiteren kamen Zusätze wie Steinkohlenflugasche, Schaum und Kunststofffasern zum Einsatz. Tabelle 2 zeigt die Spannweite der Festmörtel-eigenschaften untersuchter Rezyklatmörtel (ausgenommen die Rezepturen mit Maschinenputzgips) in Vergleich zu einem Mörtel mit natürlicher Gesteinskörnung. Die Gegenüberstellung dieser Ergebnisse zeigt deutlich, dass der Einsatz von Porenbetonbrechsand besonders relevante Mörtel-eigenschaften sogar positiv beeinflusst. Die Verwendung von Porenbetonbrechsanden bewirkt gegenüber der natürlichen Gesteinskörnung eine geringere Trockenrohddichte und somit eine geringere Wärmeleitfähigkeit, einen geringeren Elastizitätsmodul sowie eine geringere Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl. Biegezug- und Druckfestigkeit bleiben in diesem Festigkeitsbereich auf grundsätzlich ähnlichem Niveau, da diese stark abhängen von der Bindemittelmatrix. Ungünstig wirken sich die Porenbetongranulate auf das Wasseraufnahmeverhalten und auf die Volumenstabilität aus. Unter der angestrebten Verwendung im trockenen Wandbereich ist ein höheres Wasseraufnahmevermögen jedoch von untergeordneter Bedeutung.

Die geringere Volumenstabilität kann sich rissbegünstigend auswirken. Ein wirksames Mittel zur Eingrenzung der Rissempfindlichkeit ist die Zugabe von Fasern. Es wurde daher die Auswirkung des Einsatzes von Polyacrylnitril-Kurzschnittfasern mit einer Schnittlänge von 4 mm und einer Faserstärke von ca. 43 µm untersucht. Die Wirksamkeit der Fasern wurde im Biegeversuch nachgewiesen, da durch die Faserverstärkung nach dem Bruch weiterhin Kräfte aufgenommen werden konnten.

Tabelle 2: Festmörteleigenschaften der Rezyklatmörtel und eines Mörtels mit natürlicher Gesteinskörnung (Normalmörtel)

Eigenschaft	Einheit	PB-Rezyklatmörtel	Normalmörtel
Trockenrohichte	[Mg/m ³]	0,7 – 1,1	1,6
Biegezugfestigkeit	[N/mm ²]	1,0 – 3,8	3,1
Druckfestigkeit	[N/mm ²]	2,4 – 17,9	11,2
Elastizitätsmodul	[N/mm ²]	1.400 – 4.600	9.700
Wasseraufnahmekoeffizient	[kg/(m ² ·h ^{0,5})]	3 – 45	2
Längenänderung nach 90 d im Normalklima	[mm/m]	(-1,5) – (-2,2) *	-0,9
Längenänderung nach 90 d im Feuchtklima	[mm/m]	0 – 0,5	0,1
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	4 – 10	12
Wärmeleitfähigkeit ($\lambda_{10, tr}$)	[W/(m·K)]	0,17 – 0,24	0,65
* höhere Längenänderungen bei Verwendung von Rezyklaten aus der Bauschutttaufbereitung			

Die Ergebnisse belegten, dass Porenbetonrezyklate in eine Matrix mit angemessenen Frisch- und auch Feststoffeigenschaften eingebettet werden können und dabei zu hochwertigen Mörteln führen. Eine Eignung der entwickelten Mörtel als Verfüll-, Mauer- und Putzmörtel, insbesondere als Leichtmauermörtel LM 36 und als Grundputz in Sanierputzsystemen konnte nachgewiesen werden.

Industrielle Fertigung - Mörtel

In Vorbereitung auf das derzeit laufende Demonstrationsvorhaben [11] zum Einsatz der entwickelten Recyclingbaustoffe aus Porenbetonrezyklaten mussten die Ergebnisse vom Labormaßstab auf die industrielle Produktion übertragen werden. Im Projekt „Scale up des Porenbetonrecyclings“ [10] wurde daher die Herstellung von Werk trocken-Mauermörtel auf der Produktionsanlage des Projektpartners Stebah GmbH & Co. KG in Stuhr erprobt. Die Untersuchungen verfolgten das Ziel, einen Leichtmauermörtel LM36 herzustellen. Dabei sollten die Frischmörteleigenschaften mit geeigneten Zusätzen optimiert werden. Die optimierten Rezepturen bestanden aus getrocknetem Porenbetonrezyklat, Zement sowie den Zusätzen Methylhydroxyethylcellulose (MHEC) und Luftporenbildner (M1) bzw. MHEC und Weißkalkhydrat CL90 (M2). Die Komponenten wurden im Trockenmischer des Projektpartners gemischt und in Säcke abgepackt.

Die Konsistenz der Mörtel wurde plastisch eingestellt. Beide Mörtel wiesen eine gute Verarbeitbarkeit auf, wobei sich der Mörtel der Rezeptur M1 geringfügig geschmeidiger erwies. Innerhalb eines Zeitraums von einer Stunde blieb das Ausbreitmaß weitgehend stabil. Der Mörtel der Rezeptur M1 wies einen Luftporengehalt von 15 %, ein Wasserrückhaltevermögen von 94 % und eine Verarbeitbarkeitszeit von 5 Stunden auf. Beim Mörtel der Rezeptur M2 wurden ein Luftporengehalt von 11 %, ein Wasserrückhaltevermögen von 90 % und eine Verarbeitbarkeitszeit von 6 Stunden

festgestellt. Die Frischmörtelrohddichte der Mörtel lag zwischen 1,3 (R1) und 1,4 Mg/m³ (R2).



Abb. 3: Industriell gemischte Werk trocken-Mauermörtel

Die Druckfestigkeit der Mörtel nach 28 Tagen betrug 7,5 (M2) bzw. 11 N/mm² (M1) bei einer Trockenrohddichte unterhalb von 1,0 Mg/m³. Der Elastizitätsmodul lag bei 3.400 N/mm² für den Mörtel der Rezeptur M1 bzw. 4.200 N/mm² für den Mörtel der Rezeptur M2.

Die Fugendruckfestigkeit der Mörtel lag oberhalb von 5 N/mm² und die Verbundfestigkeit zwischen 0,4 und 1,4 N/mm².

Bei einer Lagerung im Normalklima 20/65 wurden nach einem Zeitraum von ca. drei Jahren Schwindverformungen von 2,3 bis 2,4 mm/m verzeichnet, wobei das Schwinden nach einem halben Jahr bereits nahezu abgeschlossen war. Im Feuchtklima 20/95 gelagerte Proben wiesen kein Quellen auf. Mit den o. g. Eigenschaften wurden die Anforderungen an einen Leichtmauermörtel LM36 gemäß DIN V 18580 erfüllt.

Tabelle 3: Ausgesuchte Festmörteleigenschaften der industriell gefertigten Mörtel

Rezeptur	Biegezugfestigkeit [N/mm ²] nach			Druckfestigkeit [N/mm ²] nach			Trockenrohddichte [Mg/m ³] nach	E-Modul [N/mm ²] nach
	2 d	7 d	28 d	2 d	7 d	28 d	28 d	28 d
M1	1,1	2,0	2,7	3,6	6,9	11,1	0,95	3.400
M2	0,8	1,3	2,0	2,3	4,3	7,5	0,92	4.200
Mindestanforderung für einen LM 36 gemäß DIN V 18580:2007-03:						5,0	≤ 1,00	≥ 3.000

Steine aus Porenbetonrezyklaten

Projekt „Leichtstein“

Bei der Erstellung steifer und erdfeuchter Mörtel zeigte sich unter Einwirkung nur geringer Verdichtungsenergie eine überraschend hohe Verdichtungswilligkeit bei hoher Grünstandfestigkeit. So war es naheliegend, diesen Effekt für die Herstellung von Baustoffen zu nutzen, in dem erdfeuchte Gemische aus Porenbetonbrechsanden und einem Bindemittel zu einem formstabilen Formstein verdichtet werden.

Bereits während der Bearbeitung der Projekte zur Entwicklung der Mörtel wurde beobachtet, dass die Verdichtung allein durch Vibration bzw. allein durch Pressung nur eingeschränkt funktioniert. Zur Fertigung von Betonwaren werden Verdichtungsverfahren eingesetzt, die im selben Arbeitsgang die Kompaktierung durch Einleitung von Vibrationsenergie und Komprimierung miteinander kombinieren. Unter der Prämisse, vor allem die Pressung auf eine Intensität unterhalb der Kornfestigkeit der Porenbetongranulate reduzieren zu können, wurde das Rüttel-Pressverfahren der Betonwarenindustrie gewählt, um damit Formsteine aus erdfeuchten Porenbetonmörteln zu entwickeln. Diese Entwicklungsarbeit wurde im Forschungsvorhaben „Leichtstein“ [9] durchgeführt.

Eigens für die Entwicklungsarbeit wurde nach dem Vorbild industrieller Fertigungsanlagen ein Rüttel-Press-Rahmen im Technikumsmaßstab konzipiert. Hiermit konnten Probekörper mit stufenlos wählbarem Pressendruck und wählbarer Rüttelfrequenz hergestellt werden.

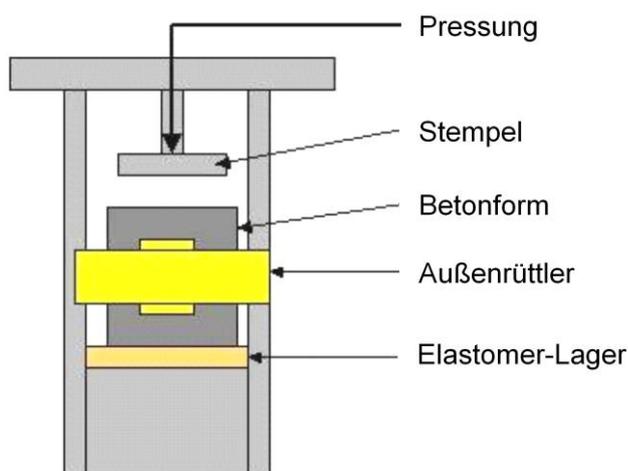


Abb. 4: Rüttel-Press-Rahmen

Der Einfluss der Parameter Pressung sowie Frequenz auf relevante Kenngrößen wurde systematisch untersucht. Für die hier gewählten Rezepturen lagen günstige Verdichtungsbedingungen bei 6 N/mm^2 Pressung und einer Rüttelfrequenz von 200 Hz vor. Optimierte Rezepturen für eine Korngröße des Rezyklats von 2 und 8 mm bestanden aus Porenbetonrezyklat, Zement, Steinkohlenflugasche, Fließmittel und Wasser. Die Eigenschaften der Recyclingsteine lagen zwischen denen von Porenbeton und gefügedichtem Leichtbeton, tendenziell aber näher am Porenbetonstein.

Tabelle 4: Festmörteleigenschaften der leichten Recyclingsteine im Vergleich zum Porenbeton und gefügedichtem Leichtbeton

Eigenschaften	Porenbeton	Leichtmörtelstein aus Porenbetonrezyklaten		Leichtbeton gefügedicht
		R0/2	R0/8	
Trockenrohddichte (90d) [Mg/m ³]	0,35 bis 1,00	1,36	1,34	0,8 bis 2,0
Druckfestigkeit (90d) [N/mm ²]	2 bis 10	12,4	10,9	9 bis 55
Elastizitätsmodul (90d) [N/mm ²]	1.800 bis 6.000	2.600	3.000	8.000 bis 32.000
Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]	0,11 bis 0,31	0,33	0,26	0,39 bis 1,6
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [-]	5 bis 10	44	31	70 bis 150
Wasseraufnahmekoeffizient [kg/(m ² *h ^{0,5})]	4 bis 8	3	2	< 0,5

Grundsätzlich belegen die Kenndaten die günstige Auswirkung der Verwendung möglichst grober Porenbeton-Brechsande. Die Eigenschaften des Recyclingproduktes ähneln dem Primärstoff Porenbeton stärker, je größer der Volumenanteil an ungestörten groben Porenbetongranulaten ist.

Unter Einsatz der Rüttelpressverdichtung gelang es, erdfeuchte Porenbetonmörtel zu stabilen Grünlingen zu verdichten. Nach Härtung des Bindemittels standen die Formkörper einer bautechnischen Nutzung als Wandbaustoff zur Verfügung.

Industrielle Fertigung - Mauerstein

Im Vorhaben „Scale up des Porenbetonrecyclings“ [10] wurden neben Mörtel auch Mauersteine industriell produziert. In umfangreichen Laborversuchen wurden jeweils zwei geeignete Rezepturen entwickelt. Um das Risiko für ein mögliches Sulfatreiben zu minimieren, wurde ein Portlandzement mit hohem Sulfatwiderstand (HS-Zement) verwendet. Beide Rezepturen wurden zusätzlich mit einem üblichen Portlandzement hergestellt. Für die Produktion der Steine wurden Zementgehalte von ca. 180 kg/m³ (Rezepturen S3, S4) und 360 kg/m³ (Rezepturen S1, S2) gewählt. Neben Porenbetonrezyklat der Körnung 0/8 mm und Zement enthielten die Rezepturen Steinkohlenflugasche und Wasser. Die Ausgangsstoffe wurden gemischt und der erdfeuchte Frischbeton in einer Rüttelpresse zu stabilen Steinrohlingen mit den Abmessungen von ca. 250 x 120 x 100 mm auf der Produktionsanlage der Firma Berding Beton in Bremen verdichtet. Während anfangs das Porenbetonrezyklat noch vorgehängt wurde, bevor die restlichen Komponenten dosiert wurden, konnte aufgezeigt werden, dass auf die Vornässung des Recyclingmaterials verzichtet werden kann, wodurch eine zeitlich effizientere Produktion gewährleistet werden konnte.



Abb. 5: Mauerstein-Rohlinge nach dem Verlassen der Verdichtungsanlage

Die Recyclingsteine der Rezepturen S1 und S2 wiesen nach 28 Tagen Druckfestigkeiten von ca. 15 N/mm² bei einer Trockenrohichte unterhalb von 1,2 Mg/m³ auf. Die Endfestigkeit wurde nach 56 Tagen erreicht und betrug ca. 20 N/mm². Eine Einstufung dieser Steine kann in die Druckfestigkeitsklasse 8 bzw. 12 sowie in die Rohdichteklasse 1,20 gemäß DIN V 18152-100:2005-10 erfolgen.

Die Druckfestigkeit der Recyclingsteine der Rezepturen S3 und S4 betrug nach 28 Tagen ca. 5 N/mm². Sie steigerte sich bis zu einem Alter von 90 Tagen auf ungefähr 10 N/mm² bei einer Trockenrohichte unterhalb von 1,0 Mg/m³. Diese Steine können in die Rohdichteklasse 1,00 und die Druckfestigkeitsklasse 4 gemäß der o. g. Norm eingeordnet werden.

Hinsichtlich der Abweichung der Steinabmessungen zum Sollmaß können die Steine i. d. R. der Abmaßklasse D3 gemäß DIN EN 771-3:2005-05 zugeordnet werden.

Die Schwindverformung der Steine bei einer Lagerung im Normalklima 20/65 betrug nach einem Jahr weniger als 1,9 mm/m. Das Quellmaß lag bei einer Lagerung im Feuchtklima 20/95 zwischen 0,2 und 0,8 mm/m, wobei das Endquellmaß bereits nach vier Wochen erreicht wurde.

Die Wasseraufnahme der Steine lag zwischen 2 und 10 kg/(m²·h^{0,5}). Hierbei zeigte die Unterseite der Steine ein stärkeres Saugvermögen auf als die Oberseite.

Eine Frostbeanspruchung mit 14 Frost-Tau-Wechseln zwischen -20 und +20°C wurde von den Steinen der Rezepturen S1 und S2 ohne Schäden überstanden. Die Steine wiesen vor der Frostbeanspruchung einen Feuchtegehalt von ca. 33 M.-% auf. Ein Zyklus dauerte 12 Stunden. Zunächst wurde die Temperatur in der Prüfkammer innerhalb von 4 Stunden von 20°C auf -20°C abgekühlt und diese Temperatur für 3 Stunden gehalten. Anschließend wurde innerhalb von 4 Stunden die Temperatur auf 20°C aufgeheizt und diese für 1 Stunde gehalten.

Tabelle 5: Ausgesuchte Festmörteleigenschaften der industriell gefertigten Steine

Rezeptur	Druckfestigkeit [N/mm ²] nach					Trockenrohichte [Mg/m ³] nach	E-Modul [N/mm ²] nach
	2 d	7 d	28 d	56 d	90 d	28 d	28 d
S1	8,7	11,7	14,8	18,4	18,6	1,15	8.100
S2	11,9	16,2	16,0	20,3	20,0	1,18	9.700
S3	3,5	4,7	5,3	9,0	9,8	0,98	4.800
S4	4,8	6,4	6,2	9,6	11,0	1,00	5.300

Zuordnung in eine Druckfestigkeitsklasse gemäß DIN V 18152-100:2005-10:
 S1: 8; S2: 12; S3: 4; S4: 4

Zuordnung in eine Rohdichteklasse gemäß DIN V 18152-100:2005-10:
 S1: 1,20; S2: 1,20; S3: 1,00; S4: 1,00

Mauerwerk aus Porenbeton-Recyclingprodukten

In [10] wurden nicht nur die Recyclingprodukte einzeln sondern auch im Verbund als Mauerwerk geprüft. Die Druckfestigkeit von Mauerwerksproben, die aus Recyclingsteinen der Rezeptur S4 sowie den Mörteln der Rezepturen M1 und M2 hergestellt wurden, lag zwischen 6,6 und 7,0 N/mm². Die Mauerwerksproben setzten sich aus zwei Steinlängen, einer Steinbreite und fünf Steinlagen zusammen. Die Fugenbreite betrug ca. 12 mm. Mauerwerksproben, die ca. 1,5 Jahre im Normalklima 20/65 gelagert wurden, wiesen Schwindmaße von ca. 0,5 bis 0,6 mm/m auf.

Des Weiteren konnten erste positive Erfahrungen zur Verarbeitung der RC-Baustoffe bei der Vermauerung einer Wandöffnung im Gebäude der Forschungsstelle gewonnen werden. Hierbei wurde festgestellt, dass sich die Steine wie auch der Mörtel zur Herstellung von Mauerwerk eignen. Bei der Verarbeitung sind keine besonderen und aufwändigen Techniken erforderlich. Die Recyclingsteine lassen sich einfach formatieren und aufgrund der Ebenheit wahrscheinlich auch mit einem Dünnbettmörtel verarbeiten. Der Mörtel blieb über einen ausreichend langen Zeitraum verarbeitbar. Ein wiederholtes Durchmischen erwies sich hierbei als vorteilhaft. Der Mörtel ließ sich in der Fuge gut mit einem Schlauch glätten, jedoch ist die Verwendung von Porenbetonrecyklat mit einem Größtkorn von 2 mm für den Mörtel vorzuziehen.



Abb. 6: Mauerwerk aus Porenbeton-Recyclingprodukten
 (links: Mauerwerk bei der Druckprüfung; rechts: ausgemauerte Wandöffnung)

Bremer Demonstrationsvorhaben [11]

Nach der Entwicklung von Mörteln und Formsteinen aus Porenbetonrezyklaten im Labormaßstab und der erfolgreichen Herstellung dieser Recyclingprodukte auf industriellen Anlagen sollen diese nun zur Errichtung von nicht tragenden Innenwänden im Bauvorhaben „Recycling-Station Borgfeld“ in Bremen erstmalig eingesetzt werden. In diesem Bauvorhaben wird ein eingeschossiges Gebäude mit einer Grundfläche von ca. 80 m² neu erstellt. Das Gebäude beinhaltet einen Arbeitsraum, einen Sozialraum, ein Lager sowie Sanitärräume und Umkleiden für das Personal der Recyclingstation. Thematisch passt das Bauvorhaben sehr gut zum Bauprodukt unter dem Motto „Recyclingwände für die Recyclingstation“.

Im Vorhaben wurde das Porenbetonrezyklat von der Firma Brockmann Recycling aus Nützen geliefert. Aufgrund der in [10] gewonnenen Erkenntnis, dass für den Mörtel die Verwendung einer Körnung mit einem Größtkorn von 2 mm vorteilhaft ist, wurde das Rezyklat in den Lieferkörnungen 0/2 und 2/8 mm bezogen. Für die Mörtelherstellung wurde das Material getrocknet und in luftdichte Säcke abgepackt. Das Rezyklat für die Steinherstellung wurde ausgleichsfeucht verwendet. Dieses Material wies vor Produktionsbeginn einen Feuchtegehalt von ca. 10 M.-% auf. Da auf der Produktionsanlage der Firma Berding Beton in Bremen lediglich ein freies Silo für das Porenbetonrezyklat zur Verfügung stand, wurden beide Körnungen zusammen in das Silo gegeben. Somit war eine getrennte Dosierung wie noch in den Laborversuchen bei der Produktion der Steine nicht möglich. Der Anteil von Fein- zu Grobkorn entsprach aber in etwa dem in den Laborversuchen.

Die in Laborversuchen auf das im Vorhaben neu gelieferte Porenbetonrezyklat abgestimmten und im Vergleich zum Vorhaben „Scale up des Porenbetonrecyclings“ geringfügig modifizierten Rezepturen sind in den Tabellen 6 und 7 aufgeführt. Bei der Angabe des Wasserbindemittel- bzw. Wasserzementwertes wurde aus dem Gesamtwasser die Wassermenge, die das Porenbetonrezyklat innerhalb von 30 Minuten ins Korninnere aufnimmt, abgezogen. Die Berechnung des Wasserzementwertes in Tabelle 7 erfolgte ohne die Anrechnung von Flugasche.

Tabelle 6: Angepasste Laborrezeptur - Mörtel

Porenbetonrezyklat 0/2 mm	[kg/m ³]	549
CEM I 42,5 R-SR0/NA	[kg/m ³]	289
Methylhydroxyethylcellulose	[kg/m ³]	0,628
Luftporenbildner	[kg/m ³]	0,042
Gesamtwasser	[kg/m ³]	529
davon Zugabewasser	[kg/m ³]	329
Wasserbindemittelwert w/b	[-]	1,14

Im Vergleich zur Mörtelrezeptur aus dem Vorprojekt wurde das Verhältnis von Zement zum Porenbetonrezyklat mit 1:1,9 Massenteilen verringert und somit der Zementgehalt von ca. 380 auf 290 kg/m³ reduziert. Die Druckfestigkeit der aktuellen Rezeptur war mit ca. 6 N/mm² weiterhin ausreichend hoch. Die Biegezugfestigkeit betrug 1,8 N/mm² bei einer Trockenrohddichte von 0,9 Mg/m³. Des Weiteren wurde der Methylhydroxyethylcellulose-Gehalt von 0,1 % der Trockenmörtelmasse auf 0,075 % gesenkt, da der Mörtel eine etwas zu hohe „Klebrigkeit“ aufwies. Hierdurch wurde das

Wasserrückhaltevermögen nur unwesentlich bis gar nicht beeinflusst und betrug 89 M.-%.

In den Laborversuchen zum Mauerstein wurde zur Verdichtung der Rüttelpressrahmen aus [9] verwendet. Die unten angegebene Laborrezeptur wies im Vergleich zum Vorprojekt mit 1:4,5 Massenteilen ein geringfügig niedrigeres Verhältnis von Zement zum Porenbetonrezyklat auf. Mit einem Wasserzementwert von 0,70 und einer Verdichtung mit einem Pressdruck von 0,45 N/mm² sowie einer Rüttelfrequenz von 100 Hz wurde eine Druckfestigkeit des Formsteins nach 28 Tagen von ca. 8 N/mm² erzielt, was für eine Anwendung als nicht tragendes Mauerwerk mehr als ausreichend ist.

Tabelle 7: Angepasste Laborrezeptur - Mauerstein

Porenbetonrezyklat 0/2 mm	[kg/m ³]	528
Porenbetonrezyklat 2/8 mm	[kg/m ³]	285
CEM I 42,5 R	[kg/m ³]	181
Steinkohlenflugasche	[kg/m ³]	72
Gesamtwasser	[kg/m ³]	429
davon Zugabewasser	[kg/m ³]	126
Wasserzementwert w/z	[-]	0,70

Auf der industriellen Anlage wurden insgesamt 6,2 m³ Rezyklatbeton gemischt. Hieraus wurden ca. 2000 Steine mit den Abmessungen von ca. 250 x 120 x 100 mm hergestellt. Da beide Körnungen des Rezyklats gemeinsam in ein Silo gegeben wurden und eine gute Durchmischung der Körnung nicht mit Sicherheit hergestellt werden konnte, wurde die Wasserdosierung der unterschiedlichen Mischungen manuell, d. h. anhand von Tastversuchen vorgenommen. Somit hatte jede Mischung zwar annähernd die selbe Konsistenz, um einen stabilen Rohling zu erzeugen, der Wasserzementwert variierte aber. In Tabelle 8 sind die anhand der Einwaagen und der Frischmörtelrohddichte errechneten Produktionsrezepturen für den Mauerstein angegeben. Die Unterschiede zur Laborrezeptur ergeben sich aufgrund von nicht identischen Verdichtungsbedingungen gekoppelt mit einer deutlich höheren Wasserdosierung bei der industriellen Produktion.

Die Druckfestigkeit der Mauersteine nach 28 Tagen lag im Mittel bei ca. 9 N/mm bei einer Trockenrohddichte knapp über 1 Mg/m³. Der Wasseraufnahmekoeffizient betrug ca. 6 kg/(m²·h^{0,5}).

Tabelle 8: Produktionsrezepturen - Mauerstein

Porenbetonrezyklat 0/8 mm	[kg/m ³]	672-724
CEM I 42,5 R	[kg/m ³]	151-166
Steinkohlenflugasche	[kg/m ³]	59-68
Gesamtwasser	[kg/m ³]	540-558
davon Zugabewasser	[kg/m ³]	271-302
Wasserzementwert w/z	[-]	1,63-1,96

Im weiteren Verlauf des Vorhabens wird die Pilotcharge des Werk trocken-Mauermörtels hergestellt, aus den Recyclingprodukten werden dann nicht tragende Innenwände im o. g. Bauvorhaben erstellt und die Eigenschaften der RC-Baustoffe ermittelt, gefolgt von einem Monitoring in dem geplanten 2. Teil des Projektes. Im Monitoring der ausgeführten Wände werden Verformungen und mögliche Rissbildungen aufgezeichnet.

Zusammenfassung

An der MPA Bremen wurden im Labormaßstab Verwertungsstrategien auf einem hohen Niveau für Abbruch aus Porenbeton entwickelt. Es wurden Recyclingprodukte für den Mauerwerksbau mit guten bautechnischen Eigenschaften hergestellt.

In Vorbereitung eines Demonstrationsvorhabens wurden die Laborentwicklungen auf eine industrielle Produktion übertragen. Auf den Anlagen der Industriepartner Berding Beton GmbH im Werk Bremen sowie Stebah GmbH & Co. KG in Stuhr wurden Mauersteine und Mauermörtel mit ansprechenden Eigenschaften erfolgreich hergestellt. Im derzeit laufenden Demonstrationsvorhaben wird der gesamte Kreislauf vom Abbruch von Gebäuden aus Porenbeton, über die Aufbereitung, die Anpassung von Laborrezepturen, die Herstellung von Pilotchargen der Recyclingbaustoffe bis zu deren Einsatz in einem Bremer Bauvorhaben zur Errichtung von nicht tragenden Innenwände mit einem anschließenden Monitoring durchlaufen.

Mit den vorliegenden Arbeiten der Forschungsstelle und seinen Partnern wurde ein Verwertungsweg auf hohem Niveau für den problematischen Abbruch aus Porenbeton geschaffen. Hierdurch können Deponien und die Umwelt entlastet und natürliche Ressourcen geschont werden. Bauschutt aufbereiter können aus einem Abfallstoff, der derzeit der Deponierung zugeführt wird, einen Gewinn erwirtschaften und Hersteller können ihre Produktpalette durch nachhaltige Recyclingprodukte erweitern.

Förderhinweis

Die IGF-Vorhaben [7, 8, 9 und 16] der Forschungsvereinigung Recycling und Wertstoffverwertung im Bauwesen e.V. – RWB, wurden 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.

Die Förderung des Vorhabens FV 212 [10] erfolgte durch das Land Bremen aus dem Förderprogramm Angewandte Umweltforschung und aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung EFRE 2007-2013.

EUROPÄISCHE UNION: Investition in Ihre Zukunft – Europäischer Fonds für regionale Entwicklung.



Europäische Union
„Investition in Ihre Zukunft“
Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung

Das Demonstrationsvorhaben [11] wird mit Mitteln der Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert.

Literatur

- [1] Homann, M.: Porenbeton Handbuch, 6. Auflage. Bauverlag, Gütersloh, 2008
- [2] Deutsche Gesellschaft für Mauerwerksbau e.V. (DGfM), Angaben der Mitglieder: Absatzmengen und Marktanteile der Mauersteinhersteller. ohne Datum
- [3] Harder, J.: Übersicht der europäischen Porenbetonindustrie, Teil 1: Marktentwicklung, Absatzzahlen, ausgewählte Länder. Betonwerk + Fertigteil-Technik 12/2009
- [4] Bundesverband Porenbeton e. V.: Merkblatt zum Deponieren von Porenbeton. Wiesbaden, ohne Datum
- [5] Lang-Beddoe, I.; Schober, G.: Wiederverwertung von Porenbeton. Baustoff Recycling + Deponietechnik 12/1999, S. 4-8
- [6] Xella International GmbH: Xella Nachhaltigkeitsbericht 2014, Juni 2014
- [7] Diedrich, R.; Brauch, A.; Kropp, J.: Werk trockenmörtel mit Porenbetongranulaten aus der Bauschutttaufbereitung. Schlussbericht zum IGF-Forschungsvorhaben 11764 N, 2001
- [8] Aycil, H.; Kropp, J.: Werk trockenmörtel mit Porenbetonrezyklaten aus der Bauschutttaufbereitung. Schlussbericht zum IGF-Forschungsvorhaben 13994 N, 2006
- [9] Hlawatsch, F.: Leichte Wandbaustoffe aus Porenbetonbrechsanden. Schlussbericht zum IGF-Forschungsvorhaben 14280 N, 2008
- [10] Aycil, H.; Kropp, J.: Scale up des Porenbetonrecyclings. Schlussbericht zum AUF-/EU-Forschungsvorhaben FV 212, 2014
- [11] Aycil, H.; Kropp, J. (laufendes FV): „Hochwertige Wiederverwendung von mineralischem Abbruchmaterial und erstmaliger Einsatz von Baustoffen aus Porenbetonrezyklaten in einem Bauvorhaben zur Errichtung von nicht tragenden Innenwänden“; DBU-Vorhaben 31711
- [12] Ahlers, U.; Pfitzner, C.; Grahlert, H.: Praxisbericht über den Einsatz von Ersatzbaustoffen in der Region Sachsen-Anhalt. Vortragsfolien zur Veranstaltung „Regionale Baustoffe – Chancen für Ersatzbaustoffe“ in Magdeburg, 07.11.2012
- [13] LUS GmbH: Verfahren zur Aufbereitung von Baggergut aus aquatischen Bereichen zu einem umweltfreundlichen Werkstoff. Patent DE102007013895, 2008
- [14] Müller, A.: Blähgranulate aus Mauerwerkbruch. Ratgeber Abbruch & Recycling, 2004, S. 85-89
- [15] Niedersen, K.-U.; Flick, G.; Memmler, H.-J.: Porenbetonbruch als Bodenverbesserer im Landbau, Müll und Abfall 5/2004, S. 231-234
- [16] Bukowski, G.; Eden, W.; Küver, J.; Kurkowski, H.; Lau, J.-J.; Remesch, M.: Bioaktivierung von Porenbeton- und Kalksandstein-Recyclinggranulaten mit Methan oxidierenden Bakterien zur Reduktion von Methan ausgasungen aus Hausmülldeponien – ein Beitrag zum Klima- und Ressourcenschutz – METHANOX II. Forschungsbericht Nr. 118 zum IGF-Forschungsvorhaben 16637 N, Januar 2015
- [17] Volk, J.; Schirmer, P.: Bewertung der Verwendung von Porenbetonrezyklaten für die Herstellung von Bodenwertstoffen und Düngemitteln. Tagungsband zur Fachtagung Recycling R'10, S.52-53, 22.-23.09.2010, Weimar