

Stiftung Institut für Werkstofftechnik

**Hochwertige Wiederverwendung von mineralischem
Abbruchmaterial und erstmaliger Einsatz von Bau-
stoffen aus Porenbetonrezyklaten in einem Bauvor-
haben zur Errichtung von
nicht tragenden Innenwänden**

Abschlussbericht zum Forschungsprojekt
mit dem Aktenzeichen 31711,
gefördert von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



von

Prof. Dr.-Ing. Jörg Kropp & Dipl.-Ing. Hakan Aycil

Bremen, März 2018

Bezugsmöglichkeit des Abschlussberichtes

Amtliche Materialprüfungsanstalt der Freien Hansestadt Bremen,
ein Geschäftsbereich der Stiftung Institut für Werkstofftechnik
Paul-Feller-Straße 1
28199 Bremen

Tel.: +49 (0)421 53 708 – 0
Fax: +49 (0)421 53 708 – 10
E-Mail: info@mpa-bremen.de

Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Hakan Aycil
Tel.: +49 (0)421 53708 – 60
E-Mail: aycil@mpa-bremen.de

Stiftung Institut für Werkstofftechnik

**Hochwertige Wiederverwendung von mineralischem
Abbruchmaterial und erstmaliger Einsatz von Bau-
stoffen aus Porenbetonrezyklaten in einem Bauvor-
haben zur Errichtung von
nicht tragenden Innenwänden**

Abschlussbericht zum Forschungsprojekt
mit dem Aktenzeichen 31711,
gefördert von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



von

Prof. Dr.-Ing. Jörg Kropp & Dipl.-Ing. Hakan Aycil

Bremen, März 2018

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	31711/01	Referat	23	Fördersumme	89.344 €
----	-----------------	---------	-----------	-------------	-----------------

Antragstitel **Hochwertige Wiederverwendung von mineralischem Abbruchmaterial und erstmaliger Einsatz von Baustoffen aus Porenbetonrezyklaten in einem Bauvorhaben zur Errichtung von nicht tragenden Innenwänden**

Stichworte Ressource, Demonstration, Qualität, Bau, Abfall, Verwertung

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
15 Monate	06.05.2015	05.08.2016 (31.12.2017)	1

Zwischenberichte

Bewilligungsempfänger	Stiftung Institut für Werkstofftechnik IWT Badgasteiner Str. 3 28359 Bremen	Tel	0421/21851400
		Fax	0421/21851333
		Projektleitung Prof. Dr.-Ing. Jörg Kropp	
		Bearbeiter Dipl.-Ing. Hakan Aycil	

Kooperationspartner Brockmann Recycling GmbH, Heinrich-Brockmann-Str. 1, 24568 Nützen
Stebah GmbH & Co. KG, Gutenbergstr. 4 b, 28816 Stuhr
Forschungsvereinigung RWB e. V., Paul-Feller-Str. 1, 28199 Bremen

Weitere Beteiligte Berding Beton GmbH, Freie Hansestadt Bremen, Immobilien Bremen AöR

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

In mehreren F&E Projekten wurden an der MPA Bremen, ein Geschäftsbereich der Stiftung Institut für Werkstofftechnik, Verwertungsstrategien entwickelt für Porenbetonschutt, ein Abbruchmaterial, das aufgrund seiner physikalischen, chemischen und ökologischen Eigenschaften bislang vom restlichen Bauschutt aussortiert und deponiert werden muss. Im Labormaßstab wurden leichte Recyclingwerkstoffe hergestellt für den Mauerwerksbau (Wandbausteine und Mörtel), die die bauphysikalischen Vorteile des Porenbetons weitgehend beibehalten. Die Produktion der Recyclingbaustoffe auf Industrieanlagen wurde bereits erfolgreich erprobt.

Das Ziel des beantragten Demonstrationsprojekts ist es, die an der MPA Bremen entwickelten Baustoffe aus Porenbetonrezyklaten erstmalig in einem Bauvorhaben zur Errichtung von nicht tragenden Innenwänden einzusetzen, um so die Baupraxis und die Öffentlichkeit über umweltbewusste Technologien zu informieren. Durch die Wiederverwertung eines problematischen Abbruchmaterials auf demselben technisch hohen Niveau wie das Primärprodukt werden Deponien und die Umwelt entlastet sowie Ressourcen geschont.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Es soll der gesamte Kreislauf vom Abbruch von Gebäuden aus Porenbeton über die Aufbereitung des Bauschutts durch das Recyclingunternehmen Brockmann Recycling GmbH, die Charakterisierung des Porenbetonrezyklats, die Herstellung von Pilotchargen der Recyclingbaustoffe (Mauersteine durch die Firma Berding Beton GmbH sowie Werk trocken-Mauermörtel durch die Firma Stabah GmbH & Co. KG) und Ermittlung ihrer Eigenschaften, die Erwirkung einer Zustimmung im Einzelfall bis hin zur Errichtung von nicht tragenden Innenwänden aus den Recyclingprodukten im Bauvorhaben „Recycling-Station Bremen-Borgfeld“ durchlaufen werden. Das Bauvorhaben wird von der Freien Hansestadt Bremen zur Verfügung gestellt. Die Realisierung der Baumaßnahme erfolgt durch Immobilien Bremen. In einem anschließenden 2. Teilprojekt sollen ein begleitendes Monitoring sowie umfangreiche Öffentlichkeitsarbeiten durchgeführt werden.

Ergebnisse und Diskussion

Das Porenbetonrezyklat wurde in einer Körnung 0/2 und 2/8 mm bezogen. Das Material wurde in Big Bags geliefert. Vor dem Befüllen der Big Bags wurde die Gesamtmenge der jeweiligen Körnung durch Mischen und mehrfaches Umsetzen homogenisiert. Eine Teilmenge der Körnung 0/2 mm wurde getrocknet und für die Trockenmörtelherstellung in luftdichten Kunststoffsäcken abgepackt. An den Rezyklatkörnungen wurden die Korngrößenverteilung, die Wasseraufnahme, die Kornrohichte, die Schüttdichte sowie der Sulfatgehalt untersucht. Des Weiteren erfolgten Prüfungen auf die Anwesenheit von gesundheitsgefährdenden Stoffen. Die Kornrohichte der Brechsandkörnung betrug $1,3 \text{ Mg/m}^3$, während die Splittkörnung eine Kornrohichte von $1,1 \text{ Mg/m}^3$ aufwies. Die Wasseraufnahme der Rezyklatkörnungen nach 24 Stunden Wasserlagerung betrug 38 (Brechsand) bzw. 41 M.-% (Splitt). In beiden Körnungen wurde ein Sulfatgehalt von 2,6 M.-% bestimmt. Während in den Rezyklaten keine Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW), polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK), polychlorierten Biphenyle (PCB) und Asbest vorgefunden wurden, enthielten sie künstliche Mineralfasern (KMF). Es handelte sich aber fast ausschließlich um nicht lungengängige Fasern in einer unbedenklich geringen Menge.

In Laborversuchen wurden die Rezepturen für den Mauerstein und den Mauermörtel aus dem Vorläufervorhaben an die aktuelle Rezyklatkörnung angepasst und weiter optimiert. Anschließend wurden Pilotchargen der Recyclingprodukte auf industriellen Anlagen hergestellt und deren Eigenschaften ermittelt. Die Recyclingsteine bestanden überwiegend aus Porenbetonrezyklat. Das Raumteilverhältnis von Zement zu Porenbetonrezyklat betrug 1:11. Dieses Verhältnis lag beim Mauermörtel bei 1:4,5.

Die Mauersteine wiesen nach 28 Tagen eine Druckfestigkeit von 9 N/mm^2 bei einer Trockenrohichte von $1,1 \text{ Mg/m}^3$ auf. Mit Raumluftmessungen wurde abgesichert, dass das Bohren der Steine zu keiner Belastung der Raumluft durch lungengängige KMF führt.

Am Recyclingmörtel wurden Frisch- wie auch Festmörtel Eigenschaften ermittelt. Der Mörtel wies eine gute Verarbeitbarkeit sowie ein hohes Wasserrückhaltevermögen auf. Die Mörteldruckfestigkeit nach 28 Tagen betrug 6 N/mm^2 bei einer Trockenrohichte von $0,9 \text{ Mg/m}^3$.

Die Recyclingmaterialien wurden im Bauvorhaben "Recyclingstation Bremen-Borgfeld" erstmalig zur Errichtung von nicht tragenden Innenwänden eingesetzt. Es wurden zwei Wandabschnitte mit einer Länge von ca. 4 m errichtet. Der Mörtel und auch die Steine ließen sich ohne zusätzlichen Aufwand wie herkömmliche Wandbaustoffe verarbeiten. Eine der Wandflächen wurde als Sichtmauerwerk belassen, während die restlichen Wandflächen verputzt wurden. Auch baubegleitend wurden die Materialeigenschaften der Recyclingbaustoffe ermittelt. Das Ziel des Vorhabens wurde in vollem Umfang erreicht.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Projektergebnisse wurden bislang auf der Konferenz Mineralische Nebenprodukte und Abfälle in Berlin (2016-06), auf der Fachtagung Recycling R'16 in Weimar (2016-09), auf dem 1. Norddeutschen Fachsymposium Recycling-Baustoffe in Kiel (2017-03) sowie auf dem Kongress 2018 Baustoffrecycling- und Wertstoffverwertung in Bremen (2018-03) präsentiert. Des Weiteren wurde das Projekt in mehreren Zeitungsartikeln und Veröffentlichungen (Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 3, ZKG-Drymix 2017) sowie auf der Homepage und den Jahresberichten der Forschungsstelle vorgestellt. Die errichteten Wände sind dauerhafte Exponate. In einem Folgevorhaben sollen Führungen zur Recyclingstation organisiert sowie eine Broschüre und eine zusammenfassende Schrift in gebundener Form erstellt werden.

Fazit

Im Vorhaben wurden erstmalig Recyclingbaustoffe aus Porenbetonrezyklaten als Wandbildner in einem Bauvorhaben eingesetzt und deren Eignung unter baupraktischen Bedingungen nachgewiesen. Durch die Wiederverwendung dieses problematischen Abbruchmaterials auf demselben technisch hohen Niveau wie das Primärprodukt können Deponien und die Umwelt entlastet sowie natürliche Ressourcen geschont werden.

In einem Folgevorhaben soll ein Monitoring der errichteten Wände erfolgen sowie weitere Öffentlichkeitsarbeit betrieben werden.

Als nächster Schritt in Richtung Praxiseinsatz könnte die Forschungsstelle Hilfestellung für potenzielle Hersteller der Recyclingprodukte bei der Erwirkung einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung leisten. Als Fortführung der Arbeiten strebt die Forschungsstelle zudem die Untersuchung der Eignung von Produkten aus Porenbetonrezyklaten für tragende Bauteile an.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Ausgangsstoffe.....	2
2.1 Porenbetonrezyklat	2
2.1.1 Allgemein.....	2
2.1.2 Korngrößenverteilung	3
2.1.3 Wasseraufnahme und Kornrohichte	3
2.1.4 Schüttdichte.....	4
2.1.5 Sulfatgehalt.....	5
2.1.6 Gesundheitsgefährdende Stoffe	5
2.2 Weitere Ausgangsstoffe	8
3 Laborversuche	9
3.1 Mauersteine	9
3.2 Mauermörtel.....	11
4 Industriell gefertigte Recyclingbaustoffe	14
4.1 Mauersteine	14
4.2.1 Herstellung	14
4.2.2 Probenentnahme	16
4.2.3 Druckfestigkeit und Trockenrohichte	17
4.2.4 Maße	18
4.2.5 Elastizitätsmodul.....	18
4.2.6 Längenänderung	19
4.2.7 Wasseraufnahme	21
4.2.8 Raumlufmessungen vor und nach dem Bohren in Recyclingsteine.....	21
4.2 Mauermörtel.....	23
4.2.1 Herstellung	23
4.2.2 Probenentnahme und Sackgewicht.....	23
4.2.3 Trockenmörtel.....	24
4.2.4 Frischmörtel.....	25
4.2.5 Festmörtel.....	27
5 Errichtung von Wänden aus Porenbeton-Recyclingprodukten	28
5.1 Recyclingstation Borgfeld.....	28
5.2 Errichtung der Wände	29
5.3 Probenentnahme.....	30
5.4 Eigenschaften von auf der Baustelle entnommenen Recyclingprodukten.....	31

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Korngrößenverteilung PBR 0/2	3
Tabelle 2: Korngrößenverteilung PBR 2/8	3
Tabelle 3: Wasseraufnahme und Kornrohdichte PBR 0/2 und 2/8	4
Tabelle 4: Schüttdichte PBR 0/2 und 2/8	4
Tabelle 5: Sulfatgehalt PBR 0/2 und 2/8.....	5
Tabelle 6: PCB-Gehalt PBR 0/2 und 2/8	6
Tabelle 7: Übersicht detektierter und vermessener KMF	8
Tabelle 8: Versuchsplan Mauersteine	9
Tabelle 9: Laborrezepturen Mauersteine	10
Tabelle 10: Dichten und Druckfestigkeit der Steine	10
Tabelle 11: Versuchsplan Mauermörtel	11
Tabelle 12: Laborrezepturen Mauermörtel.....	12
Tabelle 13: Eigenschaften laborgemischter Mauermörtel.....	14
Tabelle 14: Einwaagen der Ausgangsstoffe - Mauersteinproduktion.....	15
Tabelle 15: Rezepturen Mauersteinproduktion	16
Tabelle 16: Druckfestigkeit und Trockenrohdichte	17
Tabelle 17: Maximale Abweichung von den Nennmaßen.....	18
Tabelle 18: Elastizitätsmodul	18
Tabelle 19: Längenänderung und Feuchtegehalt der Steine L1-L3.....	20
Tabelle 20: Längenänderung und Feuchtegehalt der Steine L4-L6.....	20
Tabelle 21: Wasseraufnahmekoeffizient.....	21
Tabelle 22: Parameter der Probenahme.....	22
Tabelle 23: Ergebnis der Raumlufmessungen.....	22
Tabelle 24: Einwaage der Ausgangsstoffe - Werk trockenmörtel	23
Tabelle 25: Gewicht entnommener Trockenmörtelsäcke.....	24
Tabelle 26: Kornzusammensetzung Werk trockenmörtel	24
Tabelle 27: Schüttdichte Werk trockenmörtel	25
Tabelle 28: Weitere Frischmörtel eigenschaften.....	26
Tabelle 29: Festmörtel eigenschaften werk gemischter Trockenmörtel	27
Tabelle 30: Biegezug-, Druckfestigkeit und Trockenrohdichte ³² baustellengemischter Mörtel	32
Tabelle 31: Fugendruckfestigkeit baustellengemischter Mörtel	32
Tabelle 32: Längenänderung der Mörtelprismen S1-S3	33
Tabelle 33: Druckfestigkeit und Trockenrohdichte von der Baustelle entnommener Steine	34
Tabelle 34: Längenänderung der Mauersteine L7-L9.....	35

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: REM-Aufnahme PBR 0/2	7
Abbildung 2: EDX-Spektrum der Faser in Abb. 1, Ergebnis: KMF	7
Abbildung 3: REM-Aufnahme PBR 2/8	8
Abbildung 4: EDX-Spektrum der Faser in Abb. 3, Ergebnis: KMF	8
Abbildung 5: Grundriss des Gebäudes im Bauvorhaben „Recyclingstation-Borgfeld“ ...	28
Abbildung 6: Wände aus Porenbetonrecyclingprodukten, Übersicht	29
Abbildung 7: Wände aus Porenbetonrecyclingprodukten, Ansicht vom Büroraum	30
Abbildung 8: Wände aus Porenbetonrecyclingprodukten, Ansicht vom Sozialraum	30

Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Ausbreitmaß der Rezyklatmörtel in Abhängigkeit der Zeit	13
Diagramm 2: Konsistenz werkgemischter Mörtel in Abhängigkeit der Zeit	26

Abkürzungsverzeichnis

PBR:	Porenbetonrezyklat
CEM:	Zement
SFA:	Steinkohlenflugasche
MHEC:	Methylhydroxyethylcellulose
LP:	Luftporenbildner
W_{ZG} :	Zugabewasser
$W_{ges.}$:	Gesamtwasser
$w/z_{eff.}$:	Effizienter Wasserzementwert
Δ_{a5-40} :	Differenz zwischen dem Ausbreitmaß 5 und 40 min nach Mischbeginn
ρ_{FM} :	Frischmörtelrohddichte
ρ_{tr} :	Trockenrohddichte
WRV:	Wasserrückhaltevermögen
BZ:	Biegezugfestigkeit
D:	Druckfestigkeit
MKW:	Mineralölkohlenwasserstoffe
PAK:	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCB:	Polychlorierte Biphenyle
KMF:	Künstliche Mineralfasern
DC:	Dünnschichtchromatographie
REM:	Rasterelektronenmikroskop
EDX:	Energiedispersive Röntgenmikroanalyse
FGSV:	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen

Zusammenfassung

In mehreren Vorgängervorhaben wurden an der Materialprüfungsanstalt der Freien Hansestadt Bremen Verwertungsstrategien für Porenbetonbruch, ein Abbruchmaterial, das aufgrund seiner physikalischen, chemischen und ökologischen Eigenschaften bislang vom restlichen Bauschutt aussortiert und deponiert werden muss, entwickelt. Im Labormaßstab wurden leichte Werk trockenmörtel und Wandbausteine hergestellt und deren Produktion auf vorhandenen industriellen Anlagen erfolgreich erprobt. Im vorliegenden Vorhaben wurden diese Recyclingprodukte nun zur Errichtung von nicht tragenden Innenwänden im Bauvorhaben „Recyclingstation Borgfeld“ in Bremen erstmalig unter baupraktischen Bedingungen eingesetzt. Da eine Gefahr im Sinne von § 3 Absatz 1 der BremLBO für die vorgesehene Verwendung der RC-Materialien nicht zu erwarten war, wurde einem Antrag auf Verzicht der Forderung einer Zustimmung im Einzelfall seitens der Obersten Bauaufsichtsbehörde Bremen stattgegeben.

Das Porenbetonrezyklat (PBR) bestand aus Brechsand der Körnung 0/2 mm und Splitt der Körnung 2/8 mm. Für die Herstellung des Werk trocken-Mauermörtels wurde getrockneter Brechsand und zur Herstellung der Mauersteine Brechsand und Splitt in einem Verhältnis von 70:30 M.-% verwendet. Nach der Ermittlung der Eigenschaften der RC-Körnungen wurden die Rezepturen in Laborversuchen an die Körnung angepasst und weiter optimiert. Das Raumteilverhältnis von Zement zu PBR betrug beim RC-Mörtel 1:4,5, beim RC-Mauerstein sogar 1:11. Es wurden Pilotchargen der Recyclingbaustoffe hergestellt und deren Eigenschaften ermittelt. An den Mauersteinen wurden die Maße, die Trockenrohddichte, die Druckfestigkeit, der Elastizitätsmodul, die Wasseraufnahme sowie die Längenänderung im Normklima (20/65) ermittelt. Am Mauermörtel wurden die Kornzusammensetzung, die Schüttdichte, das Ausbreitmaß innerhalb von 60 Minuten nach Mischbeginn, die Frischmörteldichte, das Wasserrückhaltevermögen, die Verarbeitbarkeitszeit, die Trockenrohddichte sowie die Biegezug- und die Druckfestigkeit ermittelt. Auch während der Errichtung der Innenwände im Bauvorhaben wurden Materialproben entnommen und deren Eigenschaften bestimmt. Hierbei wurden auch die Längenänderung des Mauermörtels im Normklima (20/65) sowie dessen Fugendruckfestigkeit untersucht.

Die Mauersteine wiesen nach 28 Tagen eine Druckfestigkeit von 9 N/mm² bei einer Trockenrohddichte von 1,1 Mg/m³ auf. Der Mörtel wies nach 28 Tagen eine Druckfestigkeit von 6 N/mm² bei einer Trockenrohddichte von 0,9 Mg/m³ auf. Da in dem PBR sehr geringe Anteile überwiegend nicht lungengängiger künstlicher Mineralfasern (KMF) vorgefunden wurden, wurde mit Raumluftmessungen abgesichert, dass durch das Bohren der Steine keine lungengängigen KMF freigesetzt werden.

Die RC-Baustoffe ließen sich im Bauvorhaben ohne zusätzlichen Aufwand wie vergleichbare herkömmliche Baumaterialien verarbeiten. Zwei Wandabschnitte mit einer Länge von ca. 4 m und einer Höhe von 3 m wurden erfolgreich errichtet.

Das Ziel des Vorhabens wurde in vollem Umfang erreicht.

1 Einleitung

Porenbeton wird aufgrund seiner hervorragenden bauphysikalischen Eigenschaften und seiner leichten Verarbeitbarkeit seit mehreren Jahrzehnten verstärkt im Hochbau eingesetzt. Mit einer der Lebensdauer entsprechenden Phasenverschiebung erscheint das Material im Bauschutt aus Rückbaumaßnahmen. Es stellt sich somit die Frage, wie mit diesem Material, das aufgrund seiner außerordentlich hohen Porosität eine geringe Festigkeit und einen geringen Widerstand gegen Witterungseinflüsse aufweist, bezüglich Verwertung oder Entsorgung umzugehen ist. Derzeit ist der Rücklauf von Porenbeton im Vergleich zu den zukünftig zu erwartenden Mengen noch gering. Die anfallenden Mengen werden aussortiert und deponiert. Eine Deponierung der Porenbetonabbruchmassen ist aber teuer und Deponieraum nur begrenzt vorhanden.

Mineralische Abbruchmassen, zu denen auch Porenbeton zählt, werden hauptsächlich im Straßenbau eingesetzt. Hier wird ein Mindestmaß an Festigkeit und Frostwiderstand der Altbaustoffe gefordert, die Porenbeton jedoch nicht erfüllt.

Gegenwärtig wird sortenreiner Porenbetonbruch entweder in die Produktion zurückgeführt oder zu Granulat aufbereitet und für Wärmedämmschüttungen, Dachbegrünungen, als Ölbinder oder auch als Hygienestreu genutzt. Die Mengen, die auf diesem Weg verwertet werden, sind aber im Vergleich zu den derzeit anfallenden und insbesondere zu den zukünftig zu erwartenden Abbruchmassen sehr gering. Sie werden bereits durch den Produktionsausschuss der Porenbetonwerke mehr als gedeckt. Zudem beschränken sich die genannten Verwertungswege hauptsächlich auf die grobe Splittfraktion. Bei der Aufbereitung von Porenbeton fällt aber ein hoher Brechsandanteil an. Dieser beträgt selbst bei schonenden Aufbereitungsverfahren noch über 50 %.

Daher wurden an der MPA Bremen im Rahmen der Bearbeitung dreier IGF-Forschungsvorhaben im Labormaßstab zwei bautechnische Verwertungswege insbesondere für die Feianteile des Porenbetonschutts entwickelt, die ein Recycling des problematischen Abbruchmaterials auf sehr hohem Niveau ermöglichen. Beide Verwertungsmöglichkeiten verfolgten das Arbeitsziel, die Porenbetonbrechsande in eine Zementsteinmatrix einzubetten:

- Verwertungsweg 1: Herstellung von leichten Mauersteinen (IGF 14280 N)
„Leichtstein“ [1]
- Verwertungsweg 2: Herstellung von leichten Mörteln (IGF 11764 N und IGF 13994 N)
„PB-Mörtel I und II“ [2, 3]

Zur Umsetzung der Projektergebnisse der o. g. Forschungsvorhaben in die Baupraxis war es erforderlich, größere Mengen der entwickelten Recyclingprodukte fertigen zu können. Hierzu mussten die Ergebnisse aus den Laborversuchen auf industrielle Produktionsanlagen überführt werden. Dieses Ziel wurde im abgeschlossenen Vorhaben der Forschungsstelle mit dem Kurztitel „RecyLeichtwand“ [4], gefördert durch das Land Bremen und der EU, bereits erreicht. Auf den Produktionsanlagen der Firmen Berding Beton in Bremen und Stebah in Stuhr wurden Mauersteine und Werk trockenmauermörtel aus Porenbetonrezyklaten erfolgreich hergestellt. Das Ziel des vorliegenden Vorhabens war es, erneut Recyclingprodukte aus Porenbetonrezyklaten nach Anpassung der Rezepturparameter auf die Eigenschaften der neu aufbereiteten Rezyklatkörnung auf den Anlagen der Partner herzustellen und zur

Errichtung von nicht tragenden Innenwänden in dem Bauvorhaben „Recyclingstation Bremen-Borgfeld“ unter baupraktischen Bedingungen einzusetzen.

2 Ausgangsstoffe

2.1 Porenbetonrezyklat

2.1.1 Allgemein

Das Porenbetonrezyklat wurde von der Firma Brockmann Recycling GmbH aus Nützen bezogen. Materialinput aus Porenbeton, Kalksandstein und Gips wird vom Recyclingunternehmen i. d. R. vom restlichen Bauschutt getrennt und auf der Deponie entsorgt. Für das Vorhaben wurde der Porenbeton aus dem genannten Materialgemisch aussortiert und vor der Witterung geschützt in Containern gelagert. Nach erfolgter Lufttrocknung wurde das Material in einem Backenbrecher gebrochen und in mehrere Fraktionen aufgeteilt. Fremdbestandteile wurden, soweit möglich, aussortiert. Über Förderbänder wurde das fraktionierte Recyclingmaterial in unterschiedliche Container verfrachtet. Material über 32 mm Korngröße wurde erneut in den Brecher gegeben. Neben frischem Abbruchmaterial wurde auch aufbereitetes Restmaterial aus einem Vorläufervorhaben verwendet. Zum Einsatz im Vorhaben kamen die Fraktionen 0/2 und 2/8 mm. Da das Abbruchmaterial heterogen war, wurde das aufbereitete Material zwecks Homogenisierung im Container wie auch nach dem Abkippen des Containerinhalts mehrfach umgesetzt. Abschließend wurde das Recyclingmaterial in Big Bags gefüllt. Insgesamt wurden neun Big Bags Porenbetonrezyklat der Körnung 0/2 mm und vier Big Bags der Körnung 2/8 mm geliefert, davon zwei Big Bags der Körnung 0/2 mm und ein Big Bag der Körnung 2/8 mm an die Forschungsstelle. Das restliche Material wurde an die Firma Berding Beton geliefert. An der von der Forschungsstelle empfangenen Teilmenge wurden die Materialeigenschaften bestimmt. Des Weiteren wurde es für Voruntersuchungen zum Stein und Mörtel verwendet. Die Recyclingkörnung 0/2 mm wurde für die Mörtelherstellung bei der Firma Stehbah im Labor der Forschungsstelle getrocknet und anschließend in diffusionsdichte Säcke in Mengen zu je 15 kg gefüllt. Bilder des Abbruchmaterials sowie der Aufbereitung finden sich im Anhang A1 zu diesem Bericht.

In den nachfolgenden Tabellen 1 bis 5 sind die Ergebnisse der Untersuchungen der Rezyklateigenschaften dargestellt. Die Korngrößenverteilung wurde gemäß DIN EN 933-1:2012-03 [5], die Wasseraufnahme und die Kornrohichte gemäß DIN EN 1097-6:2013-09 [6], die Schüttdichte gemäß DIN EN 1097-3:1998-06 [7] und der Sulfatgehalt gemäß DIN EN 196-2:2013-10 [8] ermittelt. Abweichend zur Norm DIN EN 1097-6 erfolgte die Rücktrocknung der wassergesättigten Proben in einem durch die Forschungsstelle entwickelten Kernfeuchteprüfstand [9].

Aufgrund der Homogenisierung des aufbereiteten Materials konnten die ermittelten Ergebnisse auch auf die restlichen Rezyklatmengen übertragen werden.

2.1.2 Korngrößenverteilung

Die Rezyklatkörnung PBR 0/2 wies im Mittel einen Anteil abschlämmbarer Bestandteile von 12,5 M.-% und einen Überkornanteil von 1,5 M.-% auf. Ungefähr die Hälfte der Körnung bestand aus der Fraktion 0,25 bis 1 mm.

Die Lieferkörnung PBR 2/8 wies mit 54,1 M.-% einen sehr hohen Unterkornanteil und einen geringen Überkornanteil von 0,3 M.-% auf. Der Anteil von 2 bis 8 mm betrug lediglich 45,6 M.-%.

Die Sieblinien der Körnungen PBR 0/2 und PBR 2/8 sind im Anhang A2 dargestellt.

Tabelle 1: Korngrößenverteilung PBR 0/2

Siebweite [mm]	Durchgang [M.-%]				Mittelwert
	Big Bag 1, Probe 1	Big Bag 1, Probe 2	Big Bag 2, Probe 1	Big Bag 2, Probe 2	
8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
4	99,4	99,6	99,6	99,8	99,6
2	98,2	98,3	98,6	98,7	98,5
1	86,6	86,5	87,1	87,1	86,8
0,5	61,2	61,3	61,5	61,0	61,2
0,25	35,6	36,4	35,4	34,6	35,5
0,125	20,7	21,7	21,0	20,1	20,9
0,063	11,9	12,8	13,0	12,3	12,5
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabelle 2: Korngrößenverteilung PBR 2/8

Siebweite [mm]	Durchgang [M.-%]		Mittelwert
	Big Bag 1, Probe 1	Big Bag 1, Probe 2	
11,2	100,0	100,0	100,0
8	99,6	99,8	99,7
4	81,4	80,5	81,0
2	54,9	53,3	54,1
1	44,2	42,9	43,6
0,5	32,0	31,2	31,6
0,25	19,9	19,7	19,8
0,125	12,3	12,3	12,3
0,063	7,4	7,6	7,5
0	0,0	0,0	0,0

2.1.3 Wasseraufnahme und Kornrohddichte

Die Wasseraufnahme der Körnung PBR 0/2 nach 24 Stunden betrug ca. 38 M.-%. Mit ca. 36 M.-% war ein Großteil dieser Wassermenge bereits nach 30 Minuten Wasserlagerung aufgenommen. Die Kornrohddichte des Materials betrug 1,30 Mg/m³.

Die Splittkörnung PBR 2/8 wies aufgrund der hohen Brechsandanteile mit ca. 41 M.-% eine nur geringfügig höhere Wasseraufnahme nach 24 Stunden auf. Auch hier wurde bereits nach 30 Minuten der Wasserlagerung ein Großteil dieser Wassermenge von der Rezyklatkörnung aufgenommen. Die Kornrohichte war mit 1,13 Mg/m³ etwas niedriger als die der Brechsandkörnung PBR 0/2.

Tabelle 3: Wasseraufnahme und Kornrohichte PBR 0/2 und 2/8

Körnung	Big Bag Nr.	Proben-Nr.	Wasseraufnahme [M.-%] nach		Kornrohichte [Mg/m ³]
			30 min	24 h	
PBR 0/2	1	1	35,79	38,09	1,296
		2	36,19	37,50	1,307
	2	1	37,75	38,42	1,287
		2	35,84	37,01	1,308
Mittelwert			36,4	37,8	1,30
PBR 2/8	1	1	38,80	41,57	1,118
		2	38,41	40,91	1,134
Mittelwert			38,6	41,2	1,13

2.1.4 Schüttdichte

Die Schüttdichte der Brechsandkörnung PBR 0/2 betrug 0,66 Mg/m³, wobei die Schüttdichte der Splittkörnung PBR 2/8 mit 0,56 Mg/m³ erwartungsgemäß etwas geringer war.

Tabelle 4: Schüttdichte PBR 0/2 und 2/8

Körnung	Big Bag Nr.	Proben-Nr.	Versuch	Schüttdichte
				[Mg/m ³]
PBR 0/2	1	1	1	0,646
			2	0,649
			3	0,647
			4	0,652
		2	1	0,664
			2	0,664
			3	0,665
			4	0,667
	2	1	1	0,663
			2	0,664
			3	0,667
			4	0,665
		2	1	0,671
			2	0,678
			3	0,675
			4	0,676
Mittelwert				0,66

PBR 2/8	1	1	0,558
		2	0,549
		3	0,562
		4	0,551
	2	1	0,563
		2	0,540
		3	0,573
		4	0,560
Mittelwert			0,56

2.1.5 Sulfatgehalt

Der in beiden Körnungen ermittelte Sulfatgehalt betrug im Mittel 2,6 M.-%. Dieser Gehalt entsprach dem Sulfatgehalt von Rezyklatkörnungen, die bereits in anderen Vorhaben von der Forschungsstelle verwendet wurden.

Tabelle 5: Sulfatgehalt PBR 0/2 und 2/8

Körnung	Big Bag Nr.	Proben-Nr.	Sulfatgehalt
			[M.-%]
PBR 0/2	1	1	2,51
		2	2,55
	2	1	2,57
		2	2,71
Mittelwert			2,6
PBR 2/8	1	1	2,76
		2	2,46
Mittelwert			2,6

2.1.6 Gesundheitsgefährdende Stoffe

Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW)

Die Prüfung auf die Anwesenheit von MKW erfolgte an der Brechsand- und der Splittkörnung in Anlehnung an das Verfahren zur halbquantitativen Bestimmung von Mineralölkohlenwasserstoffen in Bauschuttchargen - Schnellanalyse von Mineralölkohlenwasserstoffen in Bauschutt unter Zuhilfenahme der Dünnschichtchromatographie. Dazu wurde das homogenisierte Versuchsmaterial abgewogen, mit Aceton versetzt und im Ultraschallbad extrahiert. Die anschließende chromatografische Trennung des Extraktes erfolgte auf DC-Platten (Aluminiumfolie Kieselgel 60 F₂₅₄) mit n-Hexan als Laufmittel. Zur Bestimmung der MKW-Spots wurden die Platten danach in eine Lösung von EosinY getaucht, getrocknet und mit einem Standard unter einer UV-Lampe verglichen.

In beiden Körnungen konnten keine MKW nachgewiesen werden.

Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Die Prüfung auf die Anwesenheit von PAK erfolgte in Anlehnung an das Verfahren zur halbquantitativen Bestimmung carbostämmiger Bindemittel aus Ausbaustoffen – Dünnschichtchromatographie- nach dem FGSV-Arbeitspapier Nr. 27/2 [10]. Dazu wurde das homogenisierte Versuchsmaterial abgewogen, mit Aceton versetzt und im Ultraschallbad extrahiert. Die anschließende chromatografische Trennung des Extraktes erfolgte auf DC-Platten (Aluminiumfolie Kieselgel 60 RF 18) mit n-Heptan als Laufmittel. Die Spots der Probe wurden anschließend mit einem Standard unter einer UV-Lampe verglichen.

In den beiden untersuchten Körnungen PBR 0/2 und PBR 2/8 konnten keine PAK nachgewiesen werden.

Polychlorierte Biphenyle (PCB)

Die Untersuchung auf Anwesenheit von PCB erfolgte gemäß DIN EN 15308:2008-05 [11] durch das nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005-08 [12] akkreditierte Prüflabor „EUROFINS Umwelt West GmbH“.

Die PCB-Gehalte in beiden Körnungen lagen unterhalb der Nachweisgrenze des Verfahrens von 0,01 mg/kg.

Tabelle 6: PCB-Gehalt PBR 0/2 und 2/8

Parameter	Einheit	PBR 0/2	PBR 2/8
PCB 28	mg/kg	< 0,01	< 0,01
PCB 52	mg/kg	< 0,01	< 0,01
PCB 101	mg/kg	< 0,01	< 0,01
PCB 153	mg/kg	< 0,01	< 0,01
PCB 138	mg/kg	< 0,01	< 0,01
PCB 180	mg/kg	< 0,01	< 0,01
Summe 6 PCB	mg/kg	*n.b.	*n.b.
PCB 118	mg/kg	< 0,01	< 0,01
Summe 7 PCB	mg/kg	*n.b.	*n.b.

* n.b. nicht berechenbar, da zur Summenbestimmung nur Werte oberhalb der Bestimmungsgrenze verwendet werden.

Asbest und künstliche Mineralfasern (KMF)

Ein Teil des Probenmaterials beider Lieferkörnungen wurde auf Aluminium-Objektträger, auf dem sich eine leitfähige Klebefolie befand, aufgetragen und im Rasterelektronenmikroskop (REM) unter Zuhilfenahme der energiedispersiven Röntgenmikroanalyse (EDX) untersucht.

In beiden Proben konnte kein Asbest nachgewiesen werden. Es wurden aber KMF vorgefunden.

Um eine potenzielle Gesundheitsgefahr durch KMF auszuschließen, wurden weitere Untersuchungen durch das Prüflabor „Wartig Nord Analytik GmbH“ an der Rezyklatkörnung PBR 0/2 durchgeführt.

Die Untersuchung eines Streupräparates zur ersten Abschätzung des KMF-Anteils zeigte, dass in dem Probenmaterial zum Teil sehr lange und nur relativ dicke Fasern (Durchmesser > 3 µm) vorhanden waren. Lungengängige oder potenziell lungengängige Fasern wurden beim ersten Absuchen nicht festgestellt.

Bei der nachfolgenden Bestimmung des Massengehaltes an KMF nach dem Vorgehen entsprechend dem BIA-Verfahren 7487 [13] für Asbestfasern, wurden keine KMF ermittelt. Für Asbestfasern ist bei diesem Verfahren eine Nachweisgrenze von 0,008 % definiert. Der Massengehalt an KMF lag folglich unterhalb von 0,008 %.

Es wird angenommen, dass die beim Streupräparat vorgefundenen relativ langen Fasern bei der Probenvorbereitung (Siebung unter Verwendung eines Siebes mit einer Maschenweite von 100 µm und Homogenisierung) abgereichert und somit auf dem Präparat nicht mehr nachgewiesen werden konnten. Daher wurde zusätzlich eine Mengenabschätzung mit Hilfe eines Direktpräparates vorgenommen. Hierzu wurde eine Teilmenge der durchgemischten Gesamtprobe eingewogen, auf einem REM-Stempel mit einer Fläche von 1,131 cm² aufgebracht und mit Gold bedampft. Im Anschluss wurde die gesamte Fläche des Stempels auf KMF untersucht. Alle detektierten Fasern wurden protokolliert (Länge und Durchmesser, siehe Tabelle 7) und flossen in die Berechnung des Massengehaltes ein. Für die Berechnung des Massenanteils der KMF wurde eine Dichte von 2,56 g/cm³ zugrunde gelegt. Die Auswertung des Direktpräparates ergab einen Massenanteil von ca. 0,0121 % KMF bei einer zu erwartenden Messunsicherheit von 50 %. Von den vorgefundenen zwölf Fasern wies lediglich eine Faser einen Durchmesser unterhalb von 3 µm auf. Somit liegt der Massenanteil an lungengängigen Fasern deutlich unterhalb der Nachweisgrenze des BIA-Arbeitsverfahren von 0,008 %. Ein Grenzwert für den maximal tolerierbaren Anteil von KMF ist nicht definiert. Der Grenzwert für den weitaus gefährlicheren Asbest liegt bei 0,1 M.-%. Der in der Rezyklatkörnung vorgefundene Anteil lungengängiger KMF liegt deutlich unterhalb dieses Grenzwertes. Somit geht von dem Material keine Gesundheitsgefahr aus.

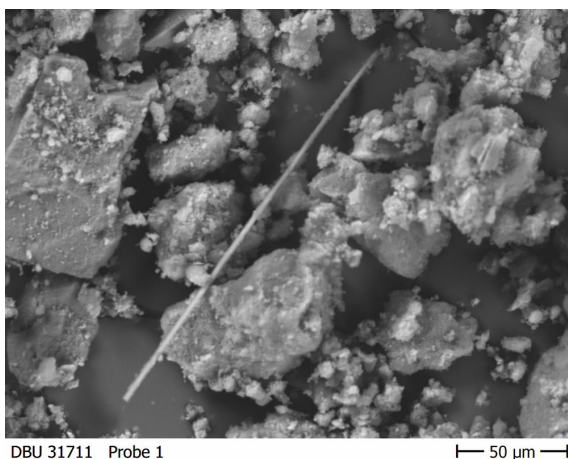


Abb.1: REM-Aufnahme PBR 0/2

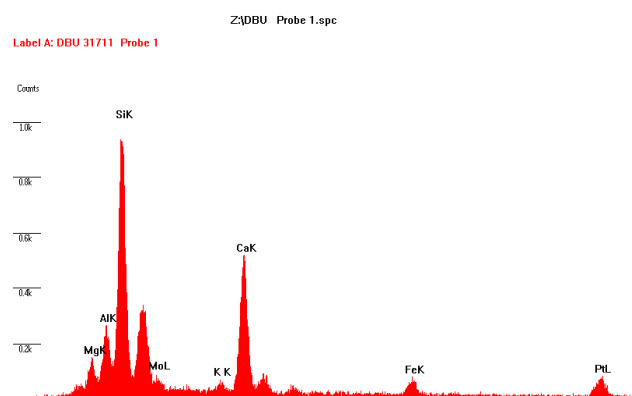
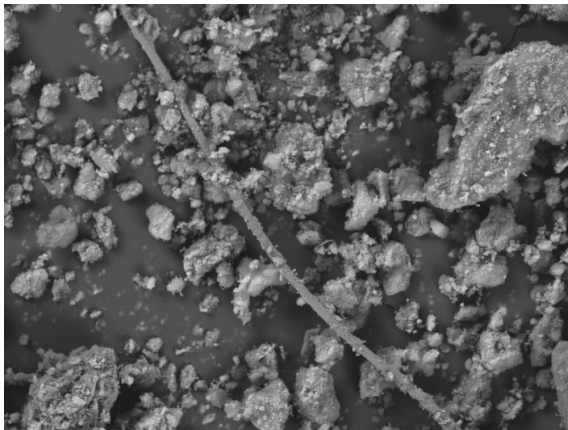


Abb.2: EDX-Spektrum der Faser in Abb.1, Ergebnis: KMF



DBU 31711 Probe 2 60 µm

Abb.3: REM-Aufnahme PBR 2/8

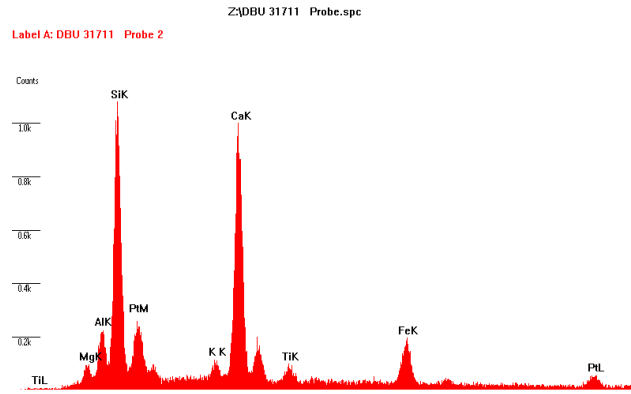


Abb.4: EDX-Spektrum der Faser in Abb.3, Ergebnis: KMF

Tabelle 7: Übersicht detektierter und vermessener KMF

Künstliche Mineralfasern		
Faser-Nr.	Länge [µm]	Durchmesser [µm]
1	265	5,5
2	378	7,2
3	127	3,0
4	469	7,7
5	200	8,6
6	258	8,9
7	638	10,0
8	155	5,8
9	169	6,9
10	281	11,2
11	234	9,1
12	108	2,1

2.2 Weitere Ausgangsstoffe

Für die Herstellung von Mauersteinen im Labor wie auch auf der Anlage der Firma Berding Beton wurden neben dem Porenbetonrezyklat ein Portlandzement der Festigkeitsklasse 42,5 mit hoher Anfangsfestigkeit (CEM I 42,5 R), Steinkohlenflugasche nach EN 450 und Wasser verwendet.

Für die Herstellung des Mauermörtels wurden Portlandzement der Festigkeitsklasse 42,5 mit hoher Anfangsfestigkeit und hohem Sulfatwiderstand (CEM I 42,5 R-SR 0/NA) sowie Methylhydroxyethylcellulose und Luftporenbildner verwendet.

3 Laborversuche

3.1 Mauersteine

Im Forschungsvorhaben FV 212 wurde Porenbetonrezyklat der Körnung 0/8 mm verwendet. Ein Größtkorn von 8 mm erwies sich aber für den Mauermörtel als zu grob. Somit wurde das Rezyklat in dem vorliegenden Vorhaben in den Körnungen 0/2 und 2/8 mm bezogen. Während für die Mörtelherstellung auf die Körnung 0/2 mm zurück gegriffen wurde, wurde für die Steinherstellung eine durch das Mischen der beiden Lieferkörnungen generierte Körnung 0/8 mm eingesetzt. Die beste Übereinstimmung mit der Sieblinie des Materials aus dem Vorhaben FV 212 wurde durch ein Verhältnis von Brechsand PBR 0/2 und Splitt PBR 2/8 von 65 zu 35 M.-% erzielt. Mit diesem Verhältnis, einem effektiven Wasserzementwert von 0,70, einem Verhältnis von Zement zum Porenbetonrezyklat von 1:4 und einem Steinkohlenflugascheanteil von 40 M.-% des Zementgehalts wurde ein erster Laborversuch gestartet. Die Wasserdosierung ergab sich aus dem Zugabewasser zuzüglich der Wassermenge, die von dem Rezyklat nach 30 Minuten der Wasserlagerung aufgenommen wird. Variiert wurden anschließend der effektive Wasserzementwert, der Anteil von Brechsand und Splitt in der Mischkörnung 0/8 sowie der Anteil von Zement zu Porenbetonrezyklat. Die Sieblinien der aus den Einzelkörnungen zusammengesetzten Körnung 0/8 mm finden sich im Anhang A2.

Tabelle 8: Versuchsplan Mauersteine

Serie Nr.	w/z _{eff.}	Anteil PBR 0/2:2/8 ^{a)}	CEM:PBR ^{b)}
	[-]	[M.-%]	[M.-%]
1	0,70	65:35	1:4
2	0,75		
3	0,80		
4	0,70	65:35	1:4,5
5		80:20	1:4
6		50:50	1:4

a) Anteil Porenbetonrezyklat der Körnung 0/2 zur Körnung 2/8
b) Verhältnis Zement zu Porenbetonrezyklat

Die Trockenkomponenten Porenbetonrezyklat, Zement und Steinkohlenflugasche wurden in den Mischtroge eines Labormörtelmischers gegeben und kurz bei langsamer Geschwindigkeit gemischt. Anschließend wurde die Gesamtwassermenge dazu dosiert und die Ausgangskomponenten für zwei Minuten bei langsamer Geschwindigkeit gemischt. Je Versuchsserie wurden zwei Würfel mit einer Kantenlänge von ca. 10 cm durch das Verdichten im Labor-Rüttelpressrahmen hergestellt. Der Pressdruck betrug 4,5 N/mm² und die Rüttelfrequenz 100 Hz. An den Rohlingen wurde die Frischmörtelrohddichte ermittelt. Aus den Zugabemengen der einzelnen Komponenten und der Frischmörtelrohddichte wurden die Rezepturen für 1 m³ Mauerstein errechnet. Die Lagerung der Presslinge erfolgte über einen Zeitraum von 28 Tagen bei 20°C und nahezu 100 % rel. Luftfeuchte. In einem Alter von 28 Tagen wurden die Festmörtelrohddichte der feuchten Proben sowie deren Druckfestigkeit ermittelt. Der Versuchsplan für die Laborversuche zur Herstellung von Mauersteinen aus Porenbetonrezyklat

ist in der Tabelle 8 dargestellt. Die Rezepturen für die einzelnen Serien sind in Tabelle 9 und die Ergebnisse der beschriebenen Untersuchungen in der Tabelle 10 aufgeführt.

Die Laborrezepturen der Mauersteine bestanden aus ca. 760 bis 810 kg/m³ Porenbetonrezyklat, 180 bis 200 kg/m³ Zement, 70 bis 80 kg/m³ Steinkohlenflugasche und 420 bis 460 kg/m³ Wasser.

Tabelle 9: Laborrezepturen Mauersteine

Serie Nr.	PBR ^{a)} [kg/m ³]		CEM ^{b)}	SFA ^{c)}	W _{ges.} ^{d)}	W _{ZG} ^{e)}	w/z _{eff} ^{f)}
	0/2	2/8	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[-]
1	495	267	191	76	417	133	0,70
2	498	268	192	77	429	144	0,75
3	521	280	200	80	458	160	0,80
4	528	285	181	72	429	126	0,70
5	646	161	202	81	439	141	0,70
6	392	392	196	78	432	137	0,70

a) Porenbetonrezyklat
b) Zement
c) Steinkohlenflugasche
d) Gesamtwasser
e) Zugabewasser
f) Effektiver Wasserzementwert

Tabelle 10: Dichten und Druckfestigkeit der Steine

Serie Nr.	Frishmörtelrohndichte	Festmörtelrohndichte *	Druckfestigkeit
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[N/mm ²]
1	1450	1430	6,4
2	1460	1450	6,9
3	1540	1520	9,2
4	1490	1460	7,8
5	1530	1470	9,3
6	1490	1450	7,4

* ermittelt an feuchten Proben vor der Prüfung der Druckfestigkeit

Die Proben aus den Laborversuchen waren nach der Verdichtung im Rüttelpressrahmen ausreichend formstabil. Die Frishmörtelrohndichte lag zwischen 1450 und 1540 kg/m³. Die Lagerung der Proben erfolgte bis zur Prüfung bei 20°C und einer relativen Luftfeuchte größer 95 %. Die Druckfestigkeit der Steine nach 28 Tagen betrug in etwa 6,5 bis 9 N/mm². Die geringste Frishmörteldichte und auch die geringste Festigkeit wiesen die Proben der Serie 1 mit einem effektiven Wasserzementwert von 0,70, einem Brechsand/Splitt-Verhältnis von 65:35 M.-% und einem Zement/Rezyklat-Verhältnis von 1:4 M.-% auf. Durch die Erhöhung des Wasserzementwertes von 0,70 auf 0,80 (Serien 2 und 3) wurden die Frishmörtelrohndichte und die Druckfestigkeit erhöht. Eine ähnlich hohe Dichte und Druckfestigkeit der Steine wurde durch die Erhöhung des Brechsandanteils auf ein Verhältnis von 80:20 M.-% (Serie 5) erzielt. Miteinander vergleichbare Dichten sowie Druckfestigkeiten oberhalb von 7 N/mm² wiesen die Serien 4 und 6 auf. Die Proben der Serie 4 enthielten im Vergleich zu den anderen Serien einen höheren Rezyklatanteil. Die Proben der Serie 6 wiesen im Vergleich zu den Proben der übrigen Serien einen höheren Splittanteil auf. Da für die geplante Verwendung der Steine zur Errichtung von nicht tragenden Wänden alle ermittelten Festigkeiten mehr als

ausreichend waren, wurde für die Produktion der Steine die Rezeptur der Versuchsserie 4 ausgesucht, weil diese den höchsten Rezyklatanteil und niedrigsten Zementanteil aufwies.

3.2 Mauermörtel

Für die Laborversuche zur Herstellung eines Mauermörtels wurde getrocknetes Porenbetonrezyklat der Körnung 0/2 mm verwendet. Beginnend von einem Massenverhältnis von Zement zu Porenbetonrezyklat von 1:1,3 wurde der Rezyklatanteil schrittweise bis auf ein Verhältnis von 1:2,1 erhöht. Die Dosierung der Zusätze Methylhydroxyethylcellulose (MHEC) und Luftporenbildner (LP) erfolgte zunächst wie im Vorprojekt FV212, d. h. es wurden 0,1 M.-% MHEC und 0,005 M.-% LP bezogen auf die trockene Mörtelmasse dazu gegeben. Die Konsistenz der Mörtel wurde plastisch eingestellt. Variiert wurden neben dem Verhältnis des Zements zum Porenbetonrezyklat die Zugabemengen der Zusätze. Der Versuchsplan für die Laborversuche ist in Tabelle 11 aufgeführt.

Zur Versuchsvorbereitung wurde zunächst der Zement mit den Zusätzen trocken vorge-mischt. Anschließend wurde das Porenbetonrezyklat dazu gegeben und die Trockenkomponenten weiter miteinander gemischt. Das Vormischen der Trockenkomponenten erfolgte im Mörtelmischer bei langsamer Geschwindigkeit für jeweils 15 Sekunden. Der Trockenmörtel wurde nach dem Mischen in Kunststoffbeutel gegeben.

Tabelle 11: Versuchsplan Mauermörtel

Serie Nr.	CEM:PBR ^{a)} [MT]	Zusatz		w/z _{eff.} ^{d)}
		MHEC ^{b)}	LP ^{c)}	[-]
1	1:1,3	0,1	0,005	0,86
2	1:1,5			1,00
3	1:1,7			1,06
4	1:1,9			1,16
5	1:2,1			1,23
6	1:1,3	0	0	0,68
7	1:1,3	0,05	0,005	0,79
8	1:1,3	0,075	0,005	0,82
9	1:2,1	0,05	0,005	1,17
10	1:1,9	0,075	0,005	1,14

a) Verhältnis von Zement zu Porenbetonrezyklat in Massenteilen
b) Methylhydroxyethylcellulose in M.-% bezogen auf die trockene Mörtelmasse
c) Luftporenbildner in M.-% bezogen auf die trockene Mörtelmasse
d) Effektiver Wassorzementwert

Die Gesamtwassermenge setzte sich zusammen aus der Wasseraufnahme des Rezyklats innerhalb von 30 min der Wasserlagerung und dem Zugabewasser. Das Gesamtwasser wurde in den Mischtrog des Labormörtelmischers gegeben und bei langsamer Mischgeschwindigkeit innerhalb von 30 Sekunden die Trockenmörtelkomponente aus dem Beutel hinzu gegeben. Anschließend folgte eine Nassmischzeit von einer Minute bei weiterhin langsamer Mischgeschwindigkeit. 5, 10, 20 und 40 Minuten nach Beginn der Nassmischzeit wur-

de das Ausbreitmaß der Mörtel gemäß DIN EN 1015-3:2007-05 [14] bestimmt. 25 Minuten nach Beginn der Nassmischzeit wurde das Wasserrückhaltevermögen gemäß DIN 18555-7:1987-11 [15] ermittelt. Nach Abschluss der Konsistenzmessungen wurden Prismen mit den Abmessungen von 160 x 40 x 40 mm hergestellt. Die Verdichtung erfolgte mittels Rütteltisch. Im Zuge der Herstellung der Prismen erfolgte zudem die Bestimmung der Frischmörtelroh-dichte. Mit Hilfe der Einwaagen und der Frischmörtelroh-dichte wurden die in der Tabelle 12 dargestellten Rezepturen errechnet.

Die Mörtelprismen verblieben zwei Tage in der Schalung und nach dem Ausschalen bis zum siebten Tag bei $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ und $(95\pm 2)\%$ relativer Luftfeuchte. Anschließend lagerten die Prismen bis zum Prüftermin bei $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ und $(65\pm 2)\%$ relativer Luftfeuchte. Nach 28 Tagen wurden die Biegezug- und Druckfestigkeit der Mörtel gemäß DIN EN 1015-11:2007-05 [16] ermittelt. Die Frisch- und Festmörtel Eigenschaften der Labormörtel finden sich in Tabelle 13.

Die Laborrezepturen der Mauermörtel bestanden aus ca. 500 bis 590 kg/m^3 Porenbetonrezyklat, 260 bis 450 kg/m^3 Zement, 440 bis 900 g/m^3 MHEC, 40 bis 50 g/m^3 LP und 510 bis 560 kg/m^3 Wasser. Der Mörtel der Serie 6 wurde ohne Zusätze gemischt. Er bestand aus ca. 640 kg/m^3 Porenbetonrezyklat, fast 500 kg/m^3 Zement und 570 kg/m^3 Wasser.

Tabelle 12: Laborrezepturen Mauermörtel

Serie Nr.	PBR 0/2 ^{a)}	CEM ^{b)}	MHEC ^{c)}	LP ^{d)}	$W_{\text{ges.}}$ ^{e)}	W_{ZG} ^{f)}
	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[g/m^3]	[g/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]
1	507	390	898	45	520	336
2	497	331	828	41	512	331
3	525	309	834	42	519	328
4	546	288	834	42	532	334
5	547	261	808	40	520	320
6	642	494	0	0	570	336
7	579	446	513	51	563	352
8	537	413	712	47	534	339
9	592	282	437	44	545	330
10	549	289	628	42	529	329

a) Porenbetonrezyklat 0/2 mm	d) Luftporenbildner
b) Zement	e) Gesamtwasser
c) Methylhydroxyethylcellulose	f) Zugabewasser

Die Mörtel der Serien 1 bis 5 waren geschmeidig, aber ein wenig zu klebrig. Die Differenz zwischen dem Ausbreitmaß 5 min und 40 min nach Beginn der Nassmischzeit lag zwischen 5 und 17 mm. Eine Abhängigkeit vom Zement-Rezyklat-Verhältnis konnte nicht beobachtet werden. Die Frischmörteldichten bewegten sich zwischen 1330 und 1420 kg/m^3 . Das Wasserrückhaltevermögen betrug 92 bis 94 %. Die Mörtel der Serien 1 bis 5 wiesen Biegezugfestigkeiten von 1,5 bis 3,0 N/mm^2 und Druckfestigkeiten von ca. 5 bis 11 N/mm^2 bei Trockenroh-dichten von 870 bis 970 kg/m^3 auf. Mit Erhöhung des Rezyklatanteil sanken die Rohdichte sowie die Festigkeiten der Mörtel.

Um die Klebrigkeit des Mörtels zu reduzieren wurde der Gehalt an MHEC gesenkt. Bei einem Massenverhältnis des Zements zum Porenbetonrezyklat von 1:1,3 wurden anstelle von 0,1 M.-% MHEC 0,05 und 0,075 M.-% bezogen auf die trockene Mörtelmasse dosiert. Zudem wurde ein Mörtel ganz ohne Zusätze gemischt. Dieser Mörtel der Serie 6 wies im Vergleich zu den Mörteln mit Zusätzen schlechtere Verarbeitungseigenschaften auf. Zudem steifte dieser Mörtel innerhalb von 35 min deutlich stärker an. Alle anderen Mörtel blieben in diesem Zeitraum weiterhin im plastischen Konsistenzbereich (siehe Diagramm 1). Mit der Reduzierung des Gehalts an MHEC verringerte sich die Klebrigkeit des Mörtels. Für einen guten Zusammenhalt des Mörtels erwies sich die Dosierung von 0,075 M.-% MHEC als geeignet.

Die Reduzierung der MHEC führte zu niedrigeren Wasserrückhaltevermögen und höheren Festigkeiten sowie Dichten. Ohne die Verwendung von Zusätzen betrug das Wasserrückhaltevermögen 85 %. Der Zementgehalt betrug nahezu 500 kg/m³, wodurch eine Druckfestigkeit von ca. 25 N/mm² bei einer Trockenrohdichte von 1200 kg/m³ erzielt wurde. Das Wasserrückhaltevermögen der Mörtel mit reduziertem MHEC-Anteil (Serien 7 und 8) betrug 88 bzw. 92 %. Hierbei wurden Druckfestigkeiten von 16 bzw. 14 N/mm² bei Trockenrohdichten oberhalb von 1000 kg/m³ erzielt. Der Zementgehalt dieser Rezepturen lag oberhalb von 400 kg/m³.

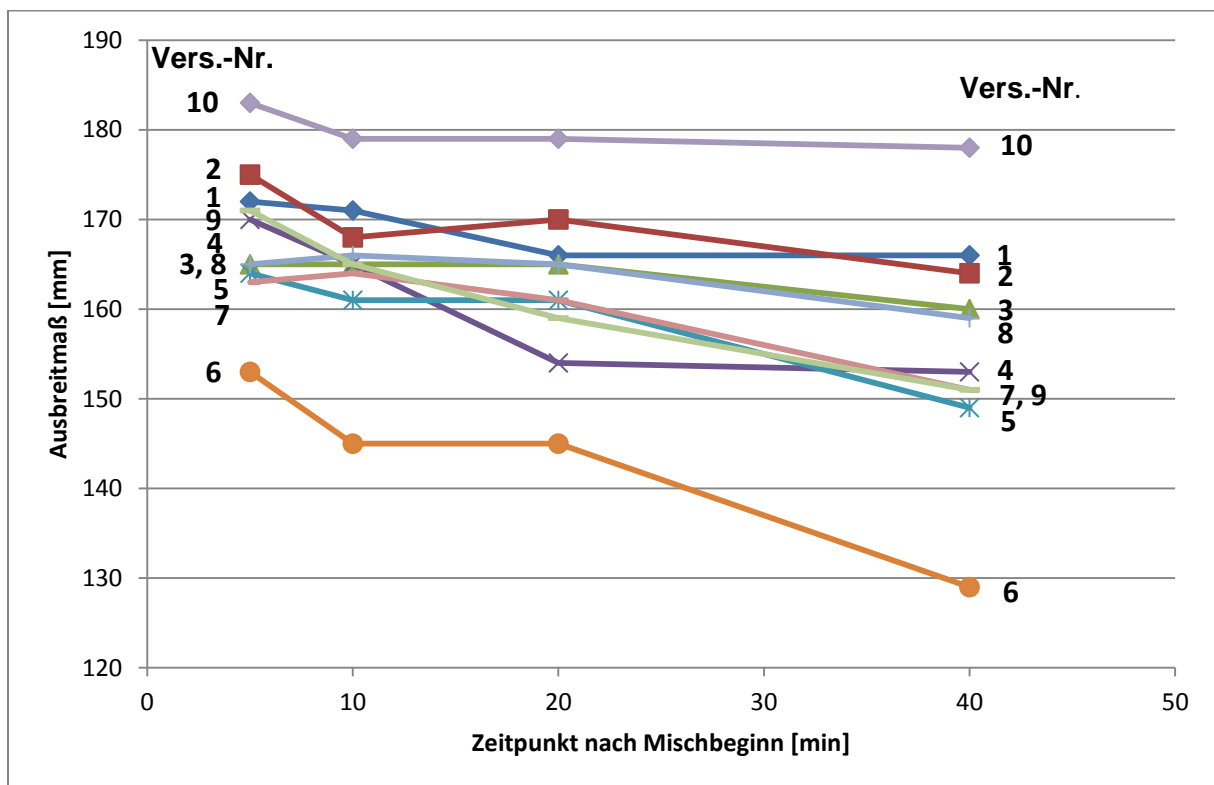


Diagramm 1: Ausbreitmaß der Rezyklatmörtel in Abhängigkeit der Zeit

Da für die geplante Verwendung des Mauermörtels zur Errichtung von nicht tragenden Innenwänden solch hohe Festigkeiten nicht erforderlich waren, wurde der Rezyklatanteil bei reduziertem Gehalt an MHEC erhöht. Somit konnte der Zementgehalt bis unterhalb von 300 kg/m^3 und die Trockenrohddichte deutlich unterhalb von 1000 kg/m^3 gesenkt werden bei weiterhin guten Festigkeitseigenschaften. Die beste Verarbeitbarkeit wies der Mörtel der Serie Nr. 10 mit einem Verhältnis von Porenbetonrezyklat zu Zement von 1:1,9 M.-% und einem Anteil von MHEC von 0,075 M.-% bezogen auf die trockene Mörtelmasse auf. Das Wasserrückhaltevermögen dieses Mörtels lag bei 89 %. Die Druckfestigkeit betrug nahezu 6 N/mm^2 bei einer Trockenrohddichte von 890 kg/m^3 .

Tabelle 13: Eigenschaften laborgemischter Mauermörtel

Serie Nr.	Δa_{5-40} ^{a)}	ρ_{FM} ^{b)}	WRV ^{c)}	ρ_{tr} ^{d)}	BZ ^{e)}	D ^{f)}
	[mm]	[kg/m^3]	[%]	[kg/m^3]	[N/mm^2]	[N/mm^2]
1	6	1420	94	970	3,0	10,9
2	11	1340	92	910	2,3	7,3
3	5	1350	94	910	2,4	7,5
4	17	1370	93	910	2,2	6,9
5	15	1330	93	870	1,5	5,2
6	24	1710	85	1200	4,0	25,1
7	6	1590	88	1080	3,6	16,1
8	12	1480	92	1030	3,4	14,0
9	12	1420	86	950	1,9	6,7
10	16	1370	89	890	1,8	5,8

a) Differenz zwischen dem Ausbreitmaß 5 min und 40 min nach Mischbeginn
b) Frischmörtelrohddichte
c) Wasserrückhaltevermögen
d) Trockenrohddichte des Festmörtels nach 28 d
e) Biegezugfestigkeit nach 28 d
f) Druckfestigkeit nach 28 d

4 Industriell gefertigte Recyclingbaustoffe

4.1 Mauersteine

4.1.1 Herstellung

Für die industrielle Produktion der Mauersteine wurden sieben Big Bags Porenbetonrezyklat der Körnung 0/2 mm und vier Big Bags der Körnung 2/8 mm an das Werk der Firma Berding Beton GmbH in Bremen geliefert. Bis zu seiner Verwendung wurde das Material in der Produktionshalle gelagert. Vor der Herstellung der Recyclingsteine wies das Porenbetonrezyklat einen Feuchtegehalt von ca. 10 M.-% auf. Am Vortag der Produktion wurde das Rezyklat in das Silo verfrachtet. Jeweils ein Big Bag beider Körnungen wurde als Reserve aufbewahrt. Es war geplant, die Körnungen PBR 0/2 und PBR 2/8 in unterschiedliche Silos einzubringen und separat zu dosieren. Da aber vom Werk nur ein Silo zur Verfügung gestellt werden konnte, wurden beide Körnungen in dieses eine Silo befördert. Hierbei wurden jeweils zwei

Big Bags der Körnung 0/2 und ein Big Bag der Körnung 2/8 in zwei Einlaufmulden entleert. Beide Körnungen wurden dann zusammen auf eine Höhe oberhalb des Silos gefördert und von dort in das Silo eingelassen.

Für die Produktion der Mauersteine wurde die Laborrezeptur Nr. 4 gewählt. Auf Basis der in das Silo eingebrachten Anzahl an Big Bags beider Körnungen betrug der Anteil von Brechsand zu Splittkorn abweichend zur Laborrezeptur in etwa 70:30 M.-% anstelle von 65:35 M.-%.

Insgesamt wurden ca. 7 m³ Frischbeton angemischt. Tabelle 14 zeigt eine Übersicht über die Einwaagen der insgesamt acht Mischungen. Vor der Dosierung der Komponenten für die achte Mischung wurde das an den Wandungen des Silos anhaftende Rezyklat mit Wasser auf den Boden des Silos gespült. Aufgrund der unbekannt Menge der Wasserzufuhr entsprach diese Charge in ihrer Zusammensetzung nicht den vorherigen Chargen. Sie diente lediglich dem Entleeren des Silos und wurde verworfen.

Tabelle 14: Einwaagen der Ausgangsstoffe - Mauersteinproduktion

Mischung-Nr.	Einwaage [kg]								
	1	2	3	4	5	6	7	8	Ges.
PBR 0-8 mm	529	531	886	888	889	889	890	536	6038
CEM I 42,5 R	109	108	179	180	179	181	179	110	1225
Steinkohlenflugasche	45	43	71	70	72	70	74	47	492
Gesamtwasser	302	330	530	560	548	560	570	124	3524

Die Ausgangsstoffe wurden in einem Zwangsmischer gemischt. Die Wasserdosierung wurde manuell geregelt. Die Kontrolle der für stabile Rohlinge geeigneten Konsistenz erfolgte durch das Kneten der erdfeuchten Mischung mit der Hand. Die Freigabe der Mischung erfolgte durch den Maschinenführer.

Nach dem Vorliegen einer verarbeitungsfähigen Konsistenz wurde die Mischung über ein Schienensystem zur Rüttelpresse befördert und dort zu Steinen mit den Abmessungen von ca. 250 x 120 x 100 verdichtet. Der Pressdruck betrug 45 bar. Die Vorvibrationsdauer betrug 2,5 Sekunden bei einer Rüttelfrequenz von 60 Hz. Die Hauptvibrationsdauer betrug 3,0 Sekunden bei einer Frequenz von 55 Hz. Je Platte wurden 35 Steine in einem Verdichtungsvorgang gefertigt. Die fertigen Steine wurden zum Aushärten auf den Platten verbleibend in ein Lagersystem befördert. Die Steine wurden dort für 7 Tage ohne Belüftung und anschließend für 6 Tage mit eingeschalteter Lüftung gelagert. Die Temperaturen im Regalsystem lagen in diesem Zeitraum zwischen 25 und 28 °C. Die relative Luftfeuchte betrug ohne Lüftung bis zu 90 %, mit Belüftung ca. 65 %. Bei den Angaben zu den Temperaturen und der Luftfeuchte handelt es sich Ergebnisse aus wenigen Einzelmessungen. Eine kontinuierliche Aufzeichnung der klimatischen Bedingungen wurde nicht vorgenommen. In einem Alter von 13 Tagen wurden die Steine automatisch aus dem Regalsystem herausgefahren und auf Paletten von bis zu 8 Steinreihen gestapelt. Die Festigkeit der Steine hätte eine Palettierung bereits in einem Alter von 1 bis 2 Tagen zugelassen. Jedoch wurde bezweckt, ei-

nen Teil der möglichen Schwindverkürzungen ab dem Tag der Verwendung der Steine durch Trocknung vorwegzunehmen.

Exklusive der aussortierten Charge Nr. 8 sowie weiterer beschädigter Steine wurde eine Anzahl von ca. 2100 Steinen gefertigt.

Aus den Produktionschargen 1, 2, 4 und 6 wurde jeweils ein Rohling entnommen und dessen Frischbetonrohddichte ermittelt. Auf Basis der Einwaagen der Ausgangsstoffe, des Feuchtegehalts des Porenbetonrezyklats und der Frischbetonrohddichte wurden die Rezepturen je m³ Mauerstein errechnet. Diese finden sich in der nachfolgenden Tabelle 15. Bilder zur Herstellung der Mauersteine aus Porenbetonrezyklaten sind im Anhang A3 abgebildet.

Im Vergleich zu der Laborrezeptur Nr. 4 enthielten die Mischungen für die Pilotcharge mehr Wasser und einen niedrigeren Zementgehalt. Die Mischungen enthielten ca. 670 bis 720 kg/m³ Porenbetonrezyklat, 150 bis 165 kg/m³ Zement, 60 bis 70 kg/m³ Steinkohlenflugasche und 540-560 kg/m³ Wasser. Der effektive Wasserzementwert lag mit Ausnahme der Mischung 1 bei 1,64 bis 1,69. Der effektive Wasserzementwert der Mischung 1 betrug 1,40. Für die Berechnung des effektiven Wasserzementwertes wurde der Flugaschegehalt zu 40 M.-% angerechnet und eine Wasseraufnahme der Rezyklatkörnung von ca. 37 M.-% angenommen. Vermutlich wurde aber mehr Wasser als angenommen von dem Rezyklat aufgenommen. Der tatsächliche Wasserzementwert dürfte daher niedriger ausfallen als kalkulatorisch ermittelt.

Tabelle 15: Rezepturen Mauersteinproduktion

Rezepturen	Mischung 1	Mischung 2	Mischung 4	Mischung 6
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
PBR 0-8 mm	724	686	672	688
CEM I 42,5 R	166	155	151	156
Steinkohlenflugasche	68	62	59	60
Zugabewasser	271	295	296	302
Gesamtwasser	540	550	546	558
w/z _{eff.}	1,40	1,64	1,69	1,68

4.1.2 Probenentnahme

In einem Alter von 3 (L1 - L3) und 13 Tagen (L4 - L6) wurden jeweils drei Steine für Längenänderungsmessungen aus der Produktionscharge 6./7. Mischung entnommen. Weitere drei Steine (L7 - L9) wurden am Tag ihrer Verwendung auf der Baustelle entnommen.

Für die Ermittlung der Druckfestigkeit und der Trockenrohddichte wurden jeweils sechs Steine aus den Produktionschargen 2./3. Mischung (D13 - D18), 4./5. Mischung (D7 - D12) und 6./7. Mischung (D1 - D6) entnommen.

Aus der Charge 6./7. Mischung wurden zudem drei Steine für die Bestimmung des Elastizitätsmoduls (E1 - E3) und drei Steine für die Bestimmung der Wasseraufnahme (W1 - W3) entnommen.

4.1.3 Druckfestigkeit und Trockenrohddichte

Die Druckfestigkeit wurde nach 28 Tagen gemäß DIN EN 772-1:2016-05 [17] an insgesamt 18 Steinen ermittelt. Die Prüfrete wurden nach der Druckprüfung getrocknet und nach Abzug des Feuchtegehalts die Trockenrohddichte der Steine errechnet. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in der Tabelle 16 dargestellt.

Die Druckfestigkeit der Steine lag im Mittel bei 9 N/mm². Die höchsten Festigkeiten wurden von den Steinen der Chargen 6 und 7 erzielt. Der Mittelwert der Druckfestigkeit betrug hier 10,4 N/mm². Die Steine aus den Chargen 2 und 3 sowie 4 und 5 wiesen mit 8,1 bzw. 8,5 N/mm² vergleichsweise niedrigere Festigkeiten auf. Die Trockenrohddichte lag im Mittel bei 1110 kg/m³.

Aufgrund der Ergebnisse können die Steine der Rohdichteklasse 1,20 und der Druckfestigkeitsklasse 6 gemäß DIN V 18152-100:2005-10 [18] zugeordnet werden.

Tabelle 16: Druckfestigkeit und Trockenrohddichte werksmäßig hergestellter Steine

Proben-Nr.	Abmessungen [mm]			Druckfestigkeit nach 28 d	Trockenrohddichte nach 28 d
	Länge	Breite	Höhe	[N/mm ²]	[kg/m ³]
D1	249,6	119,9	99,9	9,7	1100
D2	249,7	119,9	100,6	11,2	1140
D3	249,2	119,7	100,3	10,4	1120
D4	249,8	119,8	99,0	10,3	1120
D5	249,6	119,6	100,3	10,5	1130
D6	249,6	119,8	100,2	10,2	1120
MW 1-6	249,6	119,8	100,1	10,4	1120
D7	249,4	119,7	100,8	8,5	1120
D8	249,2	119,3	99,6	9,4	1110
D9	249,4	119,8	101,0	8,2	1100
D10	249,6	119,3	100,3	8,4	1110
D11	249,5	119,9	100,5	7,7	1080
D12	249,2	119,5	100,7	9,0	1110
MW 7-12	249,4	119,6	100,5	8,5	1100
D13	249,6	119,5	100,0	8,5	1120
D14	249,5	119,5	100,5	8,4	1110
D15	249,6	119,9	100,4	9,2	1130
D16	249,6	119,9	101,0	7,8	1100
D17	249,8	119,9	101,1	6,7	1080
D18	250,1	120,0	99,2	8,1	1120
MW 13-18	249,7	119,8	100,4	8,1	1110
MW ges.	249,6	119,7	100,3	9,0	1110
Anforderung gemäß DIN V 18152-100:2005-10 für Vollsteine aus Leichtbeton der Druckfestigkeitsklasse 6 und der Rohdichteklasse 1,20				Mittelwert ≥ 7,5 und Einzelwert ≥ 6	Mittelwert zw.1010 und 1200
D1-D6: entnommen aus Produktionscharge 6./7. Mischung D7-D12: entnommen aus Produktionscharge 4./5. Mischung D13-D18: entnommen aus Produktionscharge 2./3. Mischung					

4.1.4 Maße

Die bei den Druckfestigkeitsprüfungen geprüften Maße wurden den Nennmaßen von 250 x 120 x 100 mm (Länge x Breite x Höhe) gegenübergestellt und die maximalen Abweichungen vom Nennmaß errechnet. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 17 dargestellt.

Die Abweichungen von den Nennmaßen entsprachen i. d. R. der Abmaßklasse D4 gemäß DIN EN 771-3:2015-11 [19]. Diese Abmaßklasse stellt die Klasse mit den geringsten Toleranzen vom deklarierten Sollmaß dar. Lediglich bei einem Stein wurde eine geringfügig höhere Abweichung festgestellt. Durch eine automatische und damit gleichmäßigere Produktion ist hier sogar noch Verbesserungspotenzial vorhanden.

Tabelle 17: Maximale Abweichungen von den Nennmaßen

Proben-Nr.	Nennmaße [mm]			Abweichung von den Nennmaßen * [mm]					
	Länge	Breite	Höhe	Länge		Breite		Höhe	
				Min	Max	Min	Max	Min	Max
D1-D6	250	120	100	-0,8	-0,2	-0,4	-0,1	-1,0	+0,6
D7-D12				-0,8	-0,4	-0,7	-0,1	-0,4	+1,0
D13-D18				-0,5	+0,1	-0,5	0,0	-0,8	+1,1
D1-D18				-0,8	+0,1	-0,7	0,0	-1,0	+1,1
Anforderungen für Grenzabmaße gemäß DIN EN 771-3:2015-11 für die Klasse D4				-3	+1	-3	+1	-1	+1
Anforderungen für Grenzabmaße gemäß DIN EN 771-3:2015-11 für die Klasse D3				-3	+1	-3	+1	-1,5	+1,5
* Datengrundlage: Steinabmessungen aus den Druckfestigkeitsuntersuchungen									

4.1.5 Elastizitätsmodul

Der statische Elastizitätsmodul wurde in Anlehnung an DIN 1048-5:1991-06 [20] an aus drei Mauersteinen gesägten Proben mit den Abmessungen von ca. 100 x 40 x 40 mm in einem Alter von 81 Tagen bestimmt. Der Mittelwert des E-Moduls betrug ca. 5800 N/mm². Die Einzelwerte schwankten zwischen 4400 und 7200 N/mm². Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle 18 aufgeführt.

Tabelle 18: Elastizitätsmodul

Proben-Nr.	Abmessungen [mm]			E-Modul
	Länge	Breite	Höhe	[N/mm ²]
E1-1	99,8	40,0	40,4	5830
E1-2	100,0	40,2	40,4	4620
E1-3	99,8	40,4	40,5	6100
Mittelwert Probe 1				5520

Proben-Nr.	Abmessungen [mm]			E-Modul
	Länge	Breite	Höhe	[N/mm ²]
E2-1	100,0	40,2	40,3	6050
E2-2	100,0	40,2	40,3	7140
E2-3	99,4	40,2	40,4	7230
Mittelwert Probe 2				6810
E3-1	100,2	40,8	39,8	4680
E3-2	100,3	39,8	40,2	4410
E3-3	100,2	40,1	40,1	6340
Mittelwert Probe 3				5140
Mittelwert Probe 1-3				5820

4.1.6 Längenänderung

Für die Bestimmung der Längenänderung wurden in einem Alter von 3 und 13 Tagen Messmarken auf jeweils drei Steine geklebt. Zwei Messmarken wurden in einem Abstand von ca. 200 mm zueinander auf den Ober- und Unterseiten der Steine angebracht. Nach der Durchführung der Ausgangsmessung wurden die Proben im Normalklima bei 20°C und 65 % relativer Luftfeuchte gelagert. Der Abstand zwischen den beiden Messmarken sowie das Gewicht der Steine wurden in definierten Zeitabständen bis zu einem relativen Alter der Proben von bis zu einem Jahr aufgenommen und die Längenänderung in mm/m ermittelt. Anschließend wurden die Proben getrocknet und deren Feuchtegehalte zu den jeweiligen Messzeitpunkten errechnet. Die Ergebnisse der Längenänderungsmessungen sind in den Tabelle 19 und 20 aufgeführt.

Die Steine L1 bis L3 wurden in einem Alter von 3 Tagen entnommen. Die Proben lagerten bis zur Entnahme im Hochregalsystem des Herstellers ohne Belüftung. Der Feuchtegehalt der Proben zu Messbeginn betrug 33,5 M.-%. Innerhalb einer Lagerungsdauer von einem Jahr im Normalklima bei 20°C und 65 % relativer Luftfeuchte verkürzten sich die Proben im Mittel um ca. 1,4 mm/m. Die Längenänderung aufgenommen auf der Oberseite der Proben betrug nach einem Jahr ca. -1,5 mm/m, während auf der Unterseite der Steine eine Längenänderung von ca. -1,3 mm/m gemessen wurde. Der Feuchtegehalt der Proben betrug am Ende des Messzeitraums von einem Jahr 6,5 M.-%.

Tabelle 19: Längenänderung und Feuchtegehalt der Steine L1-L3

Alter _{rel.} [d]	Längenänderung [mm/m] bei Lagerung im Normal- klima 20/65			Feuchtegehalt [M.-%]
	L1-3 oben	L1-3 unten	MW L1-3 unten und oben	L1-3
0	0	0	0	33,5
1	0,003	-0,012	0,00	30,7
4	-0,132	-0,090	-0,11	26,3
7	-0,262	-0,172	-0,22	24,5
14	-0,542	-0,405	-0,47	21,2
21	-0,727	-0,577	-0,65	17,6
28	-0,852	-0,757	-0,80	15,4
56	-1,173	-1,035	-1,10	13,9
92	-1,387	-1,160	-1,27	10,5
182	-1,372	-1,157	-1,26	8,6
365	-1,512	-1,273	-1,39	6,5

Die Steine L4-L6 wurden in einem Alter von 13 Tagen entnommen. Diese Proben lagerten 7 Tage im Hochregalsystem des Herstellers ohne Belüftung und anschließend 6 Tage mit eingeschalteter Belüftung. Die Entnahme der Proben erfolgte zum Zeitpunkt der Palettierung der ausgehärteten Steine. Der Feuchtegehalt der Proben zu Beginn der Messungen betrug 30,1 M.-%. Die Belüftung im Regalsystem führte somit zu keiner maßgeblichen Trocknung der Steine. Innerhalb eines Zeitraums von einem Jahr verkürzten sich die Proben L4 bis L6 im Mittel um ca. 1 mm/m. Auf der Unterseite der Proben wurde eine Längenänderung von -1,0 mm/m verzeichnet. Auf der Oberseite der Proben wurde eine Längenänderung von -1,1 mm/m gemessen. Der Feuchtegehalt der Steine nach einem Jahr der Lagerung im Normalklima betrug 6,7 M.-%.

Tabelle 20: Längenänderung und Feuchtegehalt der Steine L4-L6

Alter _{rel.} [d]	Längenänderung [mm/m] bei Lagerung im Normal- klima 20/65			Feuchtegehalt [M.-%]
	L4-6 oben	L4-6 unten	MW L4-6	L4-6
0	0	0	0	30,1
1	-0,102	-0,060	-0,08	28,9
4	-0,205	-0,130	-0,17	25,8
7	-0,277	-0,200	-0,24	23,7
14	-0,490	-0,378	-0,43	20,4
21	-0,587	-0,528	-0,56	18,3
28	-0,673	-0,632	-0,65	16,9
56	-0,890	-0,963	-0,93	13,4
92	-1,050	-1,148	-1,10	11,1
182	-1,095	-1,250	-1,17	8,3
365	-0,978	-1,107	-1,04	6,7

4.1.7 Wasseraufnahme

Die Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten erfolgte gemäß DIN 52617:1987-05 [21] an Proben mit den Abmessungen von ca. 80 x 60 x 100 mm in einem Alter von 41 Tagen. Aus jedem Stein wurden jeweils zwei Proben mittels Sägeschnitt entnommen. Eine Probe wurde mit der Steinunterseite und die zweite Probe mit der Steinoberseite ins Wasser eingetaucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in der folgenden Tabelle 21 dargestellt. Die Steine wiesen im Mittel einen Wasseraufnahmekoeffizienten von 6,3 kg/m² auf. Hierbei war es unerheblich, ob die Unter- oder Oberseite des Mauersteins in das Wasser eingetaucht wurde. Im Vorläufervorhaben FV 212 [4] wurden noch auf der Unterseite der Steine höhere Wasseraufnahmekoeffizienten als auf der Oberseite der Steine festgestellt.

Tabelle 21: Wasseraufnahmekoeffizient

Bezeichnung der Probe	Saugfläche	Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m ²]
W1 _U	unten	6,6
W2 _U		6,1
W3 _U		6,2
Mittelwert Unterseite		6,3
W1 _O	oben	6,0
W2 _O		6,6
W3 _O		6,3
Mittelwert Oberseite		6,3

4.1.8 Raumluftmessungen vor und nach dem Bohren in Recyclingsteine

Mit den Untersuchungen im Abschnitt 2.1.6 konnte nachgewiesen werden, dass von dem verwendeten Porenbetonrezyklat keine Gesundheitsgefahr ausgeht. Da aber ein sehr geringer Anteil an künstlichen Mineralfasern (KMF) im Rezyklat vorgefunden wurde, sollten Raumluftmessungen klären, ob durch eine mechanische Bearbeitung der Steine, z. B. Einbringen von Bohrlöchern, KMF freigesetzt werden. Hierzu wurden durch den öffentlich bestellten und vereidigten Sachverständigen für Gefahrstoffe in Gebäuden Herrn Dipl.-Biol. Joachim Flügger vom Labor für Bauschadstoffe und Arbeitssicherheit Flügger + Partner aus Bremen im Raum Nr. 106 (Wärme-/Kälteraum) der Forschungsstelle Faserkonzentrationsmessungen durchgeführt. Die Untersuchung der Messfilter erfolgte im Labor der Firma Wartig Nord Analytik GmbH in Hamburg.

Der Raum 106 der MPA Bremen hat eine Grundfläche von 2,10 x 4,10 m. Wände und Fußboden haben keramische Oberflächen. Vorbereitend wurde der Raum gereinigt und zur Kontrolle einer etwaigen Verunreinigung durch KMF wurde eine erste Faserkonzentrationsmessung (M9054-1) durchgeführt. Vor dieser Messung wurde eine Nutzungssimulation durch Anblasen des Fußbodens und des Inventars mit einem handgeführten Gebläse durchgeführt. Nach dem Vorliegen des Messergebnisses wurden 10 Recycling-Mauersteine aus Porenbe-

tonrecyklat angebohrt. Die Bohrungen erfolgten mit einem Steinbohrer mit einem Durchmesser von 8 mm und einer Bohrtiefe von ca. 70 mm. In jedem Stein wurde eine Bohrung ausgeführt. Nach einer Wartezeit von 30 min wurde die stationäre Messung M9054-2 etwa in der Mitte des Raumes ausgeführt. Die Messungen erfolgten nach dem Verfahren VDI 3492 [22]. Die Parameter der Probenahme sind in der Tabelle 22 und die Messergebnisse in der Tabelle 23 dargestellt. Die Messung M9054-1 ergab, dass der Raum vor Beginn des Bohrversuches nicht durch KMF verunreinigt war. Die Messung M9054-2 führte zu dem Ergebnis, dass das Anbohren der Recyclingsteine zu keiner messbaren Raumluftbelastung durch lungengängige KMF führt.

Tabelle 22: Parameter der Probenahme

Messung Nr.	Dauer [h]	Durchfluss [l/min]	Messluftvolumen [l]
M9054-1	8	8,2	3.912
M9054-2	4	8,2	1.970

Tabelle 23: Ergebnis der Raumluftmessungen

Messung Nr.	Ausgewertete Filterfläche [mm ²]	Ausgezählte Fasern Längengruppe 5-100 µm	Faseranzahlkonzentration			
			Asbest		KMF *	
			Messwert	Poissonwert	Messwert	Poissonwert
			[F/m ³]	[F/m ³]	[F/m ³]	[F/m ³]
M9054-1	1	keine Asbestfasern, keine KMF	< 96	287	< 96	287
M9054-2	2	keine Asbestfasern, keine KMF	< 95	285	< 95	285

* Künstliche Mineralfasern mit einem Durchmesser < 3 µm

4.2 Mauermörtel

4.2.1 Herstellung

Für die industrielle Produktion der Mauermörtel wurde die Laborrezeptur Nr. 10 ausgewählt, welche aus ca. 550 kg/m³ getrocknetem Porenbetonrezyklat der Körnung 0/2 mm, 290 kg/m³ Zement CEM I 42,5 R-SR 0 (na) sowie 0,075 M.-% der Trockenmasse Methylhydroxyethylcellulose (MHEC) und 0,005 M.-% der Trockenmasse Luftporenbildner bestand. Das Porenbetonrezyklat (ca. 2 Big Bags) wurde im Labor der MPA Bremen getrocknet und in luftdichte Kunststoffsäcke in Mengen von jeweils 10 kg abgepackt. Der Zement wurde als Sackware in 25 kg-Gebinden bezogen. Die Ausgangsstoffe wurden in den Trockenmischer der Firma Stebah gegeben und gut durchmischt. Anschließend wurde das Gemisch über eine Schneckenförderung zur Abpackanlage und von dort in Säcke verfrachtet. Insgesamt wurden zwei Mischungen bestehend aus jeweils 475 kg Porenbetonrezyklat, 250 kg Zement, 543,8 g MHEC und 36,3 g Luftporenbildner hergestellt. Hieraus wurden 83 Säcke Trockenmörtel mit einem Gewicht von jeweils ca. 16 kg abgepackt. Tabelle 24 zeigt die Einwaagen der Ausgangsstoffe für beide Mischungen. Im Anhang A4 finden sich Bilder von der Herstellung der Werk trocken-Mauermörtel.

Tabelle 24: Einwaagen der Ausgangsstoffe - Werk trockenmörtel

Ausgangsstoffe	Einheit	Einwaagen Mischungen 1 und 2
Porenbetonrezyklat	kg	475
Zement	kg	250
Methylhydroxyethylcellulose	kg	0,5438
Luftporenbildner	kg	0,0363

4.2.2 Probenentnahme und Sackgewicht

Die Mörtelsäcke wurden in der Reihenfolge des Abfüllens von 1 bis 83 nummeriert. Aus der ersten Mischung wurden die Säcke 1 bis 42 und aus der zweiten Mischung die Säcke 43 bis 83 gewonnen und auf zwei Paletten gestapelt. Für die Untersuchung der Mörtel Eigenschaften im Labor der MPA Bremen wurden aus der Mischung Nr. 1 die Säcke mit den Nummern 5, 20 und 38 sowie aus der Mischung Nr. 2 die Säcke mit den Nummern 47, 62 und 80 entnommen. Als Reserveproben wurden die Säcke mit den Nummern 12 und 54 ausgewählt. In der nachfolgenden Tabelle 25 ist das Gewicht der entnommenen Proben aufgeführt. Im Mittel wiesen die Säcke ein Gewicht von 16,3 kg auf.

Tabelle 25: Gewicht entnommener Trockenmörtelsäcke

Sack-Nr.	Mischung Nr.	Gewicht [kg]
5	1	16,99
12 (Reserve)		16,66
21		15,60
38		16,62
<i>Mittelwert Mischung 1</i>		<i>16,47</i>
47	2	16,56
54 (Reserve)		15,90
62		16,10
80		16,14
<i>Mittelwert Mischung 2</i>		<i>16,18</i>
Mittelwert gesamt		16,3

4.2.3 Trockenmörtel

Am Trockenmörtel wurde die Kornzusammensetzung gemäß DIN EN 1015-1:2007-05 [23] und die Schüttdichte gemäß DIN EN 1097-3:1998-06 [7] in einem Behältnis mit einem Volumen von 1 Liter bestimmt. Für die Ermittlung der Kornzusammensetzung wurden Proben aus zwei Säcken je Mischung und für die Bestimmung der Schüttdichte wurden Proben aus drei Säcken je Mischung entnommen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in den Tabellen 26 und 27 aufgeführt.

Tabelle 26: Kornzusammensetzung Werk trockenmörtel

Siebweite	Durchgang [M.-%]				Mittelwert
	Mischung 1		Mischung 2		
	Sack-Nr.				
[mm]	5	38	47	80	
8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
4	99,8	100,0	100,0	99,8	99,9
2	98,9	99,3	99,2	99,1	99,1
1	91,1	92,2	91,7	92,1	91,8
0,5	74,9	76,4	75,5	76,6	75,9
0,25	57,3	60,1	57,8	59,9	58,8
0,125	46,7	49,7	47,2	49,8	48,4
0,063	39,8	42,6	40,1	42,5	41,3
0	0	0	0	0	0

Die Ergebnisse zeigen weder bei der Kornzusammensetzung noch bei der Schüttdichte signifikante Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Säcken wie auch zwischen beiden Mischungen. Dies lässt den Schluss zu, dass die Ausgangskomponenten im Trockenmischer

der Firma Stebah gut miteinander vermischt wurden und dieses homogene Gemisch ohne Entmischung in die Säcke befördert wurde.

Beide Mischungen weisen einen Anteil kleiner 0,063 mm von ca. 40 M.-% auf, der zu einem Großteil vom Bindemittel gebildet wird. Die Schüttdichte des Trockenmörtels lag im Mittel bei 880 kg/m³.

Tabelle 27: Schüttdichte Werk trockenmörtel

Mischung	Sack-Nr.	Proben-Nr.	Schüttdichte
			[kg/m ³]
1	5	1	866
		2	874
		3	872
	Mittelwert Sack Nr. 5		871
	21	1	874
		2	866
		3	894
	Mittelwert Sack Nr. 21		878
	38	1	863
		2	876
		3	874
	Mittelwert Sack Nr. 38		871
<i>Mittelwert Mischung 1</i>			<i>873</i>
2	47		882
			891
			885
	Mittelwert Sack Nr. 47		886
	62		872
			881
			878
	Mittelwert Sack Nr. 62		877
	80		879
			871
		873	
Mittelwert Sack Nr. 80		874	
<i>Mittelwert Mischung 2</i>			<i>879</i>
Mittelwert gesamt			876

4.2.4 Frischmörtel

Am Frischmörtel wurde die Konsistenz innerhalb von 60 Minuten nach Mischbeginn gemäß DIN EN 1015-3:2007-05 [14], die Frischmörtelrohddichte gemäß DIN EN 1015-6:2007-05 [24] das Wasserrückhaltevermögen gemäß DIN 18555-7:1987-11 [15] sowie die Verarbeitbarkeitszeit gemäß DIN EN 1015-9:2007-05 Verfahren A [25] bestimmt. Die Herstellung der Mörtel erfolgte gemäß DIN EN 1015-2:2007-05 [26] in einem Labormörtelmischer gemäß DIN EN 196-1:2016-11 [27]. Dem Trockenmörtel wurden 59 M.-% seiner Masse an Wasser zugegeben. Der effektive Wasserbindemittelwert betrug 1,02. Die Ergebnisse der Frischmörteluntersuchungen sind in dem Diagramm 2 sowie in der Tabelle 28 aufgeführt.

Ausgehend von einem Ausbreitmaß von ca. 185 mm zum Zeitpunkt von 5 Minuten nach Mischbeginn ging es auf einen Wert von ca. 150 mm nach 60 Minuten zurück. Die Änderung des Ausbreitmaßes im Betrachtungszeitraum betrug ca. 35 mm. Die Konsistenz verblieb im plastischen Konsistenzbereich. Der im Vergleich zu den laborgemischten Mörteln stärkere Rückgang des Ausbreitmaßes mit der Zeit liegt zum einen an dem längeren Betrachtungszeitraum bei den werksgemischten Mörteln und zum anderen an der geänderten Versuchsdurchführung. Die laborgemischten Mörtel wurden kurz vor der Bestimmung des Ausbreitmaßes mit dem Löffel durchgerührt. Dies wurde bei den werksgemischten Mörteln nicht praktiziert.

Die Frischmörtelrohddichte betrug im Mittel ca. 1240 kg/m³, das Wasserrückhaltevermögen 92 % und die Verarbeitbarkeitszeit mehr als 7 Stunden.

Auf Basis der Einwaagen, der Wasserdosierung und der Frischmörtelrohddichte wurde die Rezeptur für 1 m³ Mörtel errechnet. Diese bestand aus ca. 510 kg/m³ Porenbetonrezyklat, 270 kg/m³ Zement, 585 g/m³ MHEC und 36 g/m³ Luftporenbildner.

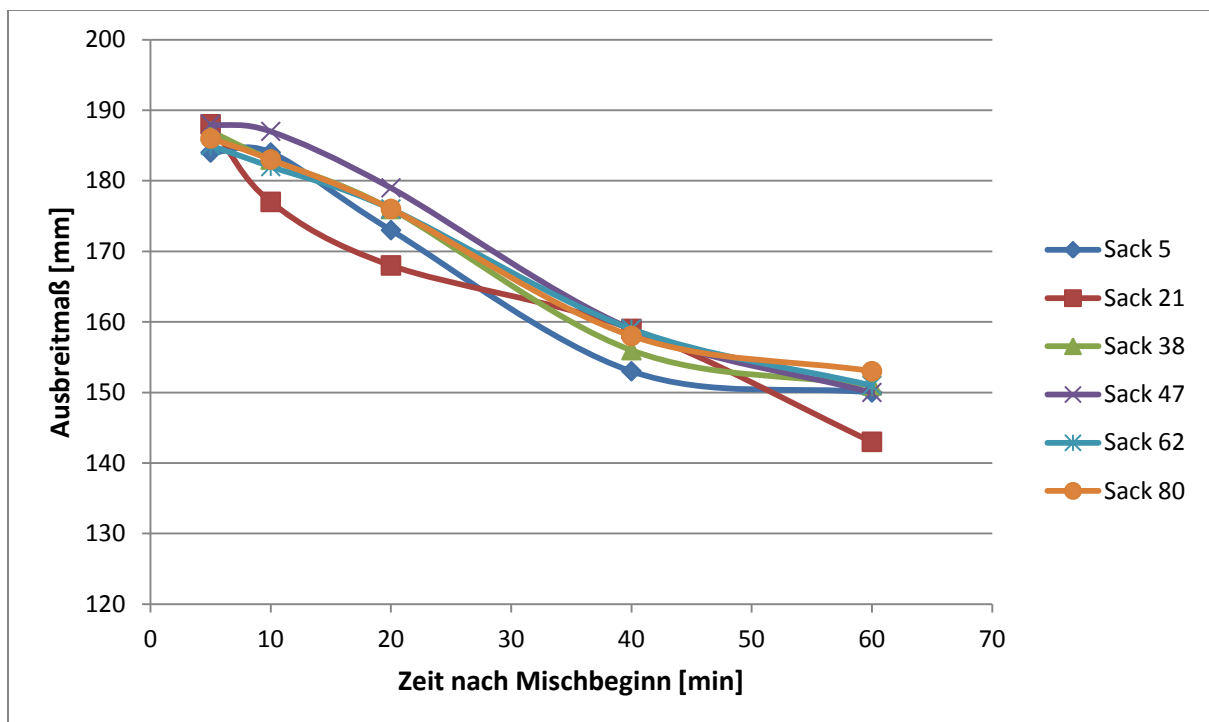


Diagramm 2: Konsistenz werksgemischter Mörtel in Abhängigkeit der Zeit

Tabelle 28: Weitere Frischmörteleigenschaften

Sack-Nr.	Frischmörtelrohddichte [kg/m ³]	Wasserrückhaltevermögen [%]	Verarbeitbarkeitszeit [h]
5	1227	92,5	n. b.
21	1225	90,8	> 7
38	1238	92,7	n. b.
47	1238	91,6	n. b.
62	1251	92,1	> 7
80	1247	94,5	n. b.
Mittel	1238	92,4	> 7

4.2.5 Festmörtel

Am Festmörtel wurden die Biegezug- und Druckfestigkeit gemäß DIN EN 1015-11:2007-05 [16] in einem Probenalter 28 Tagen und die Trockenrohdichte durch Trocknung der Prüfstreife aus den Festigkeitsuntersuchungen bestimmt. Die Prüfergebnisse sind in der Tabelle 29 zu finden.

Im Mittel wiesen die Mörtelprismen eine Biegezugfestigkeit von 1,8 N/mm² und eine Druckfestigkeit von 6,2 N/mm² bei einer Trockenrohdichte von ca. 870 kg/m³ auf. Mindestanforderungen an die Druckfestigkeit und die Trockenrohdichte für einen Leichtmauermörtel „LM 36“ gemäß DIN V 18580:2007-03 [28] wurden erfüllt.

Tabelle 29: Festmörteleigenschaften werkgemischter Trockenmörtel

Mischung-Nr.	Sack-Nr.	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit	Trockenrohdichte
		[N/mm ²]	[N/mm ²]	[kg/m ³]
1	5	1,7	6,2	870
	21	1,9	6,0	854
	38	1,9	6,8	881
Mittelwert Mischung 1		1,8	6,4	868
2	47	1,9	6,3	846
	62	1,7	5,7	850
	80	1,9	6,2	903
Mittelwert Mischung 2		1,8	6,1	866
Mittelwert gesamt		1,8	6,2	867
Mindestanforderung für einen LM 36 gemäß DIN V 18580:2007-03:			5,0	≤ 1.000

5 Errichtung von Wänden aus Porenbeton-Recyclingprodukten

5.1 Recyclingstation Borgfeld

Die neue Recyclingstation Borgfeld befindet sich am Hamfhofsweg 61 in 28357 Bremen. Auf dem Gelände wurde ein eingeschossiges Gebäude mit einer Grundfläche von ca. 80 m² neu erstellt. Das Gebäude bietet Platz für ein Büro, einen Sozialraum, ein Lager sowie Sanitär-räume und Umkleiden für das Personal der Recyclingstation. Die Stadt Bremen stellte dieses Bauvorhaben zur Verfügung, um erstmalig Produkte aus Porenbetonrecyklaten zur Errichtung von nicht tragenden Innenwänden einsetzen zu können. Da die Recyclingbaustoffe nicht geregelte Produkte sind, war zu deren Verwendbarkeit eine Zustimmung im Einzelfall durch die Oberste Bauaufsichtsbehörde Bremen erforderlich. In Zusammenarbeit mit der Forschungsstelle wurde von Immobilien Bremen als Projektsteuerer aufgrund der Geringfügigkeit und der Unbedenklichkeit des Einsatzes ein Antrag auf Verzicht der Forderung einer Zulassung im Einzelfall gestellt. Hierin wurden die vorliegenden Forschungsergebnisse und Eigenschaften der Produkte sowie die vorgesehene Verwendung beschrieben und belegbar dargestellt. Dem Antrag wurde seitens der Baubehörde stattgegeben, da bei der Anwendung der Recyclingprodukte für nicht tragende Wände eine Gefahr im Sinne von § 3 Absatz BremLBO [29] nicht zu erwarten ist.

Die folgende Abbildung 5 zeigt den Grundriss des Gebäudes. Die Außenwände bestehen überwiegend aus Dämmung. Die Lasten des Daches werden über die tragenden Innenwände und Stahlstützen in der Außenwand abgeleitet. Daher verblieben nur zwei Wandabschnitte, in denen das Recyclingmaterial eingesetzt werden konnte. Die restlichen Innenwände wurden tragend ausgebildet. Für die tragenden Innenwände wurde Kalksandstein verwendet.

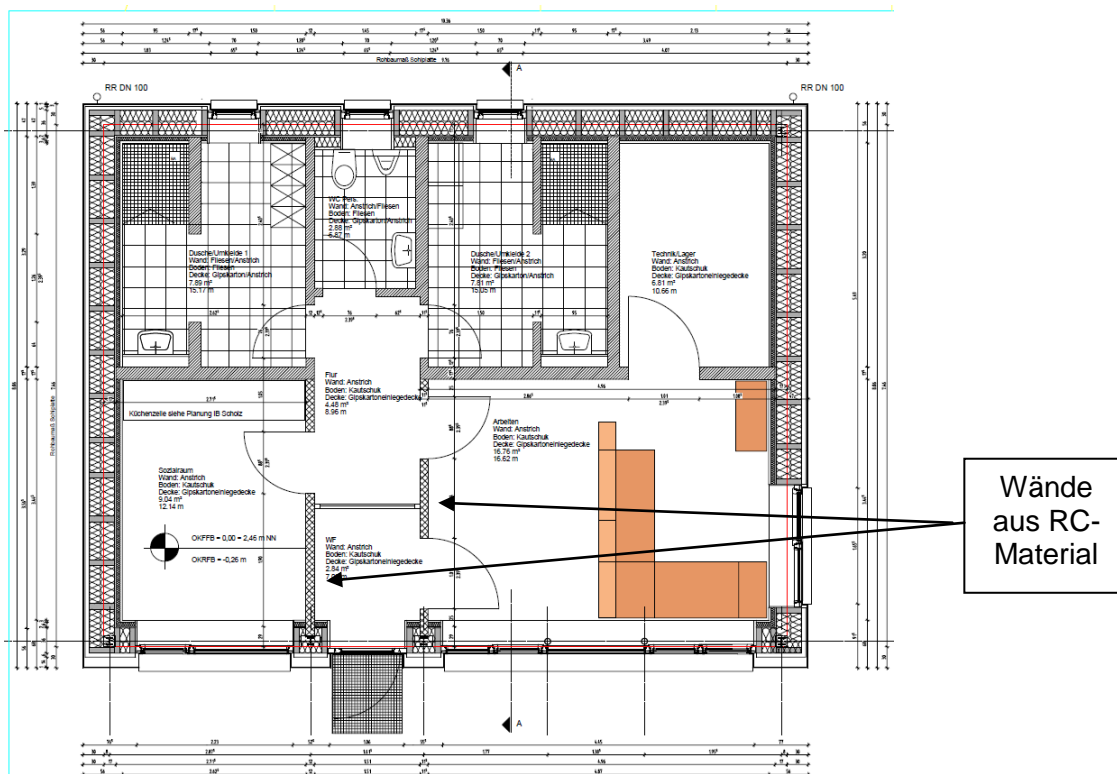


Abb. 5: Grundriss des Gebäudes im Bauvorhaben „Recyclingstation-Borgfeld“

Vor der Errichtung der nicht tragenden Innenwände aus den Recyclingmaterialien wurden zunächst die tragenden Innenwände erstellt und die Deckenplatte betoniert. Die Recyclingwände befinden sich direkt im Eingangsbereich des Gebäudes. Der Wandabschnitt rechts vom Eingang zwischen Flur und Büro sollte beidseitig verputzt werden und enthielt zwei Türöffnungen. Der Wandabschnitt links vom Eingang zwischen Flur und Sozialraum sollte nur auf der Sozialraumseite verputzt werden und enthielt eine Türöffnung. Flurseitig sollte diese Wand als Sichtmauerwerk hergestellt werden. Beide Wandabschnitte hatten eine Länge von 3,75 m und eine Höhe von 3,01 m.

5.2 Errichtung der Wände

Nach der Anlieferung der Recyclingprodukte auf die Baustelle wurden sie wie auch bei klassischen Baustoffen durch übliches Baustellenpersonal der Firma Grotkop aus Bremen zu Wänden verarbeitet. Hierbei wurde den neuen Recyclingbaustoffen keine Sonderbehandlung zuteil. Zwischen der Bodenplatte und den Wänden wurde eine horizontale Feuchtigkeitssperre angeordnet. Die Wandabschnitte wurden beidseitig an den anschließenden Bauteilen durch das Einlegen von Metalllaschen in den Lagerfugen gesichert. Über den Türöffnungen wurden Stürze aus Kalksandstein verarbeitet.

Das Errichten der beiden Wandabschnitte erfolgte innerhalb von zwei Tagen. Das Wetter war sonnig und warm. Die Lufttemperatur während der Verarbeitung der Recyclingmaterialien lag am 1. Tag zwischen 22 und 25°C, die Frischmörteltemperatur zwischen 23 und 24°C. Am zweiten Tag lagen im Verarbeitungszeitraum Lufttemperaturen von 15 bis 23°C vor. Die Mörteltemperatur betrug 19 bis 22°C. Bilder von der Errichtung der Wände sind im Anhang A5 dargestellt. Die Abbildung 6 bis 8 zeigen die Recyclingwände kurz nach der Fertigstellung.



Abb. 6: Wände aus Porenbeton-Recyclingprodukten, Übersicht



Abb. 7: Wände aus Porenbeton-Recyclingprodukten, Ansicht vom Büroraum

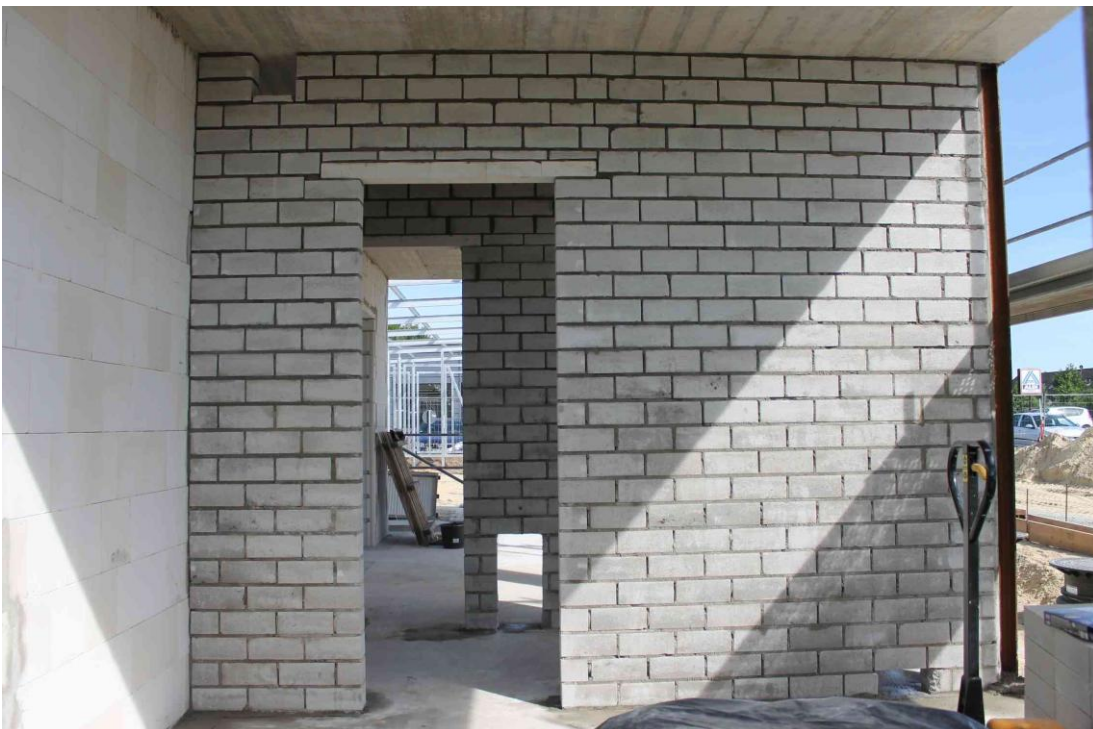


Abb. 8: Wände aus Porenbeton-Recyclingprodukten, Ansicht vom Sozialraum

5.3 Probenentnahme

Aus dem auf der Baustelle mit einem elektrischen Rührgerät gemischten Mörtel wurden vor Ort am ersten Arbeitstag zwei Satz Prismen mit Abmessungen von 160 x 40 x 40 mm herge-

stellt, jeweils drei Prismen zur Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit (DP1-1 bis DP1-3) sowie für Längenänderungsmessungen (S1 bis S3).

Zudem wurden 3 Steine (L7 bis L9) aus unterschiedlichen Paletten für Längenänderungsmessungen und 6 Steine (DS1-1 bis DS1-6) zur Bestimmung der Druckfestigkeit entnommen sowie zwei Mauersteine zur Ermittlung der Fugendruckfestigkeit (FD1) miteinander vermörtelt.

Am zweiten Tag der Errichtung der nicht tragenden Innenwände aus den Recyclingprodukten wurden 3 Mörtelprismen (DP2-1 bis DP2-3) zur Bestimmung der Festigkeiten und der Trockenrohddichte hergestellt. Zudem wurden 6 Steine (DS2-1 bis DS2-6) für die Bestimmung der Druckfestigkeit entnommen sowie zwei Mauersteine zur Ermittlung der Fugendruckfestigkeit (FD2) miteinander vermörtelt.

5.4 Eigenschaften von auf der Baustelle entnommenen Recyclingprodukten

Der baustellengemischte Recyclingmörtel wurde in Prismenformen gefüllt, auf einem Rütteltisch verdichtet, mit Glasscheiben abgedeckt und ins Labor der Forschungsstelle transportiert. Die ausgehärteten Mörtelprismen wurden nach 2 Tagen ausgeschalt und bis zu einem Alter von 7 Tagen bei 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von > 95 % gelagert. Auf die Stirnseiten der Proben S1 bis S3 wurden in einem Alter von 7 Tagen Messzapfen geklebt und mit der Ausgangsmessung der Länge begonnen. Die Lagerung der Proben erfolgte ab diesem Zeitpunkt bei 20°C und einer relativen Luftfeuchte von 65%. In definierten Zeitabständen wurden die Länge und die Masse der Proben ermittelt. Die Lagerung der Mörtelprismen für die Festigkeitsuntersuchungen erfolgte ab dem 7. Tag bis zu einem Alter von 28 Tagen ebenfalls bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchte.

Die Bestimmung der Biegezug- und der Druckfestigkeit der Mörtelprismen erfolgte gemäß DIN EN 1015-11:2007-05 [16] in einem Probenalter 28 Tagen. An den Prüfstellen wurde der Feuchtegehalt der Proben zum Zeitpunkt der Prüfung ermittelt und die Trockenrohddichte errechnet. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in der Tabelle 30 dargestellt.

Die Eigenschaften der Mörtelprismen vom ersten und zweiten Tag der Maurerarbeiten waren nahezu identisch. Die Biegezugfestigkeit lag im Mittel bei 2,5 N/mm² und die Druckfestigkeit bei 9,2 N/mm². Die Trockenrohddichte betrug 970 kg/m³. Im Vergleich zu den laborgemischten Mörteln wiesen die baustellengemischten Mörtel höhere Festigkeiten und Trockenrohddichten auf, die Anforderungen an die Druckfestigkeit und die Trockenrohddichte eines Leichtmauermörtels LM36 gemäß DIN V 18580:2007-03 [28] wurden aber weiterhin erfüllt.

Tabelle 30: Biegezug-, Druckfestigkeit und Trockenrohdichte baustellengemischter Mörtel

Proben Nr.	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit		Trockenrohdichte
	[N/mm ²]	[N/mm ²]		[kg/m ³]
DP1-1	2,60	8,90	9,60	990
DP1-2	2,85	9,45	9,20	990
DP1-3	2,30	9,00	9,45	980
Mittel DP1	2,6	9,3		990
DP2-1	2,15	8,50	9,15	950
DP2-2	2,35	9,05	9,60	960
DP2-3	2,70	9,15	9,30	960
Mittel DP2	2,4	9,1		960
Mittelwert gesamt	2,5	9,2		970
Mindestanforderung für einen LM 36 gemäß DIN V 18580:2007-03:		5,0		≤ 1.000

Die Lagerung der miteinander vermörtelten Steine erfolgte nach dem Transport ins Labor der Forschungsstelle bis zu einem Alter von 28 Tagen im Normklima bei 20°C und 65 % relativer Luftfeuchte. Der Mörtel in der Lagerfuge wurde von den Steinen abgetrennt und zu jeweils 6 Proben mit den Abmessungen von ca. 54 x 54 mm (Länge x Breite) formatiert. Die Proben wurden vor der Prüfung abgeglichen. Die Ermittlung der Fugendruckfestigkeit erfolgte gemäß der Norm DIN 18555-9:1999-09 Verfahren III [30] zwischen zwei Druckstempeln mit einem Durchmesser von 20 mm.

Die Fugendruckfestigkeit der Probe FD1 lag im Mittel bei ca. 5 N/mm². Die Probe FD2 wies eine Fugendruckfestigkeit von 7 N/mm² auf. Die Mindestanforderung für die Fugendruckfestigkeit eines Leichtmauermörtels LM 36 gemäß DIN V 18580 [28] wurden erfüllt.

Tabelle 31: Fugendruckfestigkeit baustellengemischter Mörtel

Proben-Nr.	Abmessungen [mm]			Bruchlast	Fugendruckfestigkeit nach 28 d
	Länge	Breite	Höhe	[N]	[N/mm ²]
FD1-1	54	53	19	1809	5,76
FD1-2	54	54	17	1521	4,84
FD1-3	54	54	17	1560	4,97
FD1-4	53	53	15	1369	4,36
FD1-5	53	53	17	1600	5,09
FD1-6	54	54	17	1299	4,13
Mittelwert FD1					4,9

Proben-Nr.	Abmessungen [mm]			Bruchlast [N]	Fugendruckfestigkeit nach 28 d [N/mm ²]
	Länge	Breite	Höhe		
FD2-1	54	53	13	2125	6,76
FD2-2	54	54	12	2069	6,59
FD2-3	54	54	13	2200	7,00
FD2-4	54	53	13	2034	6,47
FD2-5	54	54	12	2666	8,49
FD2-6	54	54	12	2135	6,80
Mittelwert FD2					7,0
Mindestanforderung für einen LM 36 gemäß DIN V 18580:2007-03:					3,5

Die Länge der im Normalklima bei 20°C und 65 % relativer Luftfeuchte gelagerten Mörtelprismen wurde in definierten Zeitabständen in Bezug zu einem Vergleichsstab mit einer Länge von 160 mm gemessen und die Längenänderung in mm/m ermittelt. In einem relativen Alter von 280 Tagen wiesen die Proben im Vergleich zur Ausgangsmessung eine Verkürzung der Länge von 2,2 mm/m auf. Mit ca. 1,8 mm/m ist ein Großteil der Schwindverformung bereits nach knapp 30 Tagen vollzogen.

Tabelle 32: Längenänderung der Mörtelprismen S1-S3

Alter _{rel.} [d]	Längenänderung [mm/m] bei Lagerung im Normalklima 20/65			
	S1	S2	S3	Mittel S1 bis S3
0	0	0	0	0
1	-0,15	-0,14	-0,18	-0,16
3	-0,49	-0,51	-0,56	-0,52
7	-1,06	-1,08	-1,06	-1,07
14	-1,47	-1,50	-1,47	-1,48
29	-1,74	-1,78	-1,76	-1,76
56	-1,88	-1,91	-1,90	-1,90
90	-1,94	-1,97	-1,96	-1,95
170	-2,06	-2,11	-2,09	-2,09
280	-2,13	-2,16	-2,15	-2,15

Die Bestimmung der Druckfestigkeit der von der Baustelle entnommenen Mauersteine erfolgte gemäß DIN EN 772-1:2016-05 [17]. Das Alter der Proben am Tag der Prüfung betrug 375 bzw. 376 Tage. Die Druckfestigkeit der Steine betrug im Mittel ca. 12 N/mm². Zum Vergleich: In einem Alter von 28 Tagen wurden noch Festigkeiten von ca. 9 N/mm² ermittelt.

Tabelle 33: Druckfestigkeit und Trockenrohdichte von der Baustelle entnommener Steine

Proben-Nr.	Abmessungen [mm]			Druckfestigkeit	Trockenrohdichte
	Länge	Breite	Höhe	[N/mm ²]	[kg/m ³]
D1-1	249,2	119,2	99,8	11,3	1067
D1-2	249,5	119,8	100,1	11,7	1059
D1-3	249,3	119,8	101,6	13,0	1052
D1-4	249,6	119,9	99,9	11,7	1069
D1-5	249,5	119,6	99,4	14,1	1132
D1-6	249,5	119,8	99,7	15,0	1145
MW D1	249,4	119,7	100,1	12,8	1090
D2-1	249,8	119,8	99,6	13,0	1045
D2-2	249,9	120,0	99,7	13,2	1062
D2-3	249,2	119,7	98,4	11,6	1034
D2-4	249,3	119,7	98,6	11,3	1018
D2-5	249,3	119,8	99,0	9,8	1000
D2-6	249,2	119,7	98,5	11,6	1015
MW D2	249,5	119,8	99,0	11,7	1030
MW ges.	249,4	119,7	99,5	12,3	1060

Die Steine mit der Bezeichnung L7 bis L9 waren am Tag ihrer Entnahme auf der Baustelle 354 Tage alt. Die Längenänderungsmessungen erfolgten wie im Kapitel 4.1.5 beschrieben. Abweichend wurden jedoch nur auf die Oberseite der Steine Messmarken geklebt. Es wurde festgestellt, dass die Proben L7 und L9, wie erwartet, im Normalklima bei 20°C und einer relativen Luftfeuchte von 65 % sich mit der Zeit verkürzten. Die Probe L8 jedoch verkürzte sich nicht. Es wurde sogar eine geringfügige Verlängerung von 0,3 mm/m nach einem Zeitraum von ca. 260 Tagen verzeichnet. Die Schwindverformung der Steine L7 und L9 betrug in diesem Zeitraum ca. 0,6 mm/m.

Tabelle 34: Längenänderung der Mauersteine L7-L9

Längenänderung [mm/m] bei Lagerung im Normalklima 20/65				
Alter _{rel.} [d]	L7	L9	Mittel L7 und L9	L8
0	0	0	0	0
7	-0,18	-0,17	-0,17	0,05
14	-0,20	-0,24	-0,22	0,12
21	-0,24	-0,30	-0,27	0,10
28	-0,24	-0,29	-0,27	0,18
63	-0,43	-0,56	-0,50	0,13
91	-0,52	-0,65	-0,58	0,14
257	-0,53	-0,70	-0,61	0,30

Abgleich zwischen der Zielsetzung und den erzielten Ergebnissen

Das Projektziel wurde erreicht. Die im Projektantrag beschriebenen Arbeitsschritte 1 bis 6 wurden erledigt. Es wurden Porenbetonrezyklate beschafft, die Rezyklateigenschaften ermittelt, die Rezepturen der Recyclingprodukte an die Rezyklateigenschaften angepasst und weiter optimiert, Pilotchargen der Recyclingbaustoffe auf vorhandenen industriellen Anlagen hergestellt und geprüft sowie abschließend zur Errichtung von nicht tragenden Innenwänden im Bauvorhaben „Recyclingstation-Borgfeld“ in Bremen erfolgreich eingesetzt.

Zum Zeitpunkt der Antragstellung sollte das Bauvorhaben bereits im Frühjahr 2014 starten. Dieser Termin wurde durch lange Verhandlungen über das zu bebauende Grundstück, aufgrund schallschutztechnischer Forderungen, durch eine knapp über das Gebäude verlaufende Hochspannungsleitung, Probleme bei der Zuwegung und nicht zuletzt durch einen mit Schadstoffen belasteten Boden immer wieder nach hinten korrigiert, so dass das Vorhaben bis zum 31.12.2017 kostenneutral verlängert werden musste.

Aufgrund der Verzögerungen mussten die produzierten Recyclingprodukte bis zur Auslieferung witterungsgeschützt gelagert werden. Die beteiligten Unternehmen stellten freundlicherweise für diese Dauer Lagerflächen in ihren Hallen zur Verfügung.

Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung

Werk trocken-Leichtmauermörtel

Leichtmauermörtel bestehen im Allgemeinen aus Gesteinskörnung, Bindemittel, künstlichen Füllstoffen und Zusätzen. Die Gesteinskörnung setzt sich zusammen aus Sand, Gesteismehl und leichter Gesteinskörnung, wie z. B. dem künstlich hergestellten Blähton oder dem natürlichen Bims. Das Bindemittel besteht überwiegend aus Zement sowie aus Kalkhydrat. Im Folgenden ist eine Beispielrezeptur aus der Praxis für einen Leichtmauermörtel LM 36 mit Blähton als leichte Gesteinskörnung im Vergleich zum Recycling-Leichtmauermörtel LM 36 mit Porenbetonrezyklat aufgeführt:

Ausgangsstoff	Einheit	Beispielrezeptur LM 36 mit Blähton	Ausgangsstoff	Rezeptur LM 36 mit PB-Rezyklat
Kalksteinsand	M.-%	10	Porenbeton- rezyklat	65
Kalksteinmehl	M.-%	15		
Blähton	M.-%	32		
Zement	M.-%	40	Zement	35
Weißkalkhydrat	M.-%	3		
Methylcellulose	M.-% *	0,030	MHEC	0,075
Luftporenbildner	M.-% *	0,015	Luftporenbildner	0,005

* bezogen auf die trockene Mörtelmasse

Leichtmauermörtel werden in den folgenden Arbeitsschritten hergestellt:

1. Dosieren und Einwiegen der Ausgangskomponenten
2. Förderung der Materialien in den Mischer
3. Mischen
4. Förderung des fertigen Produktes zur Abpackanlage
5. Abpacken in Säcke bzw. Füllen von Silos
6. Palettierung (entfällt bei Siloware)

Die Rohstoffe werden dosiert und intensiv miteinander vermischt. Das Mischgut wird abgepackt bzw. in Silos gefördert, ggf. palettiert und als Werk trockenmörtel ausgeliefert.

Im Vorhaben wurde ein Leichtmauermörtel mit Gesteinskörnung aus Porenbetonrezyklaten hergestellt. Die Rezeptur bestand aus 65 M.-% Porenbetonrezyklat und 35 M.-% Zement. Der Gehalt an Methylhydroxyethylcellulose (MHEC) und Luftporenbildner betrug 0,075 bzw. 0,005 M.-% der Trockenmörtelmasse.

Im Vergleich zur o. g. Beispielrezeptur eines LM 36 mit Blähton besteht die Gesteinskörnung des Recyclingmörtels zu 100 % aus Porenbetonrezyklat. Natürliche Gesteinskörnungen werden somit nicht gebraucht. Auch die Verwendung des energetisch relevanten Blähtons, welcher durch das Mahlen und Granulieren eines kalkarmen Tons und dem Brennen bei Temperaturen von ca. 1200 °C im Drehrohrföfen hergestellt wird, ist nicht erforderlich. Somit können durch die Herstellung von Recyclingmörtel mit Porenbetonrezyklaten nicht nur natürliche Ressourcen geschont werden, auch ist zu erwarten, dass die Energiebilanz eines solchen RC-Mörtels im Vergleich zu herkömmlichen Leichtmauermörteln günstiger ausfällt und der

herstellungsbedingte CO₂-Ausstoß reduziert wird. Dass im Vergleich auch weniger Bindemittel eingesetzt wird, welches ebenfalls sehr energieintensiv hergestellt werden muss, sollte sich auf die Energiebilanz des Recyclingmörtels positiv auswirken und den CO₂-Ausstoß weiter reduzieren.

In den Umwelt-Produktdeklarationen mit den Nummern EPD-QMX-2010131-D und EPD-IWM-20130237-IBG1-DE für auf dem Markt angebotene Leichtmauermörtel ist der Primärenergiebedarf für die Herstellung von 1 kg Trockenmörtel mit 3,5 MJ bzw. 5,5 MJ angegeben. Die erstgenannte Deklaration besagt, dass 81-96 % der erforderlichen Primärenergie für die Bereitstellung der Rohstoffe benötigt wird. Hierbei entfallen ca. 54 % auf die Bindemittel und ca. 30 % auf künstliche Leichtzuschläge. Bei einer angenommenen Ergiebigkeit des Trockenmörtels von 1,5 l/kg beträgt somit der Primärenergieverbrauch für einen Kubikmeter Frischmörtel 2308 bzw. 3662 MJ.

Das globale Erwärmungspotenzial für die Herstellung von 1 kg Trockenmörtel wird in den o. g. Deklarationen mit 0,432 bzw. 0,578 kg CO₂-Äquivalenten angegeben. Bei einer Ergiebigkeit von 1,5 l/kg entsprechen diese Angaben 288 bzw. 385 kg CO₂-Äquivalenten je Kubikmeter Frischmörtel.

Die Herstellung der Säcke zur Verpackung sowie der Vertriebstransport fallen mit 0,01 MJ bzw. 0,057 MJ je Kilogramm Trockenmörtel nicht ins Gewicht.

Sieht man von dem hohen Energiebedarf für die Herstellung von künstlichen Leichtzuschlägen, z.B. Blähton, ab, wird die benötigte Primärenergie für die Herstellung, die Verpackung und den Transport des Recycling-Trockenmörtels vergleichbare Werte annehmen wie für die marktgängigen Leichtmörtel. Ein Unterschied, der sich positiv für den Recyclingmörtel darstellt, besteht jedoch darin, dass er aus weniger Ausgangsstoffen besteht und somit weniger Silos für die Vorhaltung der Ausgangsmaterialien erforderlich sind.

Der Recyclingmörtel könnte kostengünstiger als ein herkömmlicher Leichtmauermörtel hergestellt werden, da als Gesteinskörnung Abbruchmaterial verwendet wird, das sonst aufwendig und kostenintensiv entsorgt werden müsste. Recyclingunternehmen könnten die Annahmegebühren, die in einigen Regionen bei bis zu 180 Euro je Tonne liegen, reduzieren, so dass sie mit den Einnahmen lediglich den Aufwand für die Aufbereitung und Qualitätssicherung des Rezyklats abdecken und können einen sekundären Ausgangsstoff an Produkthersteller verkaufen. Der Ausgangsstoff „Porenbetonrezyklat“ könnte dadurch günstiger zu beschaffen sein als natürliche Sande und Mehle und vor allem als der Blähton. Es ist somit zu erwarten, dass der RC-Mörtel günstiger als herkömmliche Leichtmauermörtel hergestellt werden kann, da geringere Kosten für die benötigten Rohstoffe anfallen und kein zusätzlicher Aufwand für das Fördern, Mischen und Abpacken erforderlich ist.

Mauersteine

Die klassischen Mauersteine zur Errichtung von Mauerwerk sind Ziegel, Kalksandsteine und Porenbeton.

a) Mauerziegel

Mauerziegel sind Bauprodukte aus gebranntem Ton. Die Herstellung unterteilt sich in:

1. Rohstoffgewinnung
2. Rohstoffaufbereitung
3. Formgebung
4. Trocknung (ca. 50-100 °C)
5. Brennen (ca. 950-1300 °C)
6. Ggf. Planschleifen
7. Palettierung

Mauerziegel bestehen nahezu vollständig aus Ton. Weitere Ausgangsstoffe sind mineralische Zuschlagstoffe und Wasser. Der benötigte Rohstoff Ton wird i. d. R. in Gruben nahe des Ziegelwerks abgebaut, zum Werk transportiert und anschließend aufbereitet. Das grobe Material wird im „Kollergang“ mit tonnenschweren Stahlwalzen zerkleinert und im Walzwerk weiter zerkleinert und zermahlen. Anschließend wird das feine Material zur Zwischenlagerung in das „Sumpfhaus“ gefördert, wo eine gleichmäßige Durchmischung und Durchfeuchtung erfolgt. Das gut durchmischte, feuchte Rohmaterial wird in der „Strangpresse“ mit hohem Druck durch ein Stahl-Mundstück gepresst und somit in Form gebracht. Der aus der Presse kommende Ziegelstrang wird mit einem Stahldraht geschnitten. Die nächste Station ist der Trockner, in dem die Ziegel über eine Dauer von 1 bis 3 Tagen bei Temperaturen von ca. 50 bis 100°C getrocknet werden. Nach dem Trocknungsprozess gelangen die Ziegel in den Tunnelofen. Dort werden die Ziegel bei Temperaturen zwischen ca. 950 und 1300 °C über einen Zeitraum von bis zu 24 Stunden gebrannt. Bei Planziegeln werden nach dem Brennvorgang noch die Lagerfugen plangeschliffen. Abschließend erfolgen die Palettierung und die Auslieferung der Produkte.

In den Umwelt-Produktdeklarationen EPD-UNI-2008111-D und EPD-AMZ-20140244-ICG1-DE ist der Primärenergieverbrauch für 1 m³ Mauerziegel mit 1202 MJ bzw. 1561 MJ angegeben. Gemäß der erstgenannten Deklaration entfallen 78 % des Primärenergieverbrauchs auf den Produktionsprozess und lediglich 16 % auf den Rohstoff. Multipliziert mit dem in der zweitgenannten Deklaration angegebenen Umrechnungsfaktor beträgt der Primärenergieverbrauch für die Herstellung von einem Kilogramm Ziegel 2,715 MJ.

Für die Herstellung von einem Kubikmeter Mauerziegel ist in den o. g. Deklarationen das globale Erwärmungspotenzial mit 209 bzw. 138 kg CO₂-Äquivalenten angegeben. Mit dem Umrechnungsfaktor aus der zweitgenannten Deklaration errechnen sich 0,240 kg CO₂-Äquivalente je Kilogramm Ziegel.

b) Kalksandsteine

Kalksandsteine bestehen überwiegend aus Sand sowie Branntkalk und Wasser. Die Rezeptur kann zudem Kies und Gesteinsmehl enthalten. Die Herstellung von Kalksandsteinen unterteilt sich in:

1. Dosieren und Mischen der Ausgangskomponenten
2. Zwischenlagerung im Reaktor
3. Ggf. Nachmischen unter weiterer Wasserzugabe
4. Pressen und Stapeln der Steine
5. Autoklavhärtung (ca. 200 °C)
6. Einschweißen in Folie
7. Auslieferung

Die Ausgangsstoffe werden dosiert und intensiv miteinander vermischt. Die Mischung wird in einem Reaktionsbehälter zwischengelagert, um den Branntkalk abzulöschen. Vom „Reaktor“ aus gelangt das Material ggf. in einen Nachmischer und wird durch weitere Wasserzugabe auf eine pressfähige Konsistenz gebracht. Die Rohmasse wird in Formen zu stabilen Rohlingen gepresst und auf Härtewagen gestapelt. Die Wagen werden anschließend über ein Schienensystem in den Autoklaven gefahren und dort über einen Zeitraum von ca. 6 bis 12 Stunden bei einer Temperatur von etwa 200 °C unter Satttdampf-atmosphäre durch die Bildung von Calcium-Silikat-Hydratphasen gehärtet. Nach der Autoklavhärtung sind die Steine gebrauchsfertig und können in Folie eingeschweißt und ausgeliefert werden.

In der Umwelt-Produktdeklaration EPD-BKS-20160002-IAE1-DE ist der Primärenergieverbrauch für die Herstellung von einem Kilogramm Kalksandstein mit 1,172 MJ angegeben. Bei einer Rohdichte des Kalksandsteins von z. B. 1800 kg/m³ entspricht das ca. 2110 MJ je Kubikmeter Stein.

Das globale Erwärmungspotenzial ist in der genannten Deklaration mit 0,136 kg CO₂-Äquivalenten je Kilogramm Kalksandstein angegeben. Das entspricht 245 kg CO₂-Äquivalenten bei einer angenommenen Rohdichte von 1800 kg/m³ je Kubikmeter Stein.

c) Porenbeton

Porenbeton besteht aus fein gemahlenem Sand, Bindemittel (Zement und/oder Branntkalk), Anhydrit/Gips, Aluminiumpulver/-paste und Wasser. Im Folgenden sind die erforderlichen Arbeitsschritte für die Herstellung von Porenbeton aufgeführt:

1. Dosieren und Mischen der Ausgangskomponenten
2. Gießen in Form
3. Schneiden des Rohblocks
4. Autoklavhärtung (ca. 200 °C)
5. Einschweißen in Folie
6. Auslieferung

Die Ausgangsstoffe werden zu einer wässrigen Suspension gemischt und in Formen abgegossen. Der Kalk wird dabei abgelöscht. Im alkalischen Milieu reagiert das Aluminium. Hierbei bildet sich gasförmiger Wasserstoff und porosiert die Rohmasse. Nach einer Standzeit von etwa 15 bis 50 Minuten wird der Rohblock aus der Form gekippt und mit Drähten auf die

gewünschten Steinmaße geschnitten. Anschließend erfolgt, wie auch bei der Kalksandsteinproduktion, die Dampfhärtung im Autoklaven bei Temperaturen von ca. 200 °C über einen Zeitraum von 6 bis 12 Stunden. Anschließend sind die Steine gebrauchsfertig und können in Folie eingeschweißt und ausgeliefert werden.

In der Umwelt-Produktdeklaration mit der Nummer EPD-XEL-20170147-IAD1-DE ist der Primärenergieverbrauch für die Herstellung von einem Kubikmeter unbewehrtem Porenbeton für eine durchschnittliche Rohdichte von 438 kg/m³ mit 1452 MJ angegeben. Umgerechnet auf einen Kilogramm Porenbeton werden 3,314 MJ Primärenergie benötigt.

Das globale Erwärmungspotenzial beträgt gemäß der vorgenannten Deklaration 167 kg CO₂-Äquivalenten für einen Kubikmeter Porenbeton und 0,381 kg CO₂-Äquivalenten für einen Kilogramm Porenbeton.

d) Recycling-Mauerstein aus PB-Rezyklaten

Im Vergleich zu den klassischen Mauersteinen Ziegel, Kalksandstein und Porenbeton besteht der im Vorhaben produzierte Recyclingstein zu einem überwiegenden Anteil aus Porenbetonrezyklat sowie Zement, Steinkohlenflugasche und Wasser. Das Verhältnis von Zement zu Porenbetonrezyklat beträgt 1:11 in Raumteilen. Die Härtung der Steine erfolgt durch die Hydratation des Bindemittels. Das Brennen bei sehr hohen Temperaturen wie bei der Herstellung von Mauerziegeln bzw. die Autoklavhärtung bei ca. 200 °C wie bei der Herstellung von Kalksandsteinen und Porenbeton ist nicht erforderlich. Neben den erforderlichen Rohstoffen wird Primärenergie im Herstellungsprozess für das Mischen der Ausgangsstoffe, die Verdichtung zu stabilen Rohlingen und nach einer Lagerung in Hochregalen für die Palettierung, Verpackung und die Auslieferung benötigt.

Die Herstellung des Recyclingsteins ist mit einer klassischen Pflastersteinproduktion vergleichbar. Gemäß der Umwelt-Produktdeklaration EPD-KLO-20170147-IAC1-DE ist für die Herstellung der dort betrachteten Pflastersteine ein Gesamt-Primärenergiebedarf von ca. 220 MJ je Quadratmeter Stein erforderlich. Umgerechnet auf einen Pflasterstein mit der Masse von 1 kg werden 1,16 MJ Primärenergie benötigt. Zieht man den Primärenergiebedarf für die Rohstoffversorgung ab, verbleiben für die Herstellung ca. 63 MJ je Quadratmeter Stein und 0,33 MJ je Kilogramm Pflasterstein. Somit entfallen ca. 70 % der Primärenergie auf die Bereitstellung der Rohstoffe.

In der o. g. Deklaration ist das globale Erwärmungspotenzial mit 25,46 kg CO₂-Äquivalenten je Quadratmeter Pflasterstein angegeben, wobei ca. 88 % auf die Bereitstellung der Rohstoffe entfallen.

In der nachstehenden Tabelle sind der Primärenergiebedarf sowie das globale Erwärmungspotenzial, ausgedrückt durch CO₂-Äquivalente aus beispielhaften Umwelt-Produktdeklarationen für das Produktionsstadium klassischer Mauersteine im Vergleich zum RC-Mauerstein aus Porenbetonrezyklaten aufgeführt. Die Werte für den Recyclingstein wurden abgeschätzt, da derzeit keine belastbare Datenbasis für deren Kalkulation vorliegt.

Für die vorliegende Abschätzung des Primärenergiebedarfs (PEB) und des globalen Erwärmungspotenzials (GEP) für den Recyclingstein aus Porenbetonrezyklaten wurden folgende Annahmen getroffen:

- Porenbetonrezyklat: 670 kg/m³, PEB je kg: 0,12 MJ; GEP je kg: 0,008 kg CO₂-Äq.
- Zement: 150 kg/m³; PEB je kg: 2,768 MJ; GEP je kg: 0,67 kg CO₂-Äq.
- Steinkohleflugasche: 60 kg/m³, PEB je kg: 0,14 MJ; GEP je kg: 0,01 kg CO₂-Äq.
- PEB für Herstellung je kg PB-RC-Mauerstein: 0,33 MJ
- GEP für Herstellung je kg PB-RC-Mauerstein: 0,017 kg CO₂-Äq.
- Trockenrohdicke PB-RC-Mauerstein: 1110 kg/m³

	Einheit	Ziegel ^{a)}	Kalksandstein ^{b)}	Porenbeton ^{c)}	PB-RC-Mauerstein ^{d)}
Primärenergiebedarf (PEB)	MJ/kg	2,715	1,172	3,314	0,904
	MJ/m ³	1561	2110	1452	1003
Globales Erwärmungspotenzial (GEP)	kg CO ₂ -Äq./kg	0,240	0,136	0,381	0,138
	kg CO ₂ -Äq./m ³	138	245	167	153
Werte entnommen aus der Umwelt-Produktdeklaration mit der Nr.: a) EPD-AMZ-20140244-ICG1-DE vom 26.08.2015 b) EPD-BKS-20160002-IAE1-DE vom 03.03.2016 c) EPD-XEL-20170147-IAD1-DE vom 09.11.2017 d) Die Werte für den PB-RC-Mauerstein wurden abgeschätzt.					

Gemäß den Schätzungen der Autoren ist anzunehmen, dass die Produktion von Recycling-Mauersteinen aus Porenbetonrezyklaten ca. 0,9 MJ/kg und ca. 1000 MJ/m³ betragen wird. Im Vergleich zu klassischen Mauersteinen aus Primärmaterial wäre somit ein geringerer Energiebedarf erforderlich. Den höchsten Anteil am Primärenergiebedarf für die Herstellung des PB-RC-Mauersteins nimmt hierbei mit ca. 52 % die Bereitstellung des Zements ein.

Die Herstellung des Recyclingsteins verursacht nach den o. g. Schätzungen ein globales Erwärmungspotenzial von ca. 0,14 kg CO₂-Äquivalente je Kilogramm bzw. ca. 150 kg CO₂-Äquivalente je Kubikmeter. Mit diesen Werten schneidet der Recyclingstein trotz eines hohen Beitrags von ca. 83 % verursacht durch die Bereitstellung des Zements im Vergleich zu den klassischen Mauersteinen gut ab. Je Kilogramm Mauerstein verursacht der Recyclingstein zusammen mit dem Kalksandstein das geringste globale Erwärmungspotenzial und je Kubikmeter Mauerstein nach dem Ziegel das geringste Erwärmungspotenzial.

Sollten Recyclingunternehmen das Porenbetonrezyklat zu einem mit natürlichen Gesteinskörnungen vergleichbaren Preis und weniger zur Verfügung stellen, könnte der Recyclingstein nach derzeitigen Annahmen günstiger als die o. g. klassischen Mauersteine hergestellt werden. Je nach Vergleichsbaustoff könnte sich selbst ein etwas höherer Preis für das Rezyklat rechnen.

Im Vergleich zum Mauerziegel wird für den RC-Stein zwar Zement als Bindemittel benötigt. Dieser Vorteil könnte sich aber durch das sehr energie- und kostenintensive Brennen der Ziegel für den Recyclingstein umkehren.

Ein Kalksandstein besteht überwiegend aus Sand sowie aus Branntkalk (ca. 8-10 M.-%) und Wasser. Vergleichend hierzu besteht der Recyclingstein überwiegend aus Porenbetonrezyklat. Als Bindemittel wird Zement (ca. 10 M.-%) verwendet. Die Bindemittelanteile beider Baustoffe scheinen vergleichbar hoch zu sein. Jedoch weist ein Kalksandstein üblicherweise eine höhere Rohdichte als der RC-Stein auf, so dass der Bindemittelgehalt je Kubikmeter Mauerstein für einen Kalksandstein höher ausfällt. Der Branntkalk ist zudem etwas teurer als der Zement. Des Weiteren ist für die Herstellung des Recyclingsteins keine Autoklavhärtung mehr erforderlich. Somit ist anzunehmen, dass die Produktion des RC-Mauersteins aus Porenbetonrezyklaten zu einem geringeren Preis als der Kalksandstein möglich ist.

Der Porenbeton besteht zu einem Großteil aus fein gemahlenem Sand. Die Bindemittelanteile sind im Vergleich zum RC-Stein zwar etwas niedriger, jedoch ist der gemahlene Sand deutlich teurer als nicht gemahlener Sand und stellt bei der Herstellung von Porenbeton den größten Kostenfaktor dar. Das Produkt „Porenbetonrezyklat“ wird mit großer Sicherheit deutlich günstiger zu beschaffen sein als gemahlener Sand. Des Weiteren ist die Autoklavhärtung für die Herstellung des Recyclingsteins nicht erforderlich. Es ist daher davon auszugehen, dass der RC-Mauerstein günstiger produziert werden kann als ein Porenbeton.

Abschließend bleibt zu bemerken, dass es sich bei den vorstehenden Beschreibungen um vergleichende Einschätzungen handelt. Eine konkrete Datenbasis für eine belastbare Kalkulation liegt nicht vor. Nach den derzeitigen Schätzungen der Autoren scheint im Vergleich zu den klassischen Mauersteinen mit natürlichen Rohstoffen eine kostengünstigere Produktion von Recyclingsteinen mit Porenbetonrezyklaten mit einem geringeren Primärenergiebedarf und einem geringeren globalen Erwärmungspotenzial möglich. Mit der Verwendung von Porenbetonrezyklaten als Gesteinskörnung können Primärrohstoffe geschont und Deponien entlastet werden. Die baurechtlichen Voraussetzungen für eine Produktion dieses Recyclingbaustoffes sowie eine Akzeptanz zur Verwendung von RC-Produkten müssten jedoch noch geschaffen/forciert werden.

Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Informationen zum Vorhaben wurden auf der Homepage sowie in den Jahresberichten der Forschungsstelle veröffentlicht.

Das Projekt fand Erwähnung in diversen Zeitungsberichten/Magazinen:

- Beneke, M.: Aus Müll wird Baustoff, Weser Kurier, 28.12.2016
- Zeidler, U.: Das Warten hat ein Ende, Wümme-Zeitung, 25.09.2017
- Frohne, K.: Recycling-Station in Borgfeld eröffnet, 26.09.2017
- Ein schöner Tag für Borgfeld – die neue Recycling-Station öffnet ihre Tore, TONNE Nr. 10, November 2017, S. 4
- Modernes Recyceln!, Oberneuland Magazin Nr. 11/2017, S 89

Ergebnisse des Vorhabens wurden auf der Berliner Konferenz „Mineralische Nebenprodukte und Abfälle“ in Berlin am 21.06.2016 unter dem Titel „Hochwertige Verwertungswege für Porenbetonbruch in Mörteln und Leichtsteinen für Mauerwerk“ vorgestellt und im Tagungsband (In: Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 3 - Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen -, Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.), TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2016, S. 433-453) veröffentlicht.

Weitere Veröffentlichungen erfolgten auf der Fachtagung Recycling R'16 am 20.09.2016 in Weimar unter dem Titel „Hochwertige Verwertungsmöglichkeiten für Porenbetonrezyklate“ (mit Fachbeitrag in elektronischer Form), auf dem 1. Norddeutschen Fachsymposium Recycling-Baustoffe am 29.03.2017 in Kiel unter dem Titel „Recycling von Porenbeton“, in der Fachzeitschrift ZKG International, Special 2017, Drymix Mortar and Construction Chemistry (2017), S. 36-41 unter dem Titel „Recycled autoclaved aerated concrete (AAC) from processed construction and demolition waste for producing dry premixed mortars“ sowie auf dem Kongress 2018 Baustoffrecycling- und Wertstoffverwertung am 22.03.2018 in Bremen unter dem Titel „Das RC-Wandsystem: Stein + Mörtel“.

Im Zuge der Bearbeitung eines bereits beantragten Folgevorhabens zum Monitoring der errichteten Wände wird für das Sichtmauerwerk, das als dauerhaftes Exponat dient, ein Informationsschild erstellt. Des Weiteren wird eine Broschüre erstellt und u. a. in der Recyclingstation ausgehängt. Für interessierte Kreise werden Besichtigungstermine im Gebäude angeboten. Zudem ist eine Drucksache in gebundener Form vorgesehen, aus der die Entwicklungsarbeit bis hin zur industriellen Produktion der beiden Recyclingstoffe hervorgeht und in der die Ergebnisse des Demonstrationsvorhabens zusammengefasst dargestellt werden.

Fazit

Im Vorhaben wurden erstmalig Recyclingbaustoffe aus Porenbetonrezyklaten als Wandbildner in einem Bauvorhaben eingesetzt und deren Eignung unter baupraktischen Bedingungen nachgewiesen. Durch die Wiederverwendung dieses problematischen Abbruchmaterials auf demselben technisch hohen Niveau wie das Primärprodukt können Deponien und die Umwelt entlastet sowie natürliche Ressourcen geschont werden.

In einem Folgevorhaben soll ein Monitoring der errichteten Wände erfolgen sowie weitere Öffentlichkeitsarbeit betrieben werden.

Als nächster Schritt in Richtung Praxiseinsatz könnte die Forschungsstelle Hilfestellung für potenzielle Hersteller der Recyclingprodukte bei der Erwirkung einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung leisten. Als Fortführung der Arbeiten strebt die Forschungsstelle zudem die Untersuchung der Eignung von Produkten aus Porenbetonrezyklaten für tragende Anwendungen an.

Literaturverzeichnis

- [1] Hlawatsch, F.; Kropp, J.: Leichtmörtelsteine aus feinen Porenbetongranulaten, Baustoff Recycling + Deponietechnik 4/2008, S. 28-35
- [2] Diedrich, R.; Brauch, A.; Kropp, J.: Werk trockenmörtel mit Porenbetongranulaten aus der Bauschutttaufbereitung. Schlussbericht zum IGF-Forschungsvorhaben 11764 N, 2001
- [3] Aycil, H.; Kropp, J.: Werk trockenmörtel mit Porenbetonrezyklaten aus der Bauschutttaufbereitung. Schlussbericht zum IGF-Forschungsvorhaben 13994 N, 2006
- [4] Aycil, H.; Kropp, J.: Scale up des Porenbetonrecyclings, Tagungsband 19. Internationale Baustofftagung ibausil, 16.-18.09.2015, Weimar, Deutschland. F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.), 2015, Band 2, S. 361-368
- [5] DIN EN 993-1: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung - Siebverfahren, 2012-03
- [6] DIN EN 1097-6: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme, 2013-09
- [7] DIN EN 1097-3: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 3: Bestimmung von Schüttdichte und Hohlraumgehalt, 1998-06
- [8] DIN EN 196-2: Prüfverfahren für Zement - Teil 2: Chemische Analyse von Zement, 2013-10
- [9] Aycil, H.; Hlawatsch, F.; Kropp, J.: Bestimmung der Kernfeuchte wassergesättigter Bauschuttrezyklate anhand des Trocknungsverhaltens, beton 3/2015, S. 88-93
- [10] FGSV-Arbeitspapier Nr. 27/2: Prüfung von Straßenausbaumaterial auf carbostämmige Bindemittel – Schnellverfahren – (2000)
- [11] DIN EN 15308: Charakterisierung von Abfällen - Bestimmung ausgewählter polychlorierter Biphenyle (PCB) in festem Abfall mittels Gaschromatographie mit Elektroneneinfang-Detektion oder massenspektrometrischer Detektion, 2008-05
- [12] DIN EN ISO/IEC 17025: Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien, 2005-08
- [13] BIA 7487: Verfahren zur analytischen Bestimmung geringer Massengehalte von Asbestfasern in Pulvern, Pudern und Stäuben mit REM/EDX, 2003-10
- [14] DIN EN 1015-3: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch), 2007-05
- [15] DIN 18555-7: Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln; Frischmörtel; Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens nach dem Filterplattenverfahren, 1987-11
- [16] DIN EN 1015-11: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 11: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel, 2007-05
- [17] DIN EN 772-1: Prüfverfahren für Mauersteine - Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit, 2016-05
- [18] DIN V 18152-100: Vollsteine und Vollblöcke aus Leichtbeton - Teil 100: Vollsteine und Vollblöcke mit besonderen Eigenschaften, 2005-10
- [19] DIN EN 771-3: Festlegungen für Mauersteine - Teil 3: Mauersteine aus Beton (mit dichten und porigen Zuschlägen), 2015-11

- [20] DIN 1048-5: Prüfverfahren für Beton - Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper, 1991-06
- [21] DIN 52617: Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen, 1987-05
- [22] VDI 3492: Messen von Innenraumluftverunreinigungen - Messen von Immissionen - Messen anorganischer faserförmiger Partikel - Rasterelektronenmikroskopisches Verfahren, 2013-06
- [23] DIN EN 1015-1: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung (durch Siebanalyse), 2007-05
- [24] DIN EN 1015-6: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 6: Bestimmung der Rohdichte von Frischmörtel, 2007-05
- [25] DIN EN 1015-9: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 9: Bestimmung der Verarbeitbarkeitszeit und der Korrigierbarkeitszeit von Frischmörtel, 2007-05
- [26] DIN EN 1015-2: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 2: Probenahme von Mörteln und Herstellung von Prüfmörteln, 2007-05
- [27] DIN EN 196-1: Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit, 2016-11
- [28] DIN V 18580: Mauermörtel mit besonderen Eigenschaften, 2007-03
- [29] Bremische Landesbauordnung vom 06. Oktober 2009
- [30] DIN 18555-9: Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln - Teil 9: Festmörtel; Bestimmung der Fugendruckfestigkeit, 1999-09

Anhangverzeichnis

Anhang 1: Bilder Abbruchmaterial und Aufbereitung	A1
Anhang 1.1: Porenbetonbruch.....	A1
Anhang 1.2: Detail aus Anhang 1.1, Fremdbestandteile im Abbruch	A1
Anhang 1.3: Aufbereitung, Übersicht.....	A1
Anhang 1.4: Homogenisierung im Auffangcontainer	A1
Anhang 1.5: PBR 0/2, mehrfach umgesetzt.....	A1
Anhang 1.6: In Big Bags gefülltes Porenbetonrezyklat	A1
Anhang 2: Sieblinien	A2
Anhang 2.1: Sieblinie der Einzelkörnungen	A2
Anhang 2.2: Sieblinie der Mischkörnungen mit unterschiedlichen Anteilen von Brechsand zu Splitt in M.-% im Vergleich zur Sieblinie des Materials aus dem Vorläufervorhaben FV 212	A2
Anhang 3: Bilder zur Herstellung der Mauersteine	A3
Anhang 3.1: Einbringen des Porenbetonrezyklats in die Einlaufmulde.....	A3
Anhang 3.2: Förderung des Rezyklats in das Silo	A3
Anhang 3.3: Konsistenzkontrolle	A3
Anhang 3.4: Verdichtungsanlage.....	A3
Anhang 3.5: Mauerstein-Rohlinge nach dem Verlassen der Verdichtungsanlage	A3
Anhang 3.6: Mauerstein-Rohlinge, Nahaufnahme	A3
Anhang 4: Bilder zur Herstellung der Mauermörtel	A4
Anhang 4.1: Porenbetonrezyklat, getrocknet, dosiert und verpackt.....	A4
Anhang 4.2: Portlandzement mit hohem Sulfatwiderstand	A4
Anhang 4.3: Methylhydroxyethylcellulose und Luftporenbildner	A4
Anhang 4.4: Einfüllen der Ausgangsstoffe in den Mischer	A4
Anhang 4.5: Füllen der Säcke mit Trockenmörtel	A4
Anhang 4.6: Produzierte Mauermörtel	A4
Anhang 5: Errichtung nicht tragender Innenwände aus PB-Recyclingprodukten .A5	A5
Anhang 5.1: Porenbeton-Recyclingprodukte auf der Baustelle	A5
Anhang 5.2: Anbringen der Abdichtung gegen aufsteigende Feuchtigkeit	A5
Anhang 5.3: Auf der Baustelle gemischter Frischmörtel	A6
Anhang 5.4: Ausrichten der ersten Steinlage mittels Richtschnur	A6
Anhang 5.5: Sicht auf die Stoßfuge	A7
Anhang 5.6: Mauerteilstück, mit dem Hammer gespaltene Steine verarbeitet	A7
Anhang 5.7: Sicherung der Mauer an angrenzender Stahlstütze	A8
Anhang 5.8: Sägen eines Recyclingsteines mittels Winkelschleifer mit Trennscheibe ..A8	A8
Anhang 5.9: Glätten der Stoßfuge des Sichtmauerwerks	A9
Anhang 5.10: Glätten der Lagerfuge des Sichtmauerwerks	A9
Anhang 5.11: Glätten der Fugen mit einem feuchten Schwamm.....	A10
Anhang 5.12: Geglättete Fugen des Sichtmauerwerks	A10
Anhang 5.13: Geglättete Fugen des Sichtmauerwerks, Nachaufnahme	A11
Anhang 5.14: Am Ende des ersten Arbeitstages errichtetes Mauerwerk.....	A11
Anhang 5.15: Rohbau mit fertig gestelltem Mauerwerk aus PB-RC-Produkten.....	A12
Anhang 5.16: Ausschnitt aus Anhang 5.15.....	A12
Anhang 5.17: Fertig gestelltes Mauerwerk, Ansicht aus dem Sozialraum	A13
Anhang 5.18: Fertig gestelltes Mauerwerk, Ansicht aus dem Büroraum	A13

Anhang

Anhang 1: Bilder Abbruchmaterial und Aufbereitung



Anhang 1.1: Porenbetonabbruch



Anhang 1.2: Detail aus Anhang 1.1, Fremdbestandteile im Abbruch



Anhang 1.3: Aufbereitung, Übersicht



Anhang 1.4: Homogenisierung im Auffangcontainer

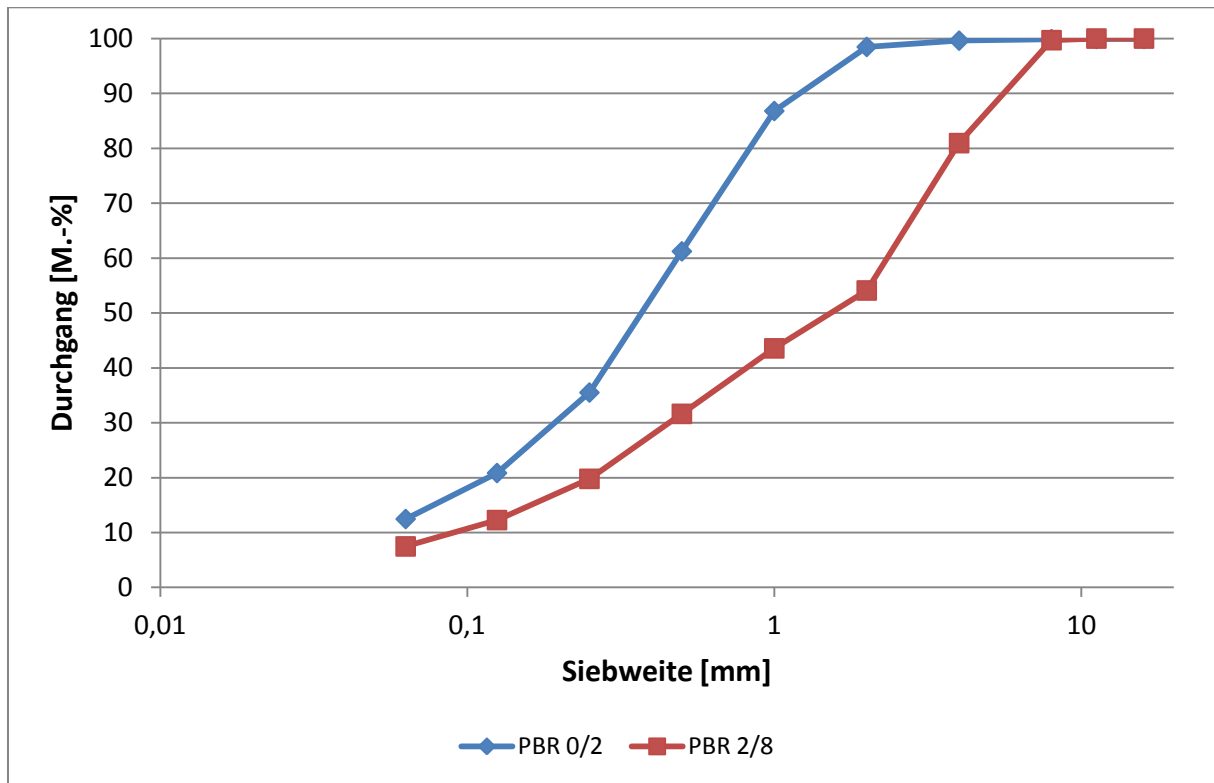


Anhang 1.5: PBR 0/2, mehrfach umgesetzt

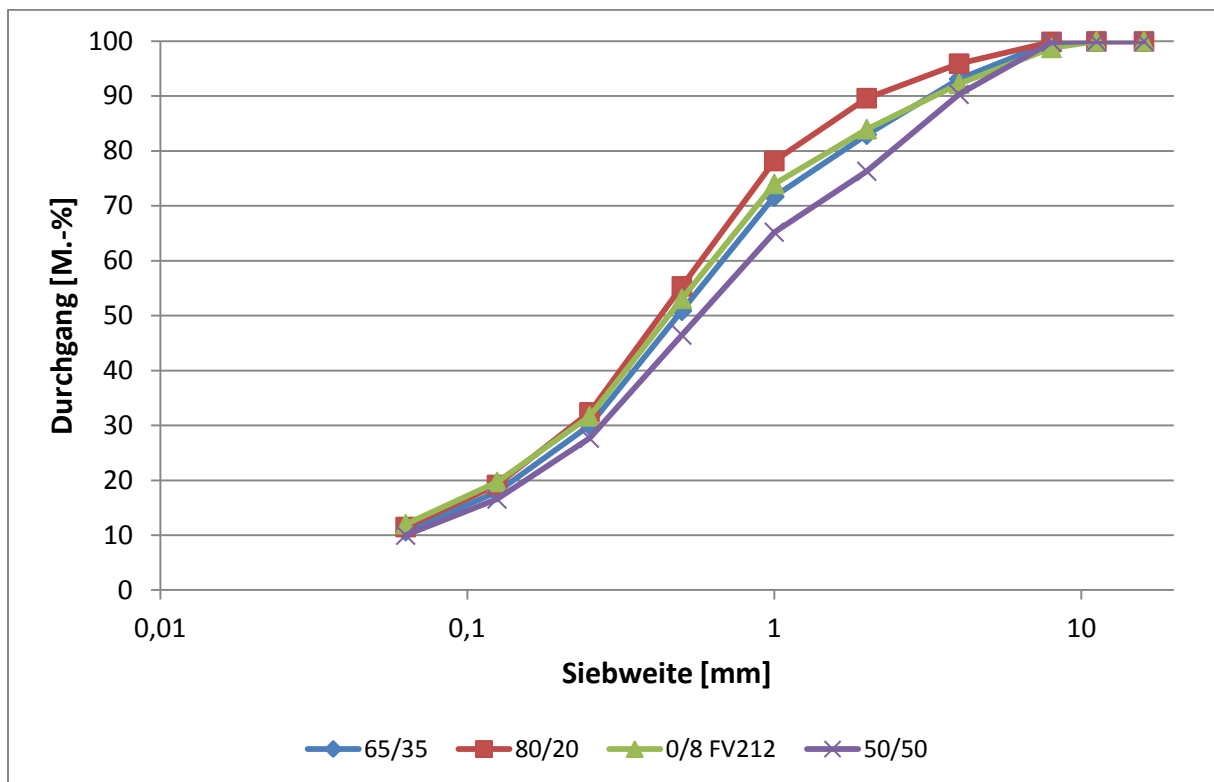


Anhang 1.6: In Big Bags gefülltes Porenbetonrecycling

Anhang 2: Sieblinien



Anhang 2.1: Sieblinie der Einzelkörnungen

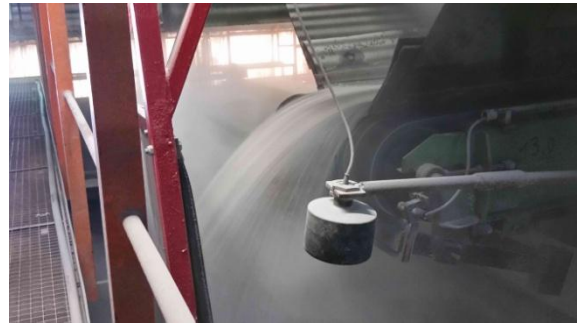


Anhang 2.2: Sieblinie der Mischkörnungen mit unterschiedlichen Anteilen von Brechsand zu Splitt in M.-% im Vergleich zur Sieblinie des Materials aus dem Vorläufervorhaben FV212

Anhang 3: Bilder zur Herstellung der Mauersteine



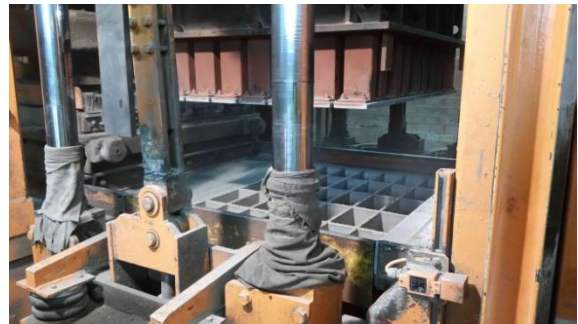
Anhang 3.1: Einbringen des Porenbetonrezyklats in die Einlaufmulde



Anhang 3.2: Förderung des Rezyklats in das Silo



Anhang 3.3: Konsistenzkontrolle



Anhang 3.4: Verdichtungsanlage



Anhang 3.5: Mauerstein-Rohlinge nach dem Verlassen der Verdichtungsanlage



Anhang 3.6: Mauerstein-Rohlinge, Nahaufnahme

Anhang 4: Bilder zur Herstellung der Mauermörtel



Anhang 4.1: Porenbetonrezyklat, getrocknet, dosiert und verpackt



Anhang 4.2: Portlandzement mit hohem Sulfatwiderstand



Anhang 4.3: Methylhydroxyethylcellulose und Luftporenbildner



Anhang 4.4: Einfüllen der Ausgangsstoffe in den Mischer



Anhang 4.5: Füllen der Säcke mit Trockenmörtel



Anhang 4.6: Produzierte Mauermörtel

Anhang 5: Errichtung nicht tragender Innenwände aus PB-Recyclingprodukten



Anhang 5.1: Porenbeton-Recyclingprodukte auf der Baustelle



Anhang 5.2: Anbringen der Abdichtung gegen aufsteigende Feuchtigkeit



Anhang 5.3: Auf der Baustelle gemischter Frischmörtel



Anhang 5.4: Ausrichten der ersten Steinlage mittels Richtschnur



Anhang 5.5: Sicht auf die Stoßfugen



Anhang 5.6: Mauerteilstück, mit dem Hammer gespaltene Steine verarbeitet



Anhang 5.7: Sicherung der Mauer an angrenzender Stahlstütze



Anhang 5.8: Sägen eines Recyclingsteines mittels Winkelschleifer mit Trennscheibe



Anhang 5.9: Glätten der Stoßfuge des Sichtmauerwerks



Anhang 5.10: Glätten der Lagerfuge des Sichtmauerwerks



Anhang 5.11: Glätten der Fugen mit einem feuchten Schwamm



Anhang 5.12: Geglättete Fugen des Sichtmauerwerks



Anhang 5.13: Geglättete Fugen des Sichtmauerwerks, Nahaufnahme



Anhang 5.14: Am Ende des ersten Arbeitstages errichtetes Mauerwerk



Anhang 5.15: Rohbau mit fertiggestelltem Mauerwerk aus PB-RC-Produkten



Anhang 5.16: Ausschnitt aus Anhang 5.15



Anhang 5.17: Fertiggestelltes Mauerwerk, Ansicht aus dem Sozialraum



Anhang 5.18: Fertiggestelltes Mauerwerk, Ansicht aus dem Büroraum