

# Werk trockenmörtel mit Porenbetonrezyklaten aus der Bauschutt aufbereitung

von Dipl.-Ing. Hakan Aycil  
Dipl.-Ing Romanus Diedrich  
und Prof. Dr.-Ing. Jörg Kropp

Aus einem Problemstoff der Bauschutt aufbereitung wurden Verfüll-, Putz- und Mauermörtel mit interessanten Eigenschaften entwickelt.

## 1 Porenbeton

Porenbeton wird aus quarzhaltiger feiner Gesteinskörnung, Bindemittel, Treibmittel und Wasser mittels Dampf härtung hergestellt [8]. Die Vorzüge dieses Baustoffes sind u. a. seine niedrige Trockenroh dichte, seine hohe Wasserdampfdurchlässigkeit und seine niedrige Wärmeleitfähigkeit. Aufgrund dieser sehr guten bauphysikalischen Eigenschaften stieg die Produktion und Verarbeitung von Porenbetonprodukten in den vergangenen Jahrzehnten steil an und wird auch vor dem Hintergrund der stetig wachsenden Bemühungen um Energieeinsparungen weiter wachsen.

Tabelle 1: Eigenschaften von Porenbeton

Rohdichte	[kg/dm <sup>3</sup> ]	0,35 – 1,00
Biegezugfestigkeit	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,5 – 2,0
Druckfestigkeit	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,5 – 10,0
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	5 – 10
Wärmeleitfähigkeit	[W/(m·K)]	0,11 – 0,31

## 2 Problemstellung

Porenbeton wird aufgrund seiner hervorragenden bauphysikalischen Eigenschaften und der wirtschaftlichen Verarbeitung seit mehreren Jahrzehnten verstärkt im Hochbau eingesetzt. Allein im Jahr 2004 wurden in Deutschland 3,4 Mio. m<sup>3</sup> Porenbetonmauersteine abgesetzt [2]. Die bis dato verbauten Porenbetonbauteile befinden sich hauptsächlich noch im Gebäudebestand. Es ist aber zu erwarten, dass in naher Zukunft der Anteil an Porenbeton im Bauschutt stetig steigen wird. Es stellt sich somit die Frage, wie mit diesem Material, das aufgrund seiner außerordentlich hohen Porosität eine sehr geringe Festigkeit und einen geringen Widerstand gegen Witterungseinflüsse aufweist, bezüglich Verwertung oder Entsorgung umzugehen ist.

## 3 Ausgangssituation

Derzeit ist der Rücklauf von Porenbeton noch gering. Die anfallenden Mengen werden aussortiert und überwiegend deponiert. Eine Deponierung der Porenbetonabbruchmassen ist teuer und Deponieraum nur begrenzt vorhanden. Laut Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz [6] ist eine Deponierung auch nur zulässig, wenn keine alternativen Verwertungswege existieren. Mineralische Abbruchmassen, zu denen Porenbeton zählt, werden hauptsächlich im Straßenbau eingesetzt. Hier

wird ein Mindestmaß an Festigkeit und Frostwiderstand der Altbaustoffe gefordert, die Porenbeton nicht erfüllt. Sofern die Anteile an Porenbeton bzw. an porösen Stoffen unter 1 Vol.-% liegen, können sie aber im Straßenbau noch toleriert werden [7].

Gegenwärtig wird sortenreiner Porenbeton 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 im Vergleich zu den derzeit bereits anfallenden und insbesondere zu den zukünftig zu erwartenden Abbruchmassen sehr gering. Sie werden bereits durch den Produktionsausschuss der Porenbetonwerke mehr als gedeckt. Zudem schließen diese Arten der Wiederverwertung nicht die bei der Aufbereitung von Porenbeton in großen Mengen anfallenden Feinkornanteile mit ein.

#### **4 Ziel**

Eine Möglichkeit, rückgebauten Porenbeton wieder einer hochwertigen Nutzung zuzuführen, wurde in der Herstellung von Werk trockenmörteln gesehen. Dabei sollen die typischen vorteilhaften Eigenschaften des Porenbetons wie geringe Dichte, hohe Wasserdampfdiffusion und gute Wärmedämmung bewahrt und gezielt ausgenutzt werden. Hierzu wurde in einem durch die AiF geförderten Vorhaben (AiF-Forschungsvorhaben 11764 N [3]) zunächst untersucht, ob es überhaupt möglich ist, verarbeitungsfähige Mörtel mit Porenbetonrezyklaten herzustellen. Anschließend wurden in einem Anschlussvorhaben (AiF-Forschungsvorhaben 13994 N [1]) die charakteristischen Kennwerte ausgewählter Mörtel ermittelt und mögliche Anwendungsgebiete für solche Mörtel aufgezeigt.

Die Fokussierung auf Werk trockenmörtel soll verdeutlichen, dass die Einstellung gewünschter Frisch- und Festmörteleigenschaften besondere Kenntnisse und Verarbeitungstechnologien in der Verwendung der empfindlichen Ausgangsstoffe sowie dem Einsatz von Zusatzmitteln erfordert. Eine Herstellung dieser Mörtel als Baustellenmörtel ist nicht Erfolg versprechend.

### **5 Untersuchungen zur Verarbeitbarkeit von Mörteln mit Porenbetonrezyklaten**

#### **5.1 Gesteinskörnung**

Die Porenbetonrezyklate wurden von einer Bauschutttaufbereitungsanlage bezogen, die Porenbeton aus Produktionsabfällen sowie aus der Bauschutttaufbereitung als Granulat zur Dachbegrünung vermarktete. Für die Zerkleinerung des Porenbetons wurde ein Backenbrecher verwendet. Teilweise wurde ergänzend ein Granulat eingesetzt, das aus Bruchmaterial der Porenbetonproduktion bestand und vom Porenbetonhersteller als Hygienestreu vertrieben wurde.

Bei der Herstellung von Porenbeton bilden sich durch das verwendete Treibmittel kugelig geschlossene Makroporen von 0,5 bis 1,5 mm Größe, die durch dünne mikroporöse Zellwände voneinander getrennt sind. Wird Porenbeton gebrochen, so findet man die grobporige Struktur in der Splittkörnung wieder. Die Oberfläche dieser Körner ist entsprechend groß und rau, da sie aus mehr oder weniger weit geöffneten Makroporen gebildet wird.

Während in der Splittkörnung grobe Poren vorhanden sind, besteht die Brechsandkörnung vorwiegend aus den zerkleinerten Zellwänden. Dieser

Unterschied zwischen dem Porenbetonbrechsand 0/2 und dem Porenbetonsplitt 2/8 fand sich auch in den Korneigenschaften der verwendeten Granulate wieder, welche in der Tabelle 2 dargestellt sind.

Tabelle 2: Korneigenschaften der gelieferten Porenbetonrezyklate

Eigenschaft		Körnung	
		0/2	2/8
Kornrohddichte	[kg/dm <sup>3</sup> ]	1,17	0,92
Schüttdichte	[kg/dm <sup>3</sup> ]	0,72	0,43
Wasseraufnahme nach 24 Stunden	[M.-%]	42,2	52,9
Wasseraufnahme nach 10 Minuten	[M.-%]	40,6	47,1

Die Kornrohddichte sowie die Schüttdichte des Brechsandes waren höher als die des Splitts, während die Splittkörnung eine höhere Wasseraufnahme aufwies als die Brechsandkörnung. Die Wasseraufnahme erfolgte sehr schnell. In den ersten 10 Minuten waren bereits über 90 % der nach 24-stündiger Wasserlagerung ermittelten Wassermenge aufgenommen.

Bei der Herstellung von Porenbeton kann auch Gips/Anhydrit eingesetzt werden. Zudem kann an rückgebautem Porenbeton z. B. Gipsputz anhaften. Dadurch kann das Porenbetonrezyklat erhebliche Mengen an Sulfat enthalten, das sich erhärtungsstörend bzw. negativ auf die Raumbeständigkeit der daraus hergestellten Mörtel auswirken kann. Die hier verwendeten Rezyklate enthielten maximal 1,8 M.-% Sulfat [SO<sub>3</sub>].

Die Kornfestigkeit der Porenbetonsplittes war mit ca. 4 kN (Druckwert) sehr niedrig. Der Widerstand der Splittkörnung gegen Frost war gering. Die Absplitterungsraten lagen deutlich über 15 M.-%.

## 5.2 Mörtel

### 5.2.1 Mörtel ohne Feinsand

Die Zusammenstellung des Kornaufbaus orientierte sich anfangs an der Kornrohddichte der Porenbetonrezyklate. Um niedrige Trockenrohddichten bei den Festmörteln zu erreichen, wurden auch Sieblinien mit sehr hohen Splittanteilen ohne Feinsand für haufwerksporige Mörtel geprüft. Als Bindemittel wurde hochhydraulischer Kalk verwendet. Das Verhältnis von Bindemittel zu Gesteinskörnung betrug 1:3 RT (Raumteile). Die Konsistenz wurde von sehr steif bis weich variiert.

Generell ließen sich sehr steife und steife Mörtel ohne Feinsand herstellen, die als Verfüllmörtel eingesetzt werden können. Diese Mörtel waren aber ausgesprochen sperrig.

Die Verarbeitbarkeit der plastischen und weichen Mörtel war mäßig bis schlecht. Aufgrund ihres hohen Wasseranspruches neigten sie zur Entmischung. Den Mörteln fehlte der innere Zusammenhalt. Beim Auftragen auf die Wand als Putzlage konnten die groben Körner nicht in der Matrix gehalten werden und rollten ab. Außerdem war die Oberflächenbeschaffenheit sehr rau. Die plastischen und weichen Mörtel waren aufgrund ihrer schlechten Verarbeitbarkeit z.B. als Putzmörtel nicht geeignet.

### *5.2.2 Mörtel mit Feinsand*

Aufgrund der schlechten Verarbeitbarkeit der Mörtel ohne Feinsand im plastischen bis weichen Konsistenzbereich wurde der Feinsandanteil (ohne Mehlkorn) schrittweise erhöht und der Kornaufbau des Feinsandes sowie die Bindemittelmenge variiert.

Generell verbesserte sich die Verarbeitbarkeit der plastischen bis weichen Mörtel mit zunehmender Feinheit des Korngemisches und einem geeigneten Kornaufbau, stärker aber noch mit zunehmendem Bindemittelgehalt. Bei einem Bindemittelgehalt von 1:3 RT erwies sich ein Sandanteil (< 2 mm) von ca. 40 V.-% als vorteilhaft. Eine Verwendung der plastischen bis weichen Mörtel mit Feinsand als Putzmörtel war aufgrund der weiterhin mäßigen Verarbeitbarkeit nicht möglich.

### *5.2.3 Mörtel mit Mehlkorn*

Durch die Steigerung des Bindemittelgehaltes und damit des Mehlkorngehaltes im gesamten Trockengemisch konnte die Verarbeitbarkeit deutlich verbessert werden. Um aber nicht unwirtschaftlich hohe Mengen an Bindemittel einsetzen zu müssen, wurde der Einfluss des Mehlkornes auf die Mörtel Eigenschaften untersucht. Es wurde dabei auf Porenbetonmehl zurückgegriffen, das bei der Aufbereitung von Porenbeton in großen Mengen anfällt. Während in den vorherigen Untersuchungen gewaschener Feinsand verwendet wurde, kam nun der angelieferte mehlkornreiche Feinsand in verschiedenen Anteilen zum Einsatz.

Den grobkörnigen Mörteln mit Mehlkorn fehlte es an Haftvermögen nach dem Auftragen auf eine Wand und bei den feinkörnigen Mörteln mit Mehlkorn reicherte sich der Leim an der Oberfläche an, so dass ein Glätten/Abreiben kaum möglich war. Mit 40 Vol.-% mehlkornreichem Feinsand und 60 Vol.-% Splitt in der Gesteinskörnung wurden die besten Verarbeitungseigenschaften erzielt. Mit diesem Verhältnis wurden deshalb die weiteren Untersuchungen hinsichtlich des Verhaltens bei Änderung des Wasser- und des Bindemittelgehaltes durchgeführt.

Es zeigte sich, dass sich die Verarbeitbarkeit der Mörtel mit abnehmendem Bindemittelvolumen verschlechterte. Die Grenze der Verarbeitbarkeit lag im steifen Konsistenzbereich bei einem Verhältnis von Bindemittel zu Gesteinskörnung von 1:5 RT. Bei einem Verhältnis von 1:3 RT konnten die weichen Mörtel noch gut verarbeitet werden. Die Verwendung des ungewaschenen Feinsandes bewirkte eine Verbesserung der Verarbeitbarkeit der Mörtel. Die Hafteigenschaften an der Wand waren aber nur mäßig.

### *5.2.4 Mörtel mit Zusätzen*

Nachdem eine Änderung der Rezepturparameter in weiten Bereichen keine wesentliche Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften wie der Mörtelstabilität sowie des Haftverhaltens bewirkte, wurden nun Zusatzmittel eingesetzt. Als Bindemittel wurde neben dem hochhydraulischen Kalk ein Zement CEM I 52,5 R eingesetzt.

Mit dem Einsatz von Schaum konnte der Luftporengehalt deutlich angehoben werden. Es ließen sich gut verarbeitbare, sehr leichte aber dennoch ausreichend feste Mörtel herstellen. Mit Hilfe von Celluloseether konnte die Klebwirkung der Mörtel erhöht werden. Die Verwendung von Luftporenbildner führte zu einer

Stabilisierung des Leimes. Mit einer Kombination von Celluloseether und Luftporenbildner ließen sich schließlich Mörtel mit sehr guter Verarbeitbarkeit herstellen, wobei im Vergleich zu den Mörteln mit 8 mm Größtkorn die Mörtel mit 2 mm Größtkorn eine bessere Verarbeitbarkeit aufwiesen.

### *5.2.5 Maschinelle Verarbeitung*

An ausgewählten Rezepturen wurde die maschinelle Verarbeitbarkeit im Nass- und Trockenspritzverfahren geprüft. Bei beiden Varianten wurde die Gesteinskörnung trocken und auch vorgehäst verwendet. Beim Nassspritzverfahren wurde der Mörtel vorher vollständig angemischt, während beim Trockenspritzverfahren eine Trockenmischung aus Bindemittel und Gesteinskörnung hergestellt wurde, die dann am Düsenkopf mit Wasser und den Zusatzmitteln vermischt wurde.

Die untersuchten Mörtel ließen sich im Nassspritzverfahren gut fördern und verarbeiten. Dabei waren stabile Schichtdicken bis zu 10 cm in einem Arbeitsgang realisierbar. Die nass gespritzten Mörtel konnten über einen ausreichend langen Zeitraum abgerieben und geglättet werden. Eine Nachbehandlung der Oberfläche der trocken gespritzten Mörtel war nicht möglich bzw. ist i.d.R. auch nicht üblich. Beim Trockenspritzverfahren war die Förderwilligkeit der Mörtel mit 2 mm Größtkorn nicht ausreichend. Es kam zu Entmischungen bzw. zum Pulsieren des Förderstromes.

An den Putzflächen der nass gespritzten Mörtel mit vorgehästeter Gesteinskörnung wurden schon kurze Zeit nach der Fertigstellung starke Schwindrisse sichtbar. Die übrigen Mörtel wiesen erst nach einigen Wochen feine Risse auf.

Bei den Mörteln mit 8 mm Größtkorn konnte ein Kornabrieb beim Mischen sowie beim Spritzen beobachtet werden. Der Abrieb war beim Trockenspritzverfahren höher als beim Nassspritzverfahren.

Die maschinelle Verarbeitung führte zu einer starken Verdichtung der Mörtel. Somit wiesen die gespritzten Mörtel eine höhere Trockenrohddichte auf als die durch Rütteln verdichteten Mörtel. Im Vergleich zu den Mörteln mit vorgehästeter Gesteinskörnung erzielten die Mörtel mit trockener Gesteinskörnung niedrigere Trockenrohddichten.

## 5.3 Zusammenfassung

In der Machbarkeitsstudie zur Verwendung von Porenbetonrezyklaten (Vorhaben AiF 11764 N) konnten erfolgreich Mörtel mit Porenbetonrezyklaten hergestellt werden, die manuell mit der Kelle und sogar maschinell im Trocken- und Nassspritzverfahren verarbeitbar waren. In Abhängigkeit der Rezepturparameter stellten sich am Festmörtel Trockenrohddichten zwischen 0,7 und 1,3 kg/dm<sup>3</sup> und Druckfestigkeiten zwischen 0,5 und 20 N/mm<sup>2</sup> ein.

## **6 Eigenschaften von Mörteln mit Porenbetonrezyklaten**

### 6.1 Gesteinskörnung

Der Bauschuttzubereiter, von dem die Porenbetonrezyklate im Forschungsvorhaben AiF 11764 N bezogen wurden, hatte sich zwischenzeitlich aus dem Gebiet der Porenbetonzubereitung zurückgezogen. Ein äquivalenter Anbieter konnte kurzfristig

nicht gefunden werden. Daher wurden die benötigten Rezyklate zunächst aus Produktionsausschuss eines Porenbetonwerkes gewonnen. Zu einem späteren Zeitpunkt konnte rückgebauter Porenbeton beschafft werden, welcher ebenfalls zum Einsatz kam. Zerkleinert wurde das Material in einem Backenbrecher. Die eigens hergestellten Granulate entsprachen in ihren Eigenschaften nicht dem Recyclingmaterial, das im vorausgegangenen Projekt noch von der Recyclinganlage bezogen wurde. Die Änderungen in den Korneigenschaften bedingten, dass Versuche zur Zusammensetzung der Rezyklatmörtel wiederholt werden mussten. Die Korneigenschaften der aus Produktionsausschuss stammenden Granulate sind in der Tabelle 3 beschrieben.

Tabelle 3: Korneigenschaften der Porenbetonrezyklate aus Produktionsausschuss

Eigenschaft		Körnung	
		0/2	2/8
Kornrohddichte	[kg/dm <sup>3</sup> ]	1,10	0,78
Schüttdichte	[kg/dm <sup>3</sup> ]	0,54	0,25
Wasseraufnahme nach 10 Minuten	[M.-%]	48,8	58,0
Wasseraufnahme nach 24 Stunden	[M.-%]	52,4	65,0
Sulfatgehalt	[%]	1,7	2,1

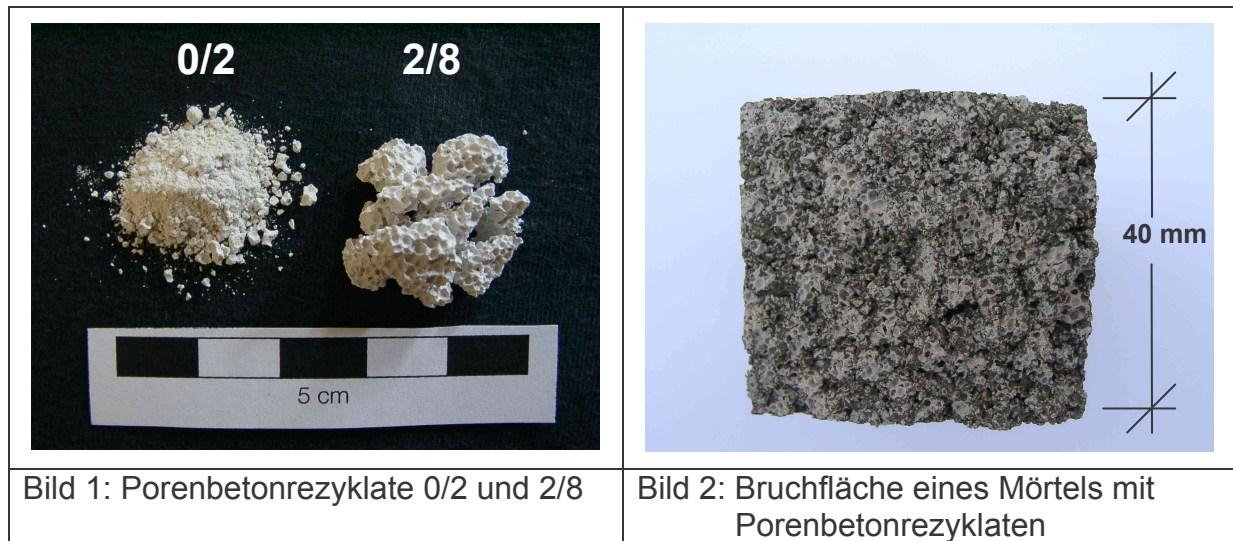
## 6.2 Mörtel

### 6.2.1 Allgemeines

Das Größtkorn der verwendeten Granulate wurde zwischen 2 und 8 mm variiert. Die Ergebnisse des vorausgegangenen Projektes hatten gezeigt, dass bei Körnungen mit 8 mm Größtkorn ein gewisser Anteil an Feinsand unverzichtbar ist, um verarbeitungsfähige Mörtel zu erhalten. Ein Verhältnis von 30 V.-% Feinsand und 70 V.-% Splitt erwies sich für die nunmehr vorliegenden Granulate als vorteilhaft, um eine gute Verarbeitbarkeit der Mörtel zu gewährleisten. Die Porenbetonrezyklate wurden vorgegast und mit verschiedenen Bindemitteln in 1:3 Raumteilen vermischt. Der Wassergehalt wurde so gewählt, dass sich Mörtel mit plastischer und Mörtel mit erdfeuchter Konsistenz einstellen. Neben Mörteln ohne Zusätze wurden Mörtel mit Zusätzen untersucht. Als Bindemittel wurden ein Gemisch aus Hochhydraulischem Kalk und Zement, ein Gemisch aus Zement und Weißkalkhydrat, ein Putz- und Mauerbinder und ein Maschinenputzgips verwendet. Um einem möglichen Sulfatreiben der Mörtel entgegen zu wirken, wurde ein Zement CEM I 42,5 R/HS mit hohem Sulfatwiderstand eingesetzt. Damit auch der ungünstige Fall abgebildet wird, kam ein Weißzement CEM I 42,5 R mit hohem C<sub>3</sub>A-Gehalt zum Einsatz. Als Zusätze wurden Schaum, Steinkohlenflugasche und Kunststofffasern verwendet. Als Vergleichsmörtel wurden die Eigenschaften eines Mörtels mit Quarzsand untersucht. Die Mörtel wurden hauptsächlich in einem Labormörtelmischer angemischt. Die Mischzeit betrug drei Minuten. Bei größeren Mischmengen kamen ein Zwangsmischer bzw. ein Freifallmischer zum Einsatz. Die plastischen Mörtel wurden in der Regel durch Rütteln bzw. Stampfen verdichtet, während die erdfeuchten Mörtel in einer Druckpresse verdichtet wurden.

Am Frischmörtel wurden die Konsistenz, das Ansteifverhalten, die Frischmörtelrohddichte und das Wasserrückhaltevermögen ermittelt. Am Festmörtel wurden die Biegezugfestigkeit, die Druckfestigkeit, die Trockenrohddichte, die Wasseraufnahme, das Quell- und das Schwindverhalten geprüft. An ausgesuchten

Rezepturen wurden zusätzlich der E-Modul, die Wasserdampfdiffusion und die Wärmeleitfähigkeit untersucht.



### 6.2.2 Plastische Mörtel ohne Zusätze

Zunächst wurden plastischen Mörtel mit 2 und 8 mm Größtkorn ohne Zusätze hergestellt. Zwei typische Beispielrezepturen plastischer Porenbetonmörtel sind in der Tabelle 4 verzeichnet. Im Vergleich dazu ist die Rezeptur eines Mörtels mit normaler Gesteinskörnung dargestellt. In allen drei Rezepturen wurde ein Kalkzementgemisch, bestehend aus hochhydraulischem Kalk und Portlandzement, verwendet.

Tabelle 4: Beispielrezepturen plastischer Mörtel ohne Zusätze

Serienbezeichnung		Porenbetonmörtel		Normalmörtel
		0/2 KZ p	0/8 KZ p	0/2 KZ p
Gesteinskörnung	[kg/m <sup>3</sup> ]	594	487	1305
Vornässwasser	[kg/m <sup>3</sup> ]	275	254	0
Bindemittel	[kg/m <sup>3</sup> ]	366	478	280
Zugabewasser	[kg/m <sup>3</sup> ]	300	259	185
Gesamtwasser	[kg/m <sup>3</sup> ]	575	513	185
Effektiver Wasser/Bindemittelwert	[-]	0,82	0,54	0,66

Durch die Dosierung der Mörtelkomponenten in Raumteilen nahm bei den grobkörnigen Mörteln 0/8 die Zugabemasse der Gesteinskörnung im Vergleich zu den feinkörnigen Mörteln 0/2 ab und die Zugabemasse des Bindemittels zu. Die Mörtel 0/8 wiesen zudem niedrigere effektive Wasser/Bindemittelwerte auf.

Die Gesteinskörnung des Normalmörtels wurde nicht vorgeätzt. Die Zugabemasse der Gesteinskörnung war wesentlich höher und die Zugabemasse des Bindemittels niedriger als bei den Porenbetonmörteln. Im Vergleich zu den feinkörnigen Porenbetonmörteln 0/2 wies der Normalmörtel einen niedrigeren effektiven Wasser/Bindemittelwert auf.

Die Verarbeitbarkeit der plastischen Porenbetonmörtel 0/2 und 0/8 ohne Zusätze sowie des Vergleichsmörtels war gut. Die Mörtel mit Putz- und Mauerbinder sowie

mit Maschinenputzgips wiesen aber ein schnelles Ansteifverhalten auf. Die Eigenschaften der o.g. Beispielmörtel sind in der Tabelle 4 verzeichnet.

Das Wasserrückhaltevermögen (WRV) der Porenbetonmörtel lag i.d.R. zwischen 80 und 85 M.-%. Das WRV der Mörtel mit Maschinenputzgips betrug ca. 98 M.-%. Der Vergleichsmörtel mit Quarzsand wies mit 72 M.-% ein niedriges WRV auf.

Die Trockenrohddichte der plastischen Porenbetonmörtel 0/2 und 0/8 ohne Zusätze betrug je nach verwendetem Bindemittel 0,7 bis 1,1 kg/dm<sup>3</sup>. Der Vergleichsmörtel wies mit 1,6 kg/dm<sup>3</sup> eine deutlich höhere Trockenrohddichte auf. Die Trockenrohddichte der Porenbetonmörtel konnte durch die Verwendung der leichteren Splittkörnung nicht gesenkt werden, da die Bindemittelmenge aufgrund der Dosierung der Mörtelkomponenten in Raumteilen erhöht wurde. Trotz niedrigerer Trockenrohddichten der Porenbetonmörtel waren ihre Festigkeitswerte mit denen des Normalmörtels vergleichbar und z. T. sogar höher. Die Biegezugfestigkeit der Porenbetonmörtel betrug i.d.R. 2 bis 4 N/mm<sup>2</sup> und ihre Druckfestigkeit 4 bis 18 N/mm<sup>2</sup>. Der Normalmörtel wies eine Biegezugfestigkeit von 3,1 N/mm<sup>2</sup> und eine Druckfestigkeit von 11,2 N/mm<sup>2</sup> auf. Der E-Modul der plastischen Porenbetonmörtel ohne Zusätze war mit 2.000 bis 4.200 N/mm<sup>2</sup> deutlich niedriger als der E-Modul des Normalmörtels mit fast 10.000 N/mm<sup>2</sup>. Nach 90 Tagen Lagerung im Normalklima bei 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte wiesen die Porenbetonmörtel i.d.R. Schwindmaße von -1,5 bis -1,9 mm/m auf. Nach 90 Tagen Lagerung im Feuchtklima bei 20 °C und mehr als 95 % rel. Luftfeuchte wiesen die untersuchten Mörtel lediglich Quellmaße von maximal 0,2 mm/m auf. Der Wasseraufnahmekoeffizient der plastischen Porenbetonmörtel ohne Zusätze betrug 5 bis 15 kg/(m<sup>2</sup>·h<sup>0,5</sup>), wobei die Wasseraufnahme der grobporigen Mörtel 0/8 niedriger war als die der feinkörnigen Mörtel 0/2. Der Vergleichsmörtel mit normaler Gesteinskörnung wies einen Wasseraufnahmekoeffizienten von 2 kg/(m<sup>2</sup>·h<sup>0,5</sup>) auf. Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl der Porenbetonmörtel betrug 6 bis 9, die des Normalmörtels 12, d.h. die Porenbetonmörtel wiesen eine höhere Durchlässigkeit für Wasserdampf auf. Die Wärmeleitfähigkeit der plastischen Porenbetonmörtel ohne Zusätze war mit 0,27 bis 0,34 W/(m·K) deutlich niedriger als die Wärmeleitfähigkeit des Normalmörtels mit 0,78 W/(m·K).

Die Ergebnisse zeigten, dass die entwickelten Porenbetonmörtel ohne Zusätze als Verfüllmörtel eingesetzt werden können. Eine Vielzahl der Mörtel erfüllte zudem die Anforderungen an Putzmörtel nach DIN 18550 Teil 2 [4], an Grundputze in Sanierputzsystemen gemäß WTA-Merkblatt Sanierputzsysteme [9] sowie an normale Mauer- und den leichten Mauer- und Putzmörtel LM36 nach DIN 1053 Teil 1 [5].

Tabelle 5: Eigenschaften plastischer Mörtel ohne Zusätze

Serienbezeichnung		Porenbetonmörtel		Normalmörtel
		0/2 KZ p	0/8 KZ p	0/2 KZ p
Wasserrückhaltevermögen	[M.-%]	82	81	72
Trockenrohddichte	[kg/dm <sup>3</sup> ]	0,98	1,01	1,63
Biegezugfestigkeit	[N/mm <sup>2</sup> ]	2,7	2,6	3,1
Druckfestigkeit	[N/mm <sup>2</sup> ]	11,3	17,9	11,2
Elastizitätsmodul	[N/mm <sup>2</sup> ]	3900	4200	9700
Schwindmaß nach 90 d im Normalklima	[mm/m]	-1,9	-1,9	-1,0
Quellmaß nach 90 d im Feuchtklima	[mm/m]	0,1	0,2	0,0
Wasseraufnahmekoeffizient	[kg/(m <sup>2</sup> ·h <sup>0,5</sup> )]	10	5	2
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	8	9	12
Wärmeleitfähigkeit	[W/(m·K)]	0,34	0,31	0,78

Beim Anmischen der Mörtel im Labormörtelmischer konnte beobachtet werden, dass es bei den grobkörnigen Mörteln 0/8 zu einer Kornzertrümmerung kam. Zwischen dem Rührstab und dem Mischtrog des Mörtelmischers ist ein Abstand von ca. 3 mm vorhanden. Porenbetonkörner, die in diesen Spalt gelangten, wurden aufgrund ihrer geringen Kornfestigkeit zertrümmert. Im Vergleich zum Labormörtelmischer ging der Zwangsmischer sanfter mit dem Korn um. Der Zwangsmischer war aber nur bei größeren Mörtelmischungen verwendbar. Bei der Verwendung des Freifallmischers wurde das Korn nicht geschädigt. Mit diesem Mischer wurde aber keine gute Durchmischung der Komponenten erzielt.

Zur Vermeidung der Kornzertrümmerung im Labormörtelmischer wurden Mörtel hergestellt, bei denen die Splittkörnung 2/8 mm erst nach dem eigentlichen Mischvorgang manuell mit dem Löffel eingerührt wurde. Die Verarbeitbarkeit dieser Mörtel war jedoch schlecht. Zudem konnte die Trockenrohddichte durch die geänderte Herstellungsweise nicht wesentlich gesenkt werden und die Festigkeit der Mörtel nahm ab. Die Ergebnisse zeigten, dass die Kornzertrümmerung beim Mischen der Mörtel 0/8 durchaus positive Auswirkungen auf deren Verarbeitungseigenschaften hat. Entsprechende Mörtel erfüllten zwar die Anforderungen an Putz- und Mauermörtel, sind aber aufgrund ihrer schlechten Verarbeitbarkeit für den Einsatz als solche nicht geeignet.

### *6.2.3 Erdfeuchte Mörtel ohne Zusätze*

Nachdem bei den plastischen Mörteln verschiedene Bindemittel zum Einsatz kamen, wurde in den folgenden Untersuchungen der erdfeuchten Mörtel ohne Zusätze sowie der plastischen und erdfeuchten Mörtel mit Zusätzen nur noch das Gemisch aus hochhydraulischem Kalk und Portlandzement verwendet.

Die Konsistenz der erdfeuchten Porenbetonmörtel ohne Zusätze war rieselfähig. Mit fortschreitender Zeit steiften die Mörtel nicht wie bei den plastischen Mörteln an, sondern sie wurden weicher. Der effektive Wasser/Bindemittelwert dieser Mörtel betrug 0,3 bis 0,4. Da die niedrige Zugabewassermenge weitestgehend vom Bindemittel gebunden wurde, wiesen die Mörtel ein hohes Wasserrückhaltevermögen von ca. 97 M.-% auf.

Die erdfeuchten Mörtel wurden in einer Druckpresse mit 3,1 N/mm<sup>2</sup> Pressdruck verdichtet. Die Trockenrohddichte dieser Mörtel war um 0,05 kg/dm<sup>3</sup> höher als die der plastischen Mörtel. Sie wiesen aber niedrigere Festigkeiten sowie niedrigere E-Moduln auf. Die Wasseraufnahme der erdfeuchten Mörtel war im Vergleich zu den plastischen Mörteln höher. Eine Verwendung dieser Mörtel als Verfüllmörtel ist möglich.

### *6.2.3 Plastische und erdfeuchte Mörtel mit Zusätzen*

Um Luftporen in die Matrix einzuführen und dadurch die Trockenrohddichte sowie die Wärmeleitfähigkeit weiter zu senken, wurde separat erzeugter Schaum in die plastischen Mörtel eingemischt. Die Verarbeitbarkeit dieser Mörtel war sehr gut. Sie zeichneten sich durch ein hohes Maß an Geschmeidigkeit und einen guten inneren Zusammenhalt aus. Die Trockenrohddichte wurde durch die Verwendung von ca. 160 l/m<sup>3</sup> Schaum um 0,24 kg/dm<sup>3</sup> und die Wärmeleitfähigkeit um ca. 0,07 W/(m·K) deutlich gesenkt. Die Schaummörtel wiesen zudem ansprechende

Festigkeitswerte auf. Die Biegezugfestigkeit betrug ca.  $1 \text{ N/mm}^2$  und die Druckfestigkeit ca.  $2,5 \text{ N/mm}^2$ . Der E-Modul der Schaummörtel lag zwischen  $1400$  und  $1700 \text{ N/mm}^2$ . Zudem wurde die Wasseraufnahme gesenkt und die Wasserdampfdurchlässigkeit erhöht. Die im Vorhaben entwickelten Schaummörtel können als Verfüllmörtel bzw. in Putzschichten eingesetzt werden.

Zur Einsparung von Bindemittel wurden 20 Vol.-% des Bindemittels durch Steinkohlenflugasche ersetzt. Durch diese Änderung der Rezeptur konnte kein Einfluss auf die Verarbeitbarkeit beobachtet werden. Die Festigkeiten der Mörtel wurden nur geringfügig gesenkt. Die ermittelten Eigenschaften der Mörtel mit Flugasche entsprachen in etwa denen der Mörtel ohne Flugasche. Somit ist eine Verwendung dieser Mörtel als Verfüll-, Putz- sowie Mauermörtel möglich.

Durch den Einsatz von Polyacrylnitril-Kurzschnittfasern mit einer Schnittlänge von  $4 \text{ mm}$  und einer Faserstärke von  $17 \text{ dtex}$  (ca.  $43 \mu\text{m}$ ) wurden weder die Festigkeiten der Mörtel erhöht noch deren Schwindmaße gesenkt. Diagramm 1 zeigt das Spannungs-Durchbiegungs-Diagramm von 28 Tage alten Prismen ( $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ ) mit und ohne Fasern: Die Prismen wurden mittig über eine Stützweite von  $120 \text{ mm}$  mit  $0,0005 \text{ mm/s}$  über den Bruch hinaus belastet. Es ist zu erkennen, dass der unbewehrte Mörtel nach dem Bruch keine weiteren Kräfte mehr aufnimmt und die Probe versagt. Der Fasermörtel nimmt hingegen nach dem Ausbilden eines Risses weiterhin Kräfte auf. Die Fasermörtel sind für eine Verwendung als Putzmörtel geeignet. Eine bessere Abstimmung von Zusatzmitteln und die Wahl anderer Fasergeometrien lässt aber noch günstigere Mörtel Eigenschaften erwarten.

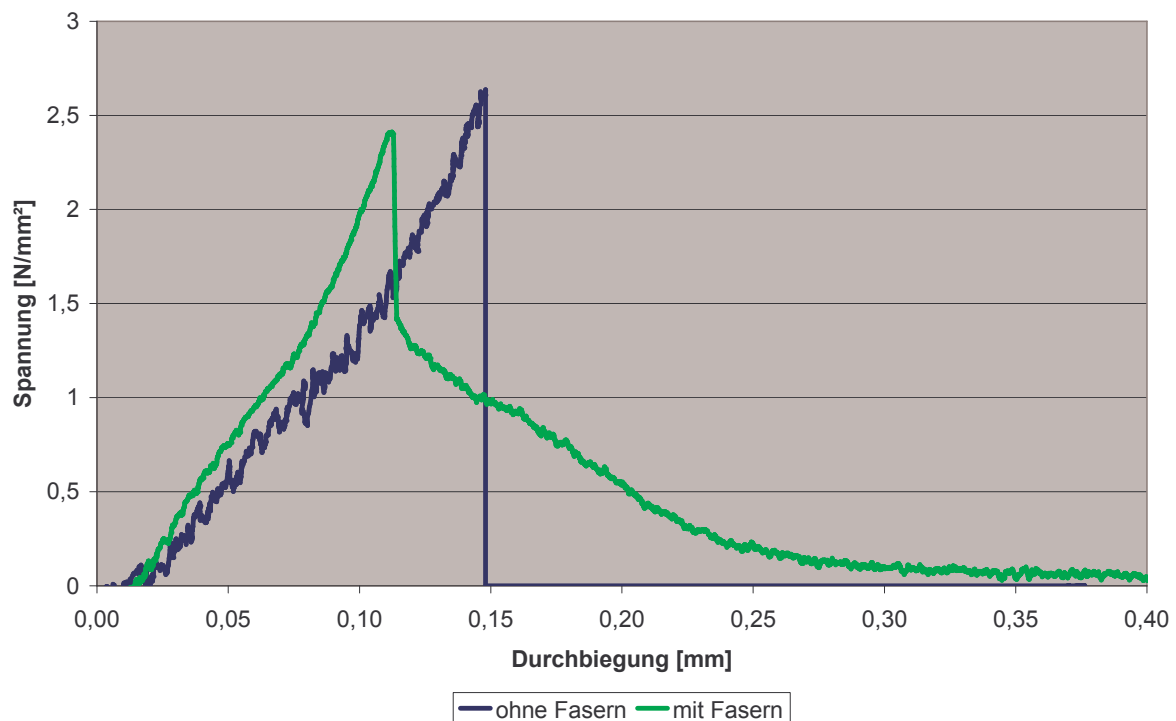


Diagramm 1: Spannungs-Durchbiegungs-Diagramm von Porenbetonmörteln mit und ohne Fasern

### 6.3 Zusammenfassung

Mit Porenbetonrezyklaten konnten Mörtel mit niedrigen Trockenrohdichten, hoher Festigkeit, niedrigem E-Modul, hoher Wasserdampfdurchlässigkeit sowie hoher Wärmedämmung entwickelt werden, die als Verfüllmörtel, Putzmörtel (insbesondere als Grundputz in einem Salzsauerputzsystem) und als Mauermörtel verwendet werden können.

### 7. Hinweis auf Förderung der Vorhaben und Verfügbarkeit der Schlussberichte

Die Forschungsvorhaben AiF 11764 N und AiF 13994 N wurden aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvorhaben „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) gefördert. Die Schlussberichte beider Vorhaben werden von der Forschungsvereinigung Recycling und Wertstoffverwertung im Bauwesen e.V. (RWB) der interessierten Öffentlichkeit der Bundesrepublik Deutschland gegen einen geringen Unkostenbeitrag zur Verfügung gestellt.

### 8. Literaturverzeichnis

- [1] Aycil, H.; Kropp, J.: Werk trockenmörtel mit Porenbetonrezyklaten aus der Bauschutttaufbereitung, Schlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben 13994 N. 11/2006
- [2] Deutsche Gemeinschaft für Mauerwerksbau e.V. (DGfM), Angaben der Mitglieder: Absatzmengen der Mauersteinhersteller im Jahr 1996-2005 (<http://www.dgfm.de>)
- [3] Diedrich, R.; Brauch, A.; Kropp, J.: Werk trockenmörtel mit Porenbetongranulaten aus der Bauschutttaufbereitung, Schlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben 11764 N. 12/2001
- [4] DIN 18550-2: Putz – Putze aus Mörteln mit mineralischen Bindemitteln. 1985
- [5] DIN 1053-1: Mauerwerk – Teil 1: Berechnung und Ausführung. 1996
- [6] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz KrW-/AbfG). 1994
- [7] Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau: TL-Min StB 2000. 2000
- [8] Weber, H.; Hullmann, H.: Porenbeton Handbuch, 4. Auflage. 1999
- [9] WTA-Merkblatt 2-2-91: Sanierputzsysteme. 1991