

Forschung zum Betonrecycling:

# Überschusssande als Zusatz im Beton

**Die Entstehung von Brechsanden ist eine unvermeidliche Begleiterscheinung bei der Aufbereitung von Betonbruch zu rezyklierten Gesteinskörnungen. Die Verwertung dieser Brechsande als feine Gesteinskörnung für die Betonherstellung ist nach den gültigen Vorschriften [1] nicht zulässig. Unsere Autoren forschen am IAB – Institut für Angewandte Bauforschung Weimar – und zeigen neue Verwertungswege auf.**

Eine Variante der Verwertung könnte darin bestehen, die Brechsande nach einer Mahlung zu feinputikulären Mehlen als Zementsubstitut bzw. als Zusatzstoff im Beton einzusetzen. Im Folgenden soll über experimentelle Untersuchungen berichtet werden, die diese Verwertungsvarianten zum Inhalt hatten.

Zur Verwertung von Betonbrechsanden in Mörteln und Betonen gibt es vergleichsweise wenige Untersuchungen. Dabei wurde in der Regel die Wirkung eines teilweisen Zementersatzes durch Altbetonmehl auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften untersucht. Die Gemeinsamkeit der Untersuchungen ist, dass ein Teil des Zements durch Altbetonmehl ausgetauscht wurde, ohne den Wasserzementwert anzupassen. Übereinstimmend wurde in den Untersuchungen ein Rückgang der Festigkeit in Abhängigkeit von der ausgetauschten Menge festgestellt [2], [3], [5]. Ausführliche Untersuchungen zum Einfluss der Mahlfineinheit sowie eine Gegenüberstellung der Wirkung von Beton-

mehlen aus Labor- und Praxisbetonen wurden von Heinz und Schubert vorgenommen [4]. Es zeigt sich, dass die Festigkeiten mit abnehmender Partikelgröße nur wenig zunehmen. Nur bei Substitution des Zementes mit den feinsten Mehlen mit Partikelgrößen von  $x_{90} \leq 10 \mu\text{m}$  wird die nach einem „Verdünnungsansatz“ berechnete Festigkeit erreicht. Systematische Unterschiede zwischen den Mehlen aus Praxisbetonen bzw. Laborbetonen wurden nicht festgestellt. Aus den Literaturergebnissen lässt sich folgern, dass sich die Altbetonmehle inert verhalten. Das schließt nicht aus, dass Altbetonmehle bei Anpassung des Wasserzementwertes als Zusatzstoffe eingesetzt werden können. Im Folgenden soll zunächst über eigene Untersuchungen zu den Auswirkungen einer Zementsubstitution durch Altbetonmehle unterschiedlicher Herkunft berichtet werden. Des Weiteren werden Ergebnisse dargestellt, bei denen die Mehle nicht als Zementsubstitut, sondern unter der Bezeichnung „Additions-

Produkt	Ausgangsmaterial	eingesetzte Mühlen
→ Betonmehle AB 1 und AB 2	Sande, hergestellt aus den Betonen B 15 und B 35	Laborkugelmühle in Chargen zu je 600 g unter Zugabe von Mahlhilfsmitteln Erzeugung unterschiedlicher Mahlfineinheiten durch Variation der Mahldauer zwischen 0 und 480 min
→ Betonmehle AB 3 und AB 4	2 Körnungen, hergestellt aus Rückständen der Betonwarenproduktion	Kreislaufmahl- Anlage mit Durchsätzen zwischen 3 und 40 kg/h Erzeugung unterschiedlicher Mahlfineinheiten durch Variation der Drehzahl des Kanalradsichters zwischen 1.500 und 10.000 U/min
→ Betonmehle AB 5 und AB 6	2 Rezyklate, hergestellt in einem Recyclingunternehmen aus Betonbruch	Kreislaufmahl- Anlage, Sichterraddrehzahl 1200 U/min, keine Variation

Tabelle 1: Für die Herstellung der Mehle eingesetzte Mahlanlagen.

Abbildungen und Tabellen: Autoren

binder“ als Zusatzstoff im Beton eingesetzt wurden.

## Überblick über Material und Methoden

Die verwendeten Betonbrechsande wurden aus bereits länger gelagerten, definierten Betonen B 15 und B 35 (AB 1 und AB 2) und aus aktuellen Rückständen der Produktion von Betonelementen (AB 3 und AB 4) hergestellt. Zusätzlich wurden zwei rezyklierte Gesteinskörnungen 0/45 mm aus aufbereitetem Betonbruch von einem Recycling-Unternehmen einbezogen (AB 5 und AB 6).

Die Vorgehensweise bei der Herstellung der Betonmehle ist in Tabelle 1 zusammengefasst. Bei den Betonen B 15 und B 35 erfolgte zunächst eine Grobzerkleinerung im Laborbackenbrecher, an die sich eine Vibrationssiebung anschloss. Danach wurden die erzeugten Sande < 4 mm in einer

Laborkugelmühle gemahlen. Bei den Rückständen aus der Beton-elementeproduktion und bei den rezyklierten Gesteinskörnungen wurde das Gesamtmaterial mit Korngrößen bis 45 mm nach der Vorzerkleinerung einer Kreislauf-Mahlanlage aufgegeben, die mit einer Kugelmühle und einem Kanalradsichter ausgerüstet ist. Für die Vermahlung mittels Kreislauf-Mahlanlage erfolgte keine vorherige Abtrennung der Sandfraktion. Zusätzlich zu den Betonbrechsanden wurden ein Quarzsand und ein Korund auf unterschiedliche Feinheiten gemahlen und in die Untersuchungen einbezogen. Bei dem Quarzsand handelte es sich um Normsand, der für die Herstellung von Normmörtelprismen eingesetzt wird. Der Korund war ein handelsübliches Produkt. Die Mahlung auf unterschiedliche Feinheiten erfolgte mit der Laborkugelmühle. Im Anschluss an die Mahlung wurden die Partikelgrößen



Schachtunterteil aus Referenzbeton



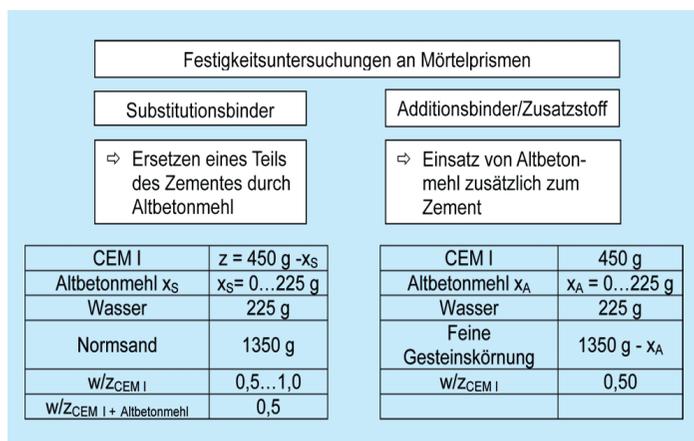


Bild 1: Vorgehensweise bei den Mörteluntersuchungen zur Verwertung der Betonmehle

senverteilungen der Mehle mit Hilfe der Laserbeugungsanalyse mit dem Coulter LS 230 in den Bereichen 0,04/0,4 µm und 0,4/2'000 µm bestimmt. Die chemische Zusammensetzung wurde mittels induktionsgekoppelter Plasmamassenspektrometrie (ICP/OES) bzw. ICP-Emissionsspektrometrie nach Totalaufschluss gemessen. Die Ermittlung der mineralogischen Zusammensetzung bzw. der Kristallinität erfolgte mit Hilfe der Röntgendiffraktometrie. An ausgewählten Proben wurde ausserdem die hydraulische Aktivität mit Hilfe der Differentialkalorimetrie ermittelt. Die Festigkeitsuntersuchungen zur Eignung der feinpartikulären Stoffe als Zementersatz oder Zusatzstoff zum Beton wurden an Mörtelprismen durchgeführt. Dabei wurde wie folgt vorgegangen: Bei dem Einsatz der Mehle als Zementersatz wurde ein Teil des Zementes durch das Mineral-

mehl ersetzt. Die zugegebene Wassermenge wurde nicht angepasst, so dass sich der Wasserzementwert mit zunehmender Substitution erhöhte. Diese Vorgehensweise lehnt sich an die Bestimmung des 'Aktivitätsindex' [6] an. Dieser gibt das Verhältnis der Druckfestigkeiten an, die im gleichen Alter an Mörtelprismen gemessen werden, die einerseits Mischungen aus Portlandzement und Substitut sind und andererseits unverdünnten Prüfzement als Bindemittel enthalten. Wurden die Mehle als Zusatzstoff eingesetzt, wurde das Mineralmehl zu Lasten der feinen Gesteinskörnung zugegeben. Der Zementgehalt und der Wasserzementwert wurden nicht verändert. Die Vorgehensweise bei den Untersuchungen ist im Bild 1 dargestellt. Die Verarbeitbarkeit der verschiedenen Mischungen wurde – sofern erforderlich – durch die Zugabe von Fließmitteln so eingestellt, dass mit einem Ausbreit-

	AB 1	AB 2	AB 3	AB 4	AB 5	AB 6
Herkunft	Beton B 15	Beton B 35	Betonelemente- produktion		Aufbereiteter Betonbruch von einer RC-Anlage	
Gehalt [%]						
SiO <sub>2</sub>	75,1	70,8	27,13	38,59	63,0	63,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,6	3,9	10,95	7,91	9,2	7,4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,2	2,1	4,88	6,24	3,8	3,5
CaO	11,2	14,0	37,62	30,04	10,4	12,2
TiO <sub>2</sub>	n.b.	n.b.	0,37	0,27	0,45	0,36
MgO	0,4	0,5	0,63	1,37	1,4	1,3
Na <sub>2</sub> O	0,13	0,13	1,46	1,79	1,23	1,01
K <sub>2</sub> O	0,95	0,99	2,93	4,21	2,02	1,89
SO <sub>3</sub>	n.b.	n.b.	1,83	0,72	0,76	0,76
Cl	n.b.	n.b.	0,03	0,04	n.b.	n.b.
Glühverlust	6,9	7,8	11,76	8,32	7,9	7,4

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung der Betonmehle

	AB 1	AB 2	AB 3	AB 4	AB 5	AB 6
Herkunft	Beton B 15	Beton B 35	Betonelemente- produktion		Aufbereiteter Betonbruch einer RC-Anlage	
Dichten [g/cm <sup>3</sup> ]						
Reindichte	2,687	2,688	2,656	2,705	2,62	
Rohdichte	2,248	2,108				
Mittlere Partikelgröße im Ausgangszustand [µm]						
	614,3	533,8	938,4	706,1	3150	
Untersuchter Bereich der mittleren Partikelgrößen nach der Mahlung [µm]						
Min	9,3	11,8	2,0	2,0	21,9	
Max	243,2	185,3	22,0	21,0		
Für die Mörtelherstellung verwendete Zemente und deren mittlere Partikelgröße [µm]						
	CEM I 32,5 R 21,2		CEM I 52,5R HS/NA 11,2		CEM I 52,5 R-ft 10,0	

Tabelle 3: Dichten und granulometrische Parameter der Betonmehle und der verwendeten Zemente

mass von 128 mm eine plastische Konsistenz für alle Mörtelmischungen erreicht werden konnte. Eine Beeinflussung der Festigkeitsergebnisse durch unterschiedliche Frischmörtelkonsistenzen ist damit ausgeschlossen. Zur Herstellung der Mörtel kamen Portlandzemente zum Einsatz, die sich in ihrer Festigkeitsklasse unterschieden. Für die Untersuchungen mit den Altbetonmehlen 1 und 2 wurde ein CEM I 32,5 verwen-

det. Die Mehle 3,4,5 und 6 wurden zusammen mit einem CEM I 52,5 verarbeitet. Als Einflussgrößen bei den Mörteluntersuchungen wurden die substituierten bzw. addierten Mengen und die Feinheit der Mehle untersucht. Ausserdem wurde die Wirkung der in ihrer Herkunft unterschiedlichen Altbetonmehle gegenübergestellt. In Tabelle 2 ist die chemische Zusammensetzung der Ausgangsmaterialien dargestellt.



Schachtunterteil aus Beton mit 10% Zementeinsparung bei gleichzeitiger Zugabe von 15% Altbetonmehl. Fotos: IAB Weimar

### Charakterisierung der Materialeigenschaften

Die reinen Betonmehle AB 1 und AB 2 und die RC-Betonmehle AB 5 und AB 6 haben ähnliche Zusammensetzungen. Die Betonmehle aus der Betonelementproduktion AB 3 und AB 4 weisen dagegen deutlich geringere SiO<sub>2</sub>-Gehalte und höhere CaO-Gehalte auf. Die Ursache dürfte darin liegen, dass die Ausgangsbetone für diese Mehle auch Gesteinskörnungen aus Kalkstein enthielten. Die mittleren Partikelgrößen der Sande vor der Mahlung und der erzeugten Mehle sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Für die reinen Mehle ist unabhängig von ihrer Feinheit keine Wärmeentwicklung nachweisbar. Die Wärmeentwicklung der untersuchten Mischung aus 30 Masse-% Altbetonmehl und 70 Masse-% Zement ist geringer als die des reinen Zements und stimmt in etwa mit den Messwerten für die Mischung aus Quarzsandmehl und Zement überein. Daraus kann geschlossen werden, dass das Altbetonmehl sich nicht an der Hydratation beteiligt und somit kein Reaktionspotenzial aufweist.

### Entwicklung der Festigkeit bei Substitution

Hinsichtlich des Einflusses des Anteils an Altbeton, der als Zementsubstitut eingesetzt wurde, auf die Mörtelfestigkeit nach 28 Tagen wurde festgestellt, dass die Festigkeiten in etwa linear mit der Zunahme der substituierten Zementmenge abnehmen. Für die Abnahme der Festigkeit mit zunehmendem Zementersatz können zwei Ansätze formuliert werden: Verdünnungsansatz: Die Festigkeit ist der im Mörtel enthaltenen Portlandzementmenge proportional. Für die bezogene Festigkeit gilt somit

$$\beta/\beta_0 = 1 - x_s/z_0 \quad [-]$$

Dabei sind

$\beta_0$ : Festigkeit der Mörtelprismen mit der Ausgangszementmenge  $z_0$  ohne Substitution.

$\beta$ : Festigkeit der Mörtelprismen mit der um die Altbetonmehlmengen  $x_s$  verringerten Zementmenge.

$x_s/z_0$ : Als Substitut eingesetzte Altbetonmenge bezogen auf die Ausgangszementmenge in kg Altbetonmehl/kg CEM I.

Wasserzementwertansatz: Die Festigkeit ist dem Wasserzementwert umgekehrt proportional. Für die bezogene Festigkeit können anhand von Literaturangaben unterschiedliche Beziehungen abgeleitet werden. Aus den von Wesche [7] angegebenen Werten für die relative Festigkeit von Zementstein folgt

$$\beta/\beta_0 = 9,025^{[(w/z)_0 - (w/z)]}$$

Aus den Koeffizienten für das Abrahamssche Wasserzementwert-Gesetz, die von Monteiro [8] angegeben werden, ergibt sich

$$\beta/\beta_0 = 11,03^{[(w/z)_0 - (w/z)]}$$

Dabei sind

$(w/z)_0$ : Ausgangswasserzementwert, für den sich die Festigkeit  $\beta_0$  ergibt.

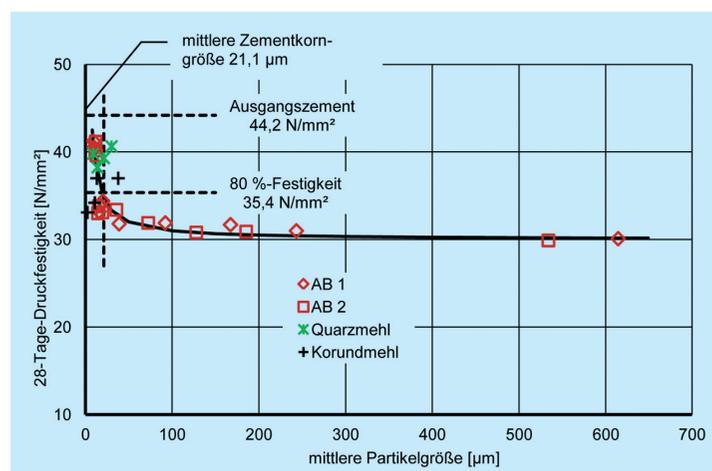
$w/z$ : Wasserzementwert, bei welchem die Festigkeit  $\beta$  gemessen wird.

Die nach dem Verdünnungsansatz berechneten bezogenen Druckfestigkeiten liegen etwas über den gemessenen Werten. Die nach den Wasserzementwertansätzen berechneten Werte liegen deutlich unter den Messwerten. Der Verdünnungsansatz erlaubt also eine näherungsweise Abschätzung der Festigkeitsreduktion bei Zugabe eines inerten Feinstoffes zu Lasten des Zements. Die Wasserzementwert-Ansätze weisen zu geringe Festigkeiten auf. Die Zunahme der Porosität infolge des steigenden Wasserzementwertes als eigentliche Ursache der Festigkeitsabnahme ist geringer als berechnet. Durch die geringere Partikelgröße und durch das grössere Volumen, welches das Altbetonmehl infolge seiner geringeren Dichte einnimmt, wird die Porositätszunahme bei Erhöhung des Wasserzementwertes scheinbar zumindest teilweise kompensiert. Der Einfluss der Feinheit des Altbetonmehls ist am Beispiel der Altbetonmehle AB 1 und AB 2, die aus den definierten Betonen B 15 und

B 35 hergestellt wurden und die den Zement zu einem Anteil von 20 Masse-% substituierten, in Bild 2 dargestellt. Die Festigkeit steigt mit abnehmender Partikelgröße nach einer hyperbolischen Funktion an. Bei Partikelgrößen > 100  $\mu\text{m}$  besteht ein geringer Einfluss der Feinheit der Betonmehle auf die Festigkeit. Bei Partikelgrößen < 100  $\mu\text{m}$  zeigt sich bereits ein stärkerer Einfluss. Bei Unterschreiten der Zementkorngröße wird die Festigkeit, die nach dem Verdünnungsansatz berechnet wurde, überschritten. Das Quarzmehl zeigt ein nahezu identisches Verhalten wie die Altbetonmehle. Die mit Korundmehl als Substitut hergestellten Mörtel weisen etwas geringere Festigkeiten als die Mörtel auf, die Beton- oder Quarzmehl enthielten. Die Herkunft der Altbetonmehle beeinflusst die erreichten Festigkeiten nur wenig. Bei einer Substitution von 20 Masse-% erreichten die mit den reinen Betonmehlen AB 1, AB 2, AB 3 und AB 4 hergestellten Mörtel bezogene Festigkeiten zwischen 0,7 und 0,78.

Die Mörtel mit den Mehlen AB 5 und AB 6, die aus dem Betonbruch eines Recyclingunternehmens hergestellt worden waren, weisen etwas günstigere Werte auf. Ursache können die Ziegelanteile in diesem Material sein. Um eine endgültige Aussage treffen zu können, wären Untersuchungen an

Bild 2: Einfluss der Feinheit der Altbetonmehle auf die Mörtel-druckfestigkeit bei Bindemittelmischungen aus 20 Masse-% Altbetonmehl und 80 Masse-% Portlandzement



einer grösseren Anzahl von Proben erforderlich.

### Entwicklung der Festigkeit bei Addition

Die Auswirkungen auf die Mörtel-eigenschaften, die sich bei einer Zugabe von Altbetonmehl zu Lasten der feinen Gesteinskörnung aber ohne Reduzierung des Zementgehaltes ergeben, wurden bisher nur an den Altbetonmehlen AB 3 und AB 4 untersucht. Die Fließmittelzugabe, die erforderlich war, um die Verarbeitbarkeit des Frischmörtels unabhängig von der zugegebenen Menge an Altbetonmehl konstant zu halten, betrug 0,1 bis 0,3 Masse-% bezogen auf die Zementmenge bei 10% Addition bzw. 0,6 bis 0,8 Masse-% bei 50% Addition.

In Bild 3 sind die Auswirkungen auf die Festigkeit in Abhängigkeit von der zugesetzten Altbetonmenge dargestellt. Es ergibt sich ein deutlicher Festigkeitsanstieg. Der Anstieg der Festigkeit kann empirisch mit der Gleichung

$$\beta/\beta_0 = 1,335 - 0,335 \cdot \exp[-0,06 \cdot x_A/z_0]$$

beschrieben werden.

Dabei sind

$\beta_0$ : Festigkeit der Mörtelprismen mit der Ausgangszementmenge ohne Addition.

$\beta$ : Festigkeit der Mörtelprismen mit der Addition einer Altbetonmenge von  $x_A$ .

$x_A/z_0$ : Addierte Menge Altbeton bezogen auf die Ausgangszementmenge in kg Altbetonmehl/kg CEM I.

Die Ursache des Anstiegs dürfte in der Zunahme der Packungs-

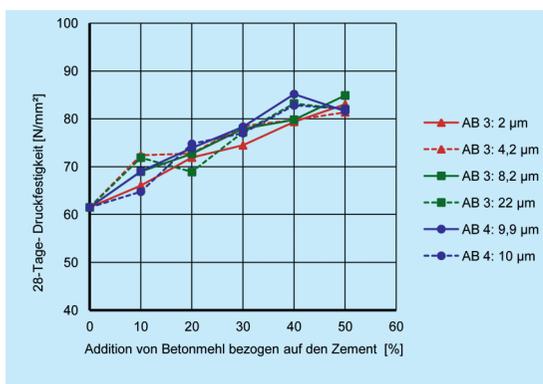


Bild 3: Einfluss der addierten Menge an Altbetonmehl auf die Druckfestigkeit der Mörtel

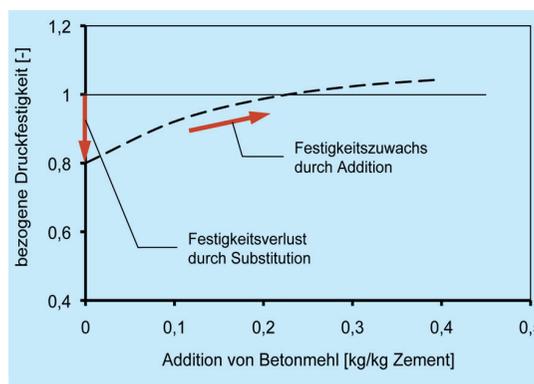


Bild 4: Schematische Darstellung zur Kombination von Substitution und Addition von Betonmehl als Möglichkeit der Zement-einsparung

dichte liegen, was aber nicht überprüft wurde. Somit hängt die gefundene Festigkeitszunahme von der Partikelgrößenverteilung des Zements, der Partikelgrößenverteilung der Gesteinskörnung und der Partikelgrößenverteilung des Altbetonmehls ab. Sie ändert sich, wenn sich diese Parameter ändern. Im Unterschied zu dem Festigkeitsabfall bei der Substitution des Zements durch zementfeine Betonmehle, der mit dem Verdünnungsansatz annähernd berechnet werden kann, müssen bei der Verwendung von Betonmehl als Betonzusatzstoff die erreichbaren Festigkeitszuwächse für jeden neuen Mischungsentwurf experimentell bestimmt werden.

### Altbetonmehle bei der Betonherstellung

Aus den Laborergebnissen kann ein Konzept der kombinierten Substitution und Addition entwickelt werden. Wie in Bild 4 schematisch dargestellt, nimmt die Festigkeit ab, wenn ein Teil des Zementes durch Altbetonmehl ersetzt wird. Wird mit diesem „verdünnten“ Zement Mörtel oder Beton hergestellt und dabei Betonmehl als Zusatzstoff zugegeben, folgt ein Festigkeitsanstieg. Damit kann die ursprüngliche Festigkeitsabnahme zumindest kompensiert werden.

Die Ergebnisse der Laborversuche wurden in Praxisversuchen überprüft, in denen Betonfertigteile unter Verwendung von Betonmehlen hergestellt wurden. Zielgrößen waren die Verarbeitbarkeit und die Festigkeit, die sich nicht von denen des Referenzbetons unterscheiden sollten. Besonderes Augenmerk lag darüber hinaus auf den Oberflächeneigenschaften, die

Sichtbetonqualität erreichen sollten.

Als Einflussgrößen wurden die Feinheit der zugegebenen Mehle, die substituierte Zementmenge und die Menge an addiertem Betonmehl variiert. Die in mehreren Rezepturschritten erzielten Resultate lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Im Interesse einer guten Verarbeitbarkeit ist das „grobe“ Betonmehl mit einer mittleren Partikelgröße von 22 µm zu bevorzugen. Die feiner aufgemahlene Mehle führen zu einem Anstieg des Wasseranspruchs, so dass der Wasserbindemittelwert erhöht werden muss, um eine gleichbleibende Konsistenz sicherzustellen.
- Die Zementsubstitution durch Betonmehl führt wie bei den Laborversuchen zu einem Festigkeitsrückgang.
- Bei einer Zugabe von bis zu 25 Masse-% Betonmehl waren Zementersparungen von 10 bis 12 Masse-% möglich, ohne das Eigenschaftsverhalten gegenüber dem Referenzbeton einzutreten.

Insgesamt konnten Schachtunterteile hergestellt werden, die in ihren optischen Eigenschaften mindestens der originalen Betonrezeptur entsprachen.

Für einige Rezepturen konnten teilweise Verbesserungen der Oberflächeneigenschaften gegenüber denen des Referenzbetons erreicht werden.

### Zusammenfassung und Ausblick

Untersuchungsgegenstand war der Einsatz von mehlfine gemahltem Betonbrechsand aus der Aufbereitung von Betonbruch für die Be-

tonherstellung. Dabei wurden zwei Ansätze verfolgt:

- Betonmehl als Zementsubstitut: Das Betonmehl beteiligt sich nicht an der Festigkeitsentwicklung. Eine Abschätzung der Festigkeitsabnahme ist anhand eines „Verdünnungsansatzes“ möglich, wenn die Partikelgröße des Altbetonmehles in etwa der des Zements entspricht.
- Betonmehl als Betonzusatzstoff: Eine Zunahme der Festigkeit wurde ermittelt, die vermutlich auf die Verbesserung der Packungsdichte durch die Addition des Mehles zurückzuführen ist.

Aus den Ergebnissen kann abgeleitet werden, dass eine Kombination von Substitution und Addition Zementersparungen ohne Festigkeitsverluste erlaubt. Dazu durchgeführte Praxisversuche bestätigten das Konzept der kombinierten Substitution und Addition. Es konnten tatsächlich Zementersparungen ohne Festigkeitsreduzierungen erreicht werden. In den beschriebenen Untersuchungen wurden die Mörtel und die Praxisbetone unter Verwendung natürlicher Gesteinskörnungen hergestellt.

Der Einsatz der Betonmehle in Betonen aus rezyklierten Gesteinskörnungen wurde in den beschriebenen Versuchsreihen nicht untersucht und sollte deshalb Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein.

**Prof. Dr.-Ing. habil. Anette Müller, Dipl.-Ing. Steffen Liebezeit, Dipl.-Ing. Alrik Badstübner, alle Autoren arbeiten am Institut für Angewandte Bauforschung gGmbH Weimar.**

### INFO

www.iab-weimar.de

### Literatur:

- [1] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb-Richtlinie – Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN 4226-100 – Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN 1045-1, Beuth-Verlag, Berlin 2004.
- [2] Montgomery 1998.
- [3] Kerkhoff, B.; Siebel, E.: Einfluss von rezykliertem Zuschlag aus Betonbruch auf die Eigenschaften, insbesondere die Dauerhaftigkeit von Beton. Beuth-Verlag, Berlin 2002.
- [4] Heinz, D.; Schubert, J.: Nachhaltige Verwertung von Betonbrechsand als Betonzusatzstoff. Abschlussbericht. TUM, Centrum Baustoffe und Materialprüfung, München 2006.
- [5] Yong Jic Kim, Yun Wang Choi: Utilization of waste concrete powder as a substitution material for cement. Construction and Building Materials. 30 (2012) 500–504.
- [6] Silikastaub für Beton – Teil 1: Definitionen, Anforderungen und Konformitätskriterien. Beuth Verlag GmbH, Berlin, April 2009.
- [7] Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile. Bauverlag, Wiesbaden und Berlin, 1993.
- [8] Monteiro, P.J.M.; Helene; P.R.L.; Kang; S.H.: Designing concrete mixtures for strength, elastic modulus and fracture energy. Materials and Structures, 26 (1993) 443–452.