

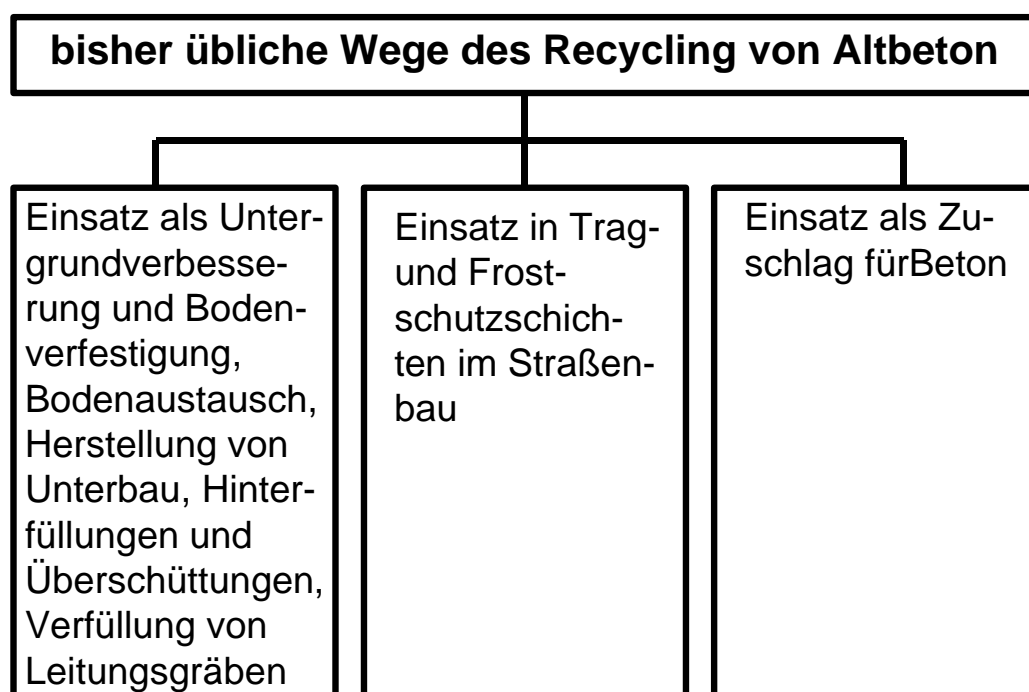
NEUE PERSPEKTIVEN ZUR VERWERTUNG VON RECYCLING-BETONSAND PRODUKTIDEEN UND ERSTE ERGEBNISSE

1 Einleitung

Die Bauwirtschaft erzeugt zur Zeit den größten Anteil am gesamten Abfallaufkommen der Bundesrepublik. Die Vermeidung sollte auch hier Vorrang vor der Verwertung bzw. Beseitigung haben, was jedoch nicht immer möglich ist.

Die anfallenden Baureststoffe enthalten Wertstoffe, deren Verwertung zur Schonung von Deponieraum und natürlichen Ressourcen führt. Heute werden bereits wenig verunreinigter Bauschutt, Baustellenabfälle und Straßenaufbruch verwertet. Recyclingbaustoffe werden im Tiefbau, Erd- und Landschaftsbau, im Straßenbau bis hin zum Hochbau eingesetzt [1].

Da in Zukunft durch umfangreiche Sanierungsmaßnahmen vor allem in den neuen Bundesländern z.B. durch den Rückbau von Neubausiedlungen bzw. die Erneuerung und den Ausbau von Straßen und Autobahnen große Mengen an Ausbaubeton zu erwarten sind, sollte der Aufbereitung dieser Stoffgruppe besondere Bedeutung geschenkt und weitere Verwertungsmöglichkeiten in Betracht gezogen werden.



Bei der ersten Möglichkeit werden geringe Anforderungen an die Aufbereitung und die bautechnischen Eigenschaften gestellt.

Bei der zweiten Möglichkeit wird zerkleinerter Altbeton als Bestandteil von hydraulisch gebundenen und ungebundenen Schichten im Straßenbau eingesetzt. Zu diesem Zweck wird in der Regel die gesamte Breite des beim Brechen entstehenden

Kornbandes genutzt. Der Vorteil dieses Einsatzgebietes besteht in dem verhältnismäßig geringen Aufwand und in der guten Eignung des Materials für diese Anwendung. Deshalb hat es sich bei der Erneuerung von Fahrbahndecken von Betonauto-bahnen bereits weitestgehend durchgesetzt. Für aufbereiteten Betonschutt aus dem Hochbau wird dieses Einsatzgebiet bisher weniger genutzt.

Bei der dritten Möglichkeit wird der zerkleinerte Altbeton als Zuschlag für neuen Beton eingesetzt. Besteht das Recycling-Material hierbei aus hochwertigem, ungeschädigten Beton, so sind die damit zu erzielenden Eigenschaften nahe denen eines mit natürlichen Zuschlägen hergestellten Betons. Problematisch ist jedoch die Sandfraktion, die auf Grund ihrer Eigenschaften zu einer Verschlechterung der Verarbeitbarkeit und einem stark erhöhten Schwindmaß beim neu hergestellten Beton führt. Aus diesem Grund wird in der Regel bei der Herstellung von Beton mit Recycling-Zuschlag die Kornfraktion 0/4 mm (in einigen Fällen auch 0/3 mm [3], 0/5 mm [4], 0/8 mm [5], [6] oder auch 0/12 mm [7]) durch Natursand ersetzt [8], [9], [10], was hinsichtlich der Eigenschaften des mit Sekundärzuschlägen hergestellten Betons zu guten Ergebnissen geführt hat.

Erfahrungen aus dem amerikanischen Straßenbau [11] zeigen aber auch, daß zumindest ein Teil der beim Brechen des Altbetons anfallenden Sande ohne nennenswerte Qualitätseinbußen zur Herstellung von Beton wiederverwertet werden kann. Die Richtlinie "Beton mit rezykliertem Zuschlag" des Deutschen Ausschuß für Stahlbeton schränkt den Anteil an Betonbrechsand 0/2 mm auf < 7 Vol.-% ein.

2 Inhalte des Forschungsthemas

Ziel des durch die DFG geförderten Forschungsthemas ist es, alternative Möglichkeiten zur Wiederverwertung von Recycling-Betonsand 0/4 mm zu entwickeln und im Labormaßstab zu erproben.

Wie bereits erwähnt beinhaltet das Projekt folgende vier Teilgebiete:



Als erste Verwertungsmöglichkeit soll die Reaktivierung des angereicherten Zementsteins zu einem hydraulischen Bindemittel erprobt werden. Diese Einsatzmöglichkeit geht von der Tatsache aus, daß es im Rahmen einer Diplomarbeit [12] und gegenwärtig laufenden Untersuchungen u.a. gelungen ist, den Zementstein verschiedener Zementtypen zu dehydratisieren und zu decarbonatisieren und dabei die wesentlichen Phasen des Ausgangszementes wieder herzustellen.

Der Ausgangspunkt für die Untersuchungen zur Nutzung als Sekundärbindemittel waren die Erfahrungen von Recyclingunternehmen, wonach bei gebrochenem Altbeton nach längerer Lagerung eine Verfestigung des Schüttgutes eintritt. Auch die Bemerkung, daß es nach frischem "Kalk" riecht, wenn gebrochener Altbeton naß wird, weist auf mögliche Reaktivitätspotentiale hin. Untersuchungen von Krass belegen diese Aussage wissenschaftlich [13]. Montgomery [14] beschäftigte sich ebenfalls mit der Wirkung eines teilweisen Zementersatzes durch Altbetonmehle. Bei einem Austausch von 33 Ma.-% des Zements durch aufgemahlene Altbeton stellte er einerseits eine Verbesserung der Verarbeitbarkeit andererseits aber eine Abnahme der 28-Tage-Festigkeit fest. Die Ergebnisse, der im Rahmen einer Diplomarbeit [15] durchgeführten Festigkeitsprüfungen nach 7, 28 und 90 Tagen, zeigten bei einem Austausch von 20 Ma.-% eine deutliche Festigkeitszunahme der Festmörtel mit zunehmender Feinheit des Zusatzstoffes. Ein weiterer Aspekt für die Untersuchungen war die bereits erwähnte Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton bei der Verwertung von aufbereitetem Altbeton als Zuschlag für Neubeton die Fraktion 0/2 mm nur eingeschränkt zu verwenden. Bei der Zerkleinerung von Altbeton ist die Entstehung eines Feinkornanteils jedoch unvermeidlich, für den adäquate Einsatzgebiete aufgezeigt werden müssen.

Die dritte Verwertungsmöglichkeit von Recycling-Betonsand ergibt sich aus dessen chemischer Analyse. Es zeigte sich, daß die chemische Zusammensetzung von Recycling-Betonsand aus Beton mit kieseligen Zuschlägen gewisse Ähnlichkeiten mit der von magmatischen Gesteinen aufweist, die zur Herstellung von mineralischen Dämmstoffen verwendet werden.

2.1 Erstellen der Eigenschaftsprofile

Für die geplanten Untersuchungen ist es zunächst notwendig, die verwendeten Materialien ausführlich hinsichtlich ihrer physikalischen, chemischen und mineralogischen Eigenschaften zu charakterisieren. Neben Betonabbruch wird im Labor hergestellter Zementstein und Mörtel einbezogen, um grundsätzliche Zusammenhänge besser erkennen zu können.

Die eingesetzten Zemente, ein Portlandzement und ein Hochofenzement wurden folgender Kennwertermittlung und Substanzanalyse unterzogen.

- Druck- und Biegezugfestigkeit
- Erstarrungsbeginn und-ende
- Raumbeständigkeit
- Wasseranspruch
- Dichte
- spezifische Oberfläche
- chemische Analyse
- Korngrößenanalyse

Die Charakterisierung des Recyclingmaterials Altbeton wurde am Ausgangszustand und an verschiedenen Kornfraktionen durchgeführt. Dazu gehören Korngrößenverteilung, Rein-, Roh- und Schüttdichte, Wasseraufnahme, Glühverlust und HCl-unlösliche Bestandteile.

Das Diagramm zeigt die Wasseraufnahme der Altbetone als Funktion der Kornfraktion. Die Wasseraufnahme der Materialien nimmt mit abnehmender Korngröße zu. Dies war u.a. die Ursache dafür, daß die Sandfraktion von Recycling-Betonen als Zuschlag für Beton weitestgehend ausgeklammert wird.

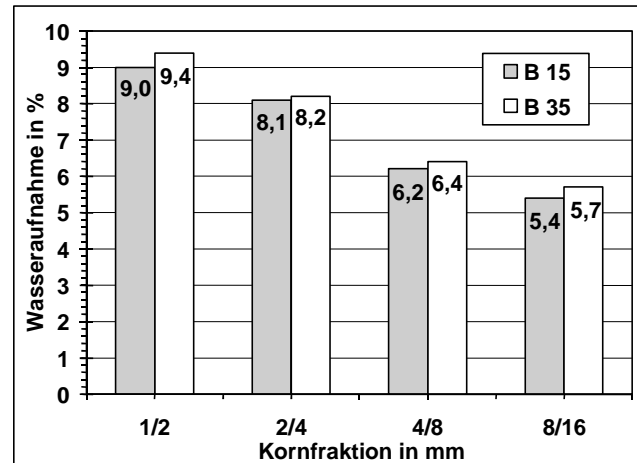
Weiterhin sollen in diesem ersten Abschnitt des Projektes, die stofflichen Veränderungen des Recycling-Betonsandes, der im Gegensatz zu Natursand kein inertes Material

ist, in Abhängigkeit von den Bedingungen und der Dauer der Lagerung untersucht werden. Aus der klassischen Betonforschung ist bekannt, daß die im Zementstein vorliegenden Hydrate thermodynamisch instabil sind. Aus ihrem Kalkanteil bildet sich mit dem CO_2 der Atmosphäre Calcit; aus ihrem SiO_2 -Anteil entsteht SiO_2 -Gel oder Quarz. In Betonbauwerken kommt es aus Gründen der Reaktionskinetik in der Regel nur zur Carbonatisierung des Portlandits ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) in der Oberflächenschicht. Durch die enorme Vergrößerung der Oberfläche bei der Aufbereitung ist aber eine Carbonatisierung aller Bestandteile nicht ausgeschlossen, woraus sich Konsequenzen für die Wiederverwertung ergeben können.

Um dieser Fragestellung nachzugehen, laufen gegenwärtig Untersuchungen, bei denen Labormörtel- und Zementsteinvariationen unter unterschiedlichen Bedingungen, d.h.

- carbonatisierungshemmend ($\text{CO}_2 < 0,03\%$)
- Freiluft ($\text{CO}_2 = 0,03\%$)
- carbonatisierungsfördernd ($\text{CO}_2 > 0,03\%$)

gelagert werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen stehen noch aus.

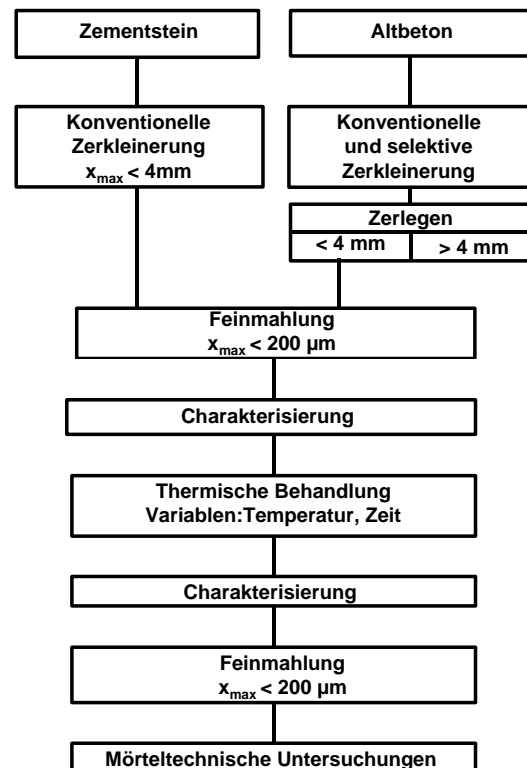


2.2 Untersuchungen zur Nutzung als Primärbindemittel nach Reaktivierung

Das Teilprojekt Primärbindemittel nutzt den experimentellen Befund einer Diplomarbeit in der es gelungen ist Zementstein verschiedener Zementtypen zu dehydratisieren und decarbonatisieren und dabei die wesentlichen Phasen des Ausgangszementes wieder herzustellen. Das Versuchsprogramm zur Reaktivierung teilt sich in folgende Abschnitte.

An reinen Zementsteinen aus unterschiedlichen Zementarten und an der Kornfraktion 0/4 mm aus Betonen mit definierter Zusammensetzung soll untersucht werden, inwieweit die Hydrationsprodukte, welche die Erhärtung des Zementes verursachen, durch thermische Behandlung in die wasserfreien Zementmineralien zurückgeführt werden können. Voraussetzung für die Reaktivierung von Beton ist eine möglichst vollständige Zementsteinanreicherung in der zu untersuchenden Fraktion 0/4 mm. Dabei spielt die Wahl der Zerkleinerungsmethode eine entscheidende Rolle. Deshalb soll neben den konventionellen Techniken das Augenmerk auch auf neue Zerkleinerungsmethoden gelegt werden. Wird die Zerkleinerungsenergie entlang der Korngrenzen eingeleitet, so kann dies bei Anwendung an Betonen eine effektivere Trennung von Zementstein und Zuschlägen als bei den bisher praktizierten Zerkleinerungsmethoden bewirken. Nach der Zerkleinerung soll dann eine Feinmahlung erfolgen, mit dem Ziel definierte Korngrößenverteilungen mit $x_{\max} < 200 \mu\text{m}$ zu erreichen. Es schließt sich die thermische Behandlung an.

Als Einflußgrößen für die thermische Behandlung gelten zum einen granulometrische Parameter und zum anderen die Brennbedingungen, wie Zeit und Temperatur. Nach der thermischen Behandlung wird das reaktivierte Material auf Zementfeinheit aufgemahlen. Das erzeugte Bindemittel und die daraus hergestellten Frisch- und Festmörtel sollen dann auf ihre wesentlichen Eigenschaften überprüft werden. Parallel dazu sollen Untersuchungen zum Phasenbestand sowohl im Ausgangszustand als auch nach der thermischen Behandlung durchgeführt werden



2.3 Untersuchungen zur Nutzung als Sekundärbindemittel

Im Teilprojekt Sekundärbindemittel wurde an der Kornfraktion < 4 mm zweier aufbereiteter Altbetone (B 15 und B 35) und an Zementsteinvariationen mit unterschiedlichen Bindemitteln und Hydratationsgraden untersucht, ob erhärtungswirksame Bestandteile vorliegen. Dazu wurden diese Recyclingmaterialien durch konventionelle Techniken auf verschiedene Feinheitsstufen aufgemahlen und einem Portlandzement in einem Anteil von 20 Ma.-% zugegeben. An den erzeugten Mischzementen und an Referenzproben aus 100 Ma.-% Portlandzement wurden verschiedenen Eigenschaften, wie z. B der Festigkeitsverlauf in Abhängigkeit von der Mahlfeinheit des Zusatzstoffes untersucht.

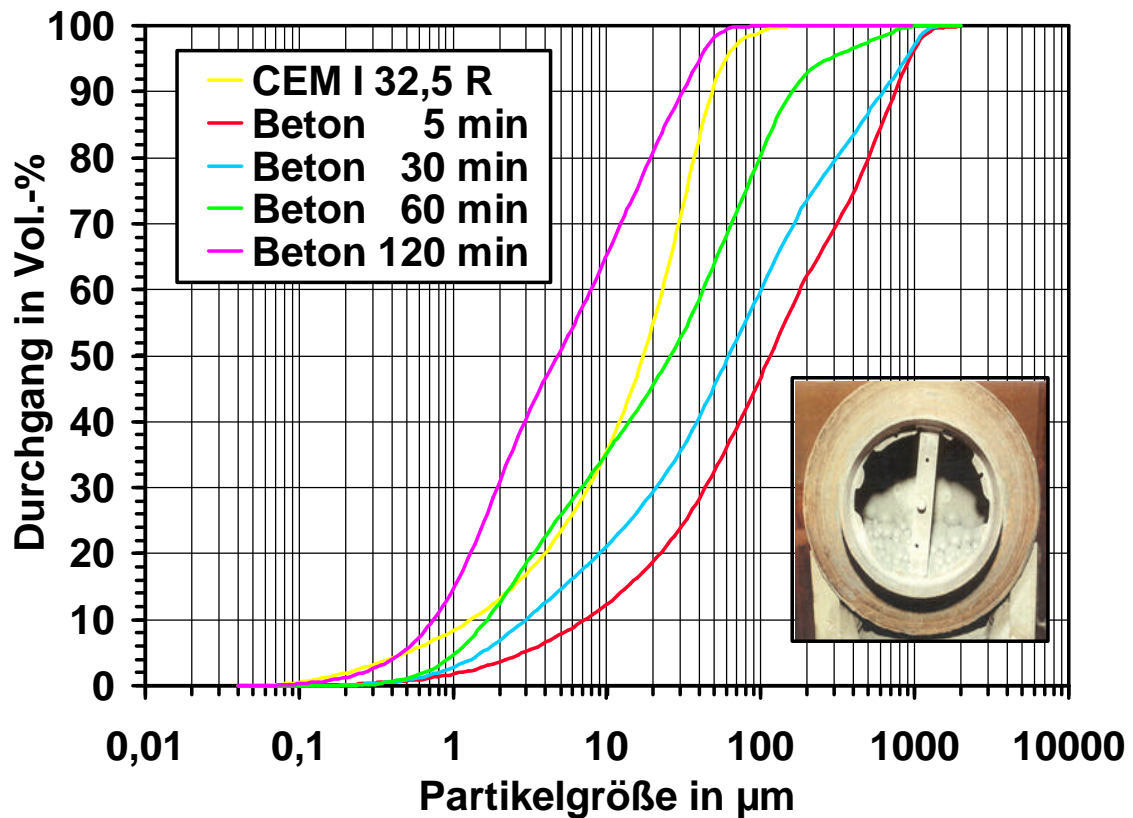
Die verwendeten Altbetone, die zum Zeitpunkt der Versuche ca. drei Jahre alt waren, stammen von einer Eignungsprüfung. Die Betone enthalten Kiessand als Zuschlag mit einem Größtkorn von 32 mm. Der B 15 und der B 35 wurden mit einem CEM I 32,5 R und dem Wasser-Zement-Wert von 0,75 bzw. 0,5 hergestellt. Laut mineralogischer Analyse enthalten die Altbetone Quarz, als Hauptkomponente des Zuschlags. Ebenfalls aus dem Zuschlag stammen die Feldspäte Orthoklas ($K[AlSi_3O_8]$) und Albit ($Na[AlSi_3O_8]$). Weiterhin enthalten beide Altbetone Calcit ($CaCO_3$). Während beim B 15 Portlandit ($Ca(OH)_2$) nicht ermittelt wurde, liegt dieser beim B 35 vor.

Die Zementsteinvariationen mit unterschiedlichen Bindemitteln und Hydratationsgraden wurden mit einem CEM I 32,5 R und einem CEM III/B 32,5 NW, HS, NA und einem Wasser-Zement-Wert von 0,4 hergestellt. Lagerzeit betrug 28 bzw. 90 d.

Als Ausgangszement wurde ein CEM I 32,5 R, d.h. einen Portlandzement der Festigkeitsklasse 32,5 mit einer hohen Anfangsfestigkeit eingesetzt. Die Ergebnisse der Bestimmung der Druckfestigkeit für diesen Zement nach DIN EN 196 Teil 1 zeigt die Tabelle.

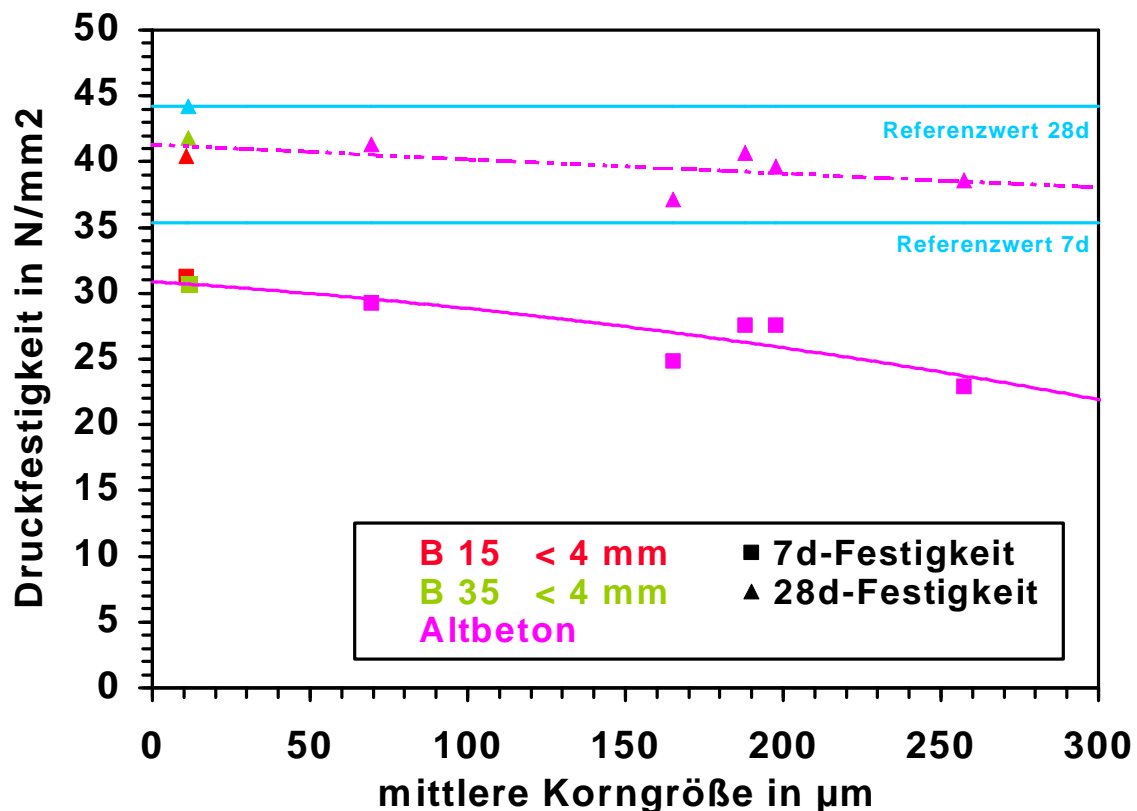
Zeit in Tagen	7	28
Druckfestigkeit in N/mm^2	35,4	44,3

Der Altbeton lag gebrochen vor und wurde nach der Probenahme durch ein Schwingsieb in die Fraktionen < 4 mm und > 4 mm zerlegt. Nur die Fraktion < 4 mm kam zur Anwendung. Die Prismen der vier Zementsteinvariationen wurden im Backenbrecher vorgebrochen. Im Anschluß daran erfolgte die Feinmahlung der Recyclingmaterialien in einer Kugelmühle. Um eine bessere Mahlbarkeit zu gewährleisten, war eine Trocknung des Materials bei 105 °C erforderlich. Für alle Materialien wurden einheitliche Aufbereitungszeiten festgelegt.



Das Diagramm zeigt die erzielten Summenfunktionen des Betons zu den verschiedenen Mahldauern. Die Feinheiten liegen oberhalb und unterhalb des für die Mischbindemittel eingesetzten Zementes. Zwischen den vier Zeiten sind deutliche Unterschiede zu erkennen. Die Feinheit nimmt mit steigender Mahldauer zu.

Aus jeweils 20 Ma.-% Altbetonmehl bzw. den Zementsteinvariationen mit unterschiedlichen Bindemitteln und Hydratationsgraden und 80 Ma.-% Portlandzement wurden durch Mischung und Homogenisierung Bindemittel mit Recyclingmaterialanteil hergestellt. Alle Feinheitsstufen wurden einbezogen. Aus diesen Materialien wurden Normmörtelprismen nach DIN EN 196 Teil 1 für die Druckfestigkeitsprüfungen hergestellt. Parallel dazu erfolgte die Herstellung von Referenzproben aus 100 Ma.-% Portlandzement. Weitere Untersuchungen galten u.a. der Konsistenz des Frischmörtels mittels Ausbreitmaß nach DIN EN 459-2 und den Erstarrungszeiten. Auf diese soll hier nicht weiter eingegangen werden.



Den Einfluß der Recyclingmaterialien auf die Mörteldruckfestigkeit nach 7 und 28 Tagen zeigt dieses Diagramm. Die Ergebnisse der 90 Tage-Druckfestigkeit liegen noch nicht vor. Als Beispiel für die Festigkeitsentwicklung der Mischbindemittel ist hier die Variante mit dem B 15, B 35 und einem weiteren Altbeton dargestellt.

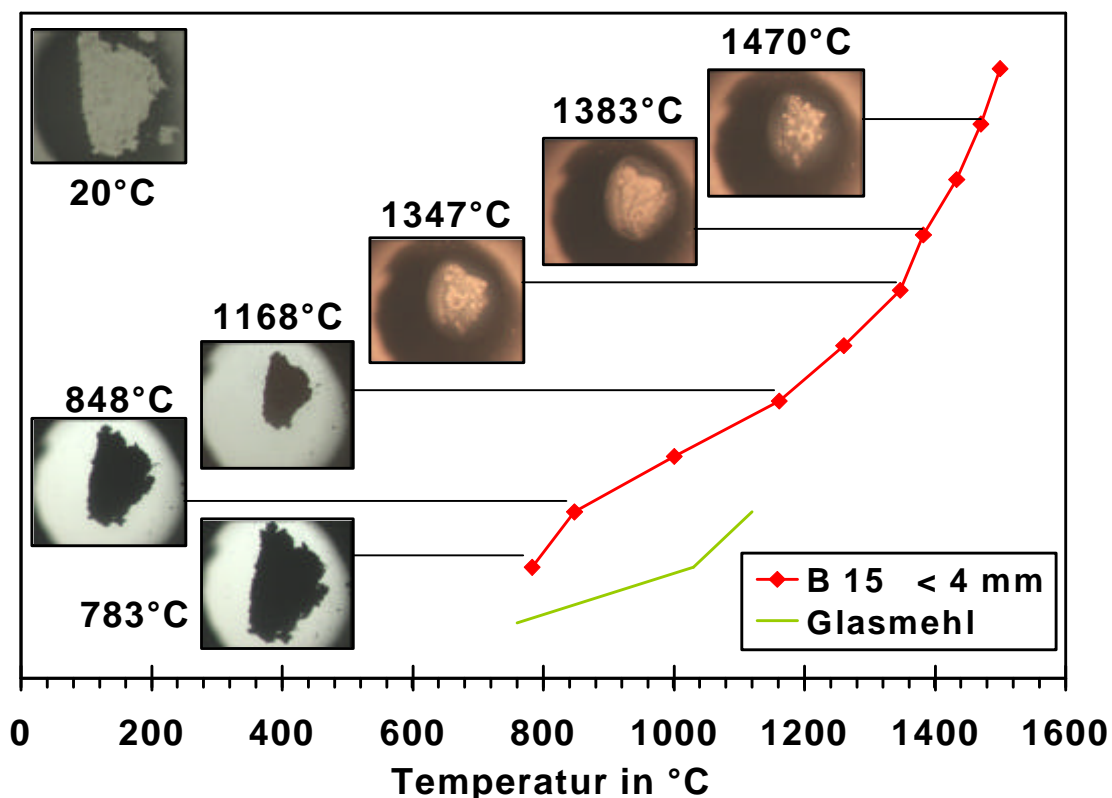
Der Vergleich der Festigkeiten der Mörtel zeigt, daß die Festigkeit der Referenzproben nicht erreicht wird. Die Abhängigkeit von der mittleren Korngröße weist aus, daß sich die Druckfestigkeit der Mörtelprismen mit Zunahme der Mahlfineinheit der zugeetzten Betonmehle erhöht. Der Grenzwert ist bei einer mittleren Korngröße von ca. 10 µm erreicht.

Erwähnt werden soll an dieser Stelle, daß sich nicht nur der Zementstein des Altbetons an der Festigkeitszunahme beteiligen kann, sondern auf Grund des hohen Feinmahlgrades sogar der Quarz des Zuschlags reaktionsfähig werden kann [16]. Zusätzlich können physikalische Effekte die Festigkeitsbildung beeinflussen, indem der Quarzanteil in den Altbetonmehlen zu einer Verdichtung und Stabilisierung des Gefüges beiträgt.

2.4 Untersuchungen zur Nutzung als Rohstoffkomponente für mineralische Dämmstoffe

In der Teilaufgabe Rohstoffkomponente für mineralische Dämmstoffe wurden neben chemischen und mineralogischen Analysen das Sinter- und Schmelzverhalten von Betonmehlen unterschiedlicher Festigkeitsklassen und Kornfraktionen, von verschiedenen Zementen sowie Zementsteinen mit und ohne Zusätze untersucht. Daraus sollen Aussagen getroffen werden, welchen Einfluß die Art und die Kornfraktion des Altbetons, die Zusatzmaterialart und -menge auf das Schmelzverhalten haben. Als Vergleich wurde das Schmelzverhalten verfügbarer Rohstoffe für die Herstellung mineralischer Dämmstoffe untersucht.

Für die Untersuchungen des Sinter- und Schmelzverhaltens steht der Professur ein modernes Heitzischmikroskop für den Temperaturbereich von 20-1500°C mit rechnergestützten Bildverbesserungs- und Archivierungsfunktionen zur Verfügung. Mit Hilfe dieses Gerätes können die Temperaturen ermittelt werden, bei denen Veränderungen an der Probe zu erkennen sind. Dazu gehören Schwinden, Blähen, Blasen- und Schmelzphasenbildung. Aus den Beobachtungen kann dann die Breite des Sinter- und Schmelzbereiches ermittelt werden.



Das Diagramm zeigt markante Veränderungen während des Aufheizens eines Betonmehles, daß aus der Kornfraktion 0/4 mm eines B 15 hergestellt wurde. Erste Schwindungserscheinungen treten bei 783°C auf. Die maximale Schwindung des Probekörpers ist bei 1168°C erreicht. Dieser Temperaturbereich wird auch als Sinterintervall bezeichnet. Bei 1347°C beginnen sich die Kanten der Probe zu runden. Hier

beginnt die Erweichung des Materials. Die weiteren Fotos zeigen Veränderungen des Materials mit Zunahme der Temperatur. Als Vergleich wurde hier das Sinter- und Schmelzverhalten von Glasmehl dargestellt. Das Diagramm verdeutlicht, daß das Betonmehl im Gegensatz zum Glasmehl einen großen Sinter- und Schmelzbereich hat. Während zwischen Sinterbeginn und Schmelzpunkt beim Glasmehl ein Temperaturbereich von 360 K liegt, ist dieser beim Betonmehl > 717 K. Eine Modifizierung des Sinter- und Schmelzverhaltens durch Zusätze wird gegenwärtig untersucht.

3 Zusammenfassung

Die vorgestellten Forschungen zum Thema der Verwertung von Betonsand zeigen Möglichkeiten auf, die vom heutigen Stand ungewöhnlich sind, aber notwendig erscheinen, um lohnenswerte Einsatzgebiete und prinzipielle Grenzen auszuloten. Nach den vorliegenden Zwischenergebnissen zeichnet sich folgendes Bild ab.

Primärbindemittel nach Reaktivierung

- erfordert selektive Aufbereitung und thermische Behandlung des Altbetons
- hydratisierter Zement in Ausgangszustand überführbar
- Nachweis hydraulischer Eigenschaften steht noch aus

Sekundärbindemittel

- bei ausreichender Feinheit geeignet als Zusatzstoff zu Beton
- Druckfestigkeit und Verarbeitbarkeit verbessert sich mit zunehmender Feinheit bis zu einem Grenzwert

Rohstoffkomponente für mineralische Dämmstoffe

- reiner Beton zeigt ungünstiges Verhalten
- Verbesserung durch Zugabe weiterer Komponenten möglich

Literatur

- [1] Bilitewski, B.
Recycling von Baureststoffen
EF-Verlag für Energie und Umwelt GmbH, Berlin, 1993
- [2] Merkblatt über die Verwendung von industriellen Nebenprodukten im Straßenbau,
Teil: Wiederverwertung von Baustoffen
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Köln, Arbeitsgruppe "Mineralstoffe in Straßenbau", Ausgabe 1985
- [3] Krenn, H.
Generalsanierung einer Betonautobahn am Beispiel des Bauloses Thalgau an der A 1
In: Zement und Beton (Vienna) 2/92 Seite 26-29
- [4] Grüning, R.
Wiederverwendung von Betondecken im Straßenbau
In: Bausoff-Recycling 2/86 Seite 33-36
- [5] Moss, T.
Erneuerung von Betondecken auf Autobahnen in der Bundesrepublik Deutschland
In: Zement und Beton 1/8 Seite 12-14
- [6] Franke, H.-J.
Recycling von Betondecken im Autobahnbau
In: Straße und Autobahn 10/93 Seite 615-616, 621
- [7] Meyer, P.
Qualitätsprodukte aus Altmaterial. Modern Bauschuttrecyclinganlage schon Ressourcen und Deponieraum
In: Baumaschinendienst 9/93 Seite 807-808
- [8] Lardi, R., Eßler, A.
Recycling-Beton - Zuschlag aus aufbereitetem Bauschutt
In: Baustoff-Recycling 4/86 Seite 131-139
- [9] Betonrecycling - ein Gebot der Stunde
In: Cementbulletin 6/92 Seite 1-10
- [10] Stringlhammer, H.
Recycling im Straßenbau - Beton-Autobahnen
In: Tiefbau-Berufsgenossenschaft 1/93 Seite 10-12
- [11] Vollpracht, A.

Recycling von Beton. Erfahrungen aus dem amerikanischen Straßenbau
In: Beton 6/92 Seite 348

- [12] Splittgerber, Frank
Identifizierung von Zementen und Mörteln und Betonen
Diplomarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen,
Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung, 1995
- [13] Krass, K.:
Bautechnische und ökologische Aspekte des Betonrecyclings.
In: Betonwerk + Fertigteil-Technik, Heft 1/1994, S. 103-108
- [14] Montgomery, D. G.:
Workability and compressive strength: Properties of concrete containing
recycled concrete aggregate.
In: Sustainable Construction: Use of recycled concrete aggregate
Proceedings of the International Symposium by the Concrete Tech-
nology Unit, University of Dundee, UK on 11-12 November 1998, pp.
287-296
- [15] Lander, S.
Nacherhärtung von Zementstein aus aufbereitetem Betonabbruch
Diplomarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen,
Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung, 1997
- [16] Wesche, K.
Baustoffe für tragende Bauteile
Bd. 2 Bauverlag GmbH Wiesbaden und Berlin, 1993