

## Forschungsprojekt: „Verwertungsmöglichkeiten für die Sandfraktion von Recyclingbaustoffen aus Beton“

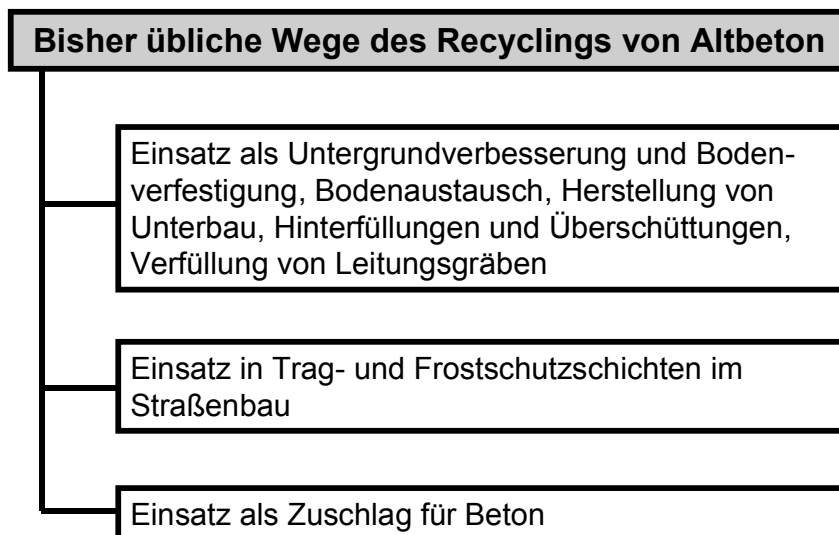
Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) Bonn

### 1. Ausgangsposition

Entsprechend den Statistiken des Umweltbundesamtes [1] machen die durch Bautätigkeit verursachten Abfallmengen den größten Anteil der Gesamtabfallbilanz Deutschlands aus. Eine Reduzierung dieser Menge durch eine gezielte Abfallvermeidung ist aufgrund der Struktur der Baubranche und der Langlebigkeit der Produkte nur schwer erreichbar, sodaß gegenwärtig die Abfallverwertung im Vordergrund steht.

Die anfallenden Baureststoffe enthalten Wertstoffe, deren weitere Nutzung zur Einsparung von Deponieraum und zur Schonung von natürlichen Ressourcen führt. Heute werden bereits Straßenaufbruch, wenig verunreinigter Bauschutt und die mineralischen Komponenten von Baustellenabfällen verwertet. Recyclingbaustoffe werden im Tiefbau, Erd- und Landschaftsbau, im Straßenbau und teils auch im Hochbau eingesetzt [2].

Da in Zukunft durch umfangreiche Sanierungsmaßnahmen vor allem in den neuen Bundesländern z.B. durch den Rückbau von Neubausiedlungen bzw. durch die weitere Erneuerung und den Ausbau von Straßen und Autobahnen große Mengen an Ausbau-beton zu erwarten sind, sollte der Aufbereitung dieser Stoffgruppe besondere Beachtung zukommen und neue Verwertungsmöglichkeiten entwickelt werden. Einen Überblick über bisherige Verwertungsmöglichkeiten von Altbeton gibt Abbildung 1.



**Abbildung 1:** Bisher übliche Wege des Recyclings von Altbeton

Für das Niveau dieser Einsatzfelder und die resultierenden Anforderungen gilt:

- Bei der Nutzung zur Untergrundverbesserung, Bodenverfestigung etc. werden geringe Anforderungen an die Aufbereitung und die bautechnischen Eigenschaften gestellt. Allerdings muß das Material in diesem Fall strengere umwelttechnische Anforderungen erfüllen, weil ein Kontakt mit dem Grundwasser nicht ausgeschlossen werden kann.

- Beim Einsatz als Mineralstoff im Straßenbau wird zerkleinerter Altbeton als Bestandteil von hydraulisch gebundenen oder ungebundenen Schichten verwendet. Zu diesem Zweck wird in der Regel das gesamte beim Brechen entstehende Kornband genutzt. Der Vorteil dieses Einsatzgebietes besteht im verhältnismäßig geringen Aufwand und in der guten Eignung des Materials für diese Anwendung. Deshalb hat sich dieser Anwendungsfall für Beton aus Fahrbahndecken, der bspw. bei der Erneuerung von Betonautobahnen entsteht, bereits weitestgehend durchgesetzt. Für aufbereiteten Betonschutt aus dem Hochbau wird dieses Einsatzgebiet jedoch kaum genutzt.
- Bei der dritten Recyclingvariante wird der zerkleinerte Altbeton als Zuschlag für Beton eingesetzt. Besteht das Recyclingmaterial hierbei aus hochwertigem, nahezu ungeschädigtem Beton, so sind die damit zu erzielenden Eigenschaften nahe denen eines mit natürlichen Zuschlägen hergestellten Betons. Problematisch ist die Sandfraktion, die aufgrund ihrer Eigenschaften zu einer Verschlechterung der Verarbeitbarkeit und einem erhöhten Schwindmaß bei dem neu hergestellten Beton führt. Aus diesem Grund wird in der Regel bei der Herstellung von Beton mit Recyclingzuschlag 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.

Die Richtlinie "Beton mit rezykliertem Zuschlag" des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton [11] schränkt für Innenbauteile den Anteil an Betonbrechsand 0/2 mm auf < 7 Vol.-% ein. Für Außenbauteile darf kein Betonbrechsand 0/2 mm verwendet werden. Bei der Zerkleinerung von Altbeton ist die Entstehung eines Feinkornanteils jedoch unvermeidlich, für den *adäquate Einsatzgebiete* aufgezeigt werden müssen. Erfahrungen aus dem amerikanischen Straßenbau [12] und Untersuchungen von Nicolay und Schulz [13] zeigen, daß zumindest ein Teil der beim Brechen des Altbetons anfallenden Sande ohne nennenswerte Qualitätseinbußen zur Herstellung von Beton, auch im Hochbau, wiederverwertet werden kann.

## 2. Zielsetzung

Gegenstand des Forschungsprojekts ist die Entwicklung von alternativen Möglichkeiten zur Wiederverwertung von Recyclingbetonsand 0/4 mm. Die Untersuchungen umfassen vier Schwerpunkte (Abbildung 2).

<b>Teilgebiet 0</b>	Erstellen der Eigenschaftsprofile der Recyclingmaterialien
<b>Teilgebiet 1</b>	Untersuchungen zur Nutzung als <b>Primärbindemittel</b> nach thermischer Reaktivierung
<b>Teilgebiet 2</b>	Untersuchungen zur Nutzung als <b>Sekundärbindemittel</b> nach Aufmahlung bis auf Zementfeinheit
<b>Teilgebiet 3</b>	Untersuchungen zur Nutzung als Rohstoffkomponente für mineralische <b>Dämmstoffe</b>

**Abbildung 2:** Teilgebiete des DFG-Forschungsthemas „RC-Betonsand“

Zunächst werden ausführliche Eigenschaftsprofile von Altbetonsand unterschiedlicher Herkunft erstellt. Dabei wird auf die Spezifika dieses Sandes, der neben inerten auch umwandlungsfähige Phasen enthält, besonders eingegangen.

Als erste Verwertungsmöglichkeit wird die thermische Reaktivierung des angereicherten Zementsteins zu einem hydraulischen Bindemittel erprobt. Diese Einsatzmöglichkeit

geht von der Tatsache aus, daß es im Rahmen von Untersuchungen im DFG-Projekt „Zementsteinidentifizierung“ [14] u.a. gelungen ist, den Zementstein verschiedener Zementtypen zu dehydratisieren und zu decarbonatisieren und dabei die wesentlichen Phasen des Ausgangszementes wieder herzustellen und damit den Zement zu „reaktivieren“.

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 Reaktivitätspotentiale hin. Untersuchungen von Krass belegen diese Aussage wissenschaftlich [15]. Montgomery [16] beschäftigte sich ebenfalls mit der Wirkung eines teilweisen Zementersatzes durch Altbetonmehle. Bei einem Austausch von 33 Masse-% 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 [17] durchgeführten Untersuchungen zur Substitution von 20 Masse-% eines Zements durch Altbetonmehl bestätigten die Verbesserung der Verarbeitbarkeit. Gleichzeitig ergab sich eine deutliche Festigkeitszunahme der Mörtel mit ansteigender Feinheit des Zusatzstoffes.

Die dritte Verwertungsmöglichkeit von Recyclingbetonsand ergibt sich unmittelbar aus dessen Zusammensetzung. Es zeigte sich, daß Recyclingsand aus Beton mit kieseligen Zuschlägen bezüglich seiner chemischen Zusammensetzung gewisse Ähnlichkeiten mit der von magmatischen Gesteinen aufweist, die zur Herstellung von mineralischen Dämmstoffen verwendet werden. Durch Untersuchungen zum Schmelzverhalten sollte diese Verwertungsoption überprüft werden.

Der Untersuchungsumfang des Forschungsprojektes war außerordentlich hoch und methodisch sehr breit angelegt, bedingt durch die unterschiedlichen Verwertungswege. Neben Aufbereitungstechniken mußten beispielsweise auch mörteltechnische und thermische Untersuchungen realisiert werden. Im Ergebnis des Forschungsprojekts können Aussagen zur grundsätzlichen Realisierbarkeit der getesteten Verwertungswege vorgelegt werden. Zu erfolgsversprechenden Varianten müssen sich ausführliche Untersuchungen zur Produkt- und Technologieentwicklung anschließen.

Im Zusammenhang mit dem Forschungsprojekt entstanden Diplom- [18, 19, 20] und Studienarbeiten [21, 22].

### **3. Ergebnisse**

#### **3.1 Eigenschaftsprofile**

Als Ausgangsmaterialien der Untersuchungen wurden zum einen Zementsteine aus den Zementsorten CEM I und CEM III eingesetzt, um grundsätzliche Aussagen zum Verhalten von hydratisierten Zementen bei extremer mechanischer bzw. thermischer Beanspruchung zu erhalten. Zum anderen wurden Labormörtel und Betone aus Modellversuchen zur Zerkleinerung [23] eingesetzt, um Aussagen zum Einfluß der Zuschläge treffen zu können. Im folgenden werden ausgewählte Ergebnisse zur Charakterisierung der Eigenschaften der Ausgangsmaterialien zusammengefaßt.

##### *Zementstein*

- Wie erwartet weisen die Zementsteine aus CEM I einen höheren Glühverlust und Hydratationsgrad als die Zementsteine aus CEM III auf. Die Hydratationsgrade, die nach 90 Tagen erreicht werden, liegen bei 85,8 % für den CEM I und 72,3 % für den CEM III. Damit weisen beide Zementsteine Resthydratationspotentiale auf, deren Nutzung im Teilgebiet Sekundärbindemittel untersucht werden sollen.

### Labormörtel

- Bei den Labormörteln beschränkte sich die Charakterisierung auf die Bestimmung der Glühverluste bzw. der Gehalte an HCl-unlöslichen Bestandteilen in den Kornfraktionen 0/1 mm, 1/2 mm und 2/4 mm. Die Fraktion 0/1 mm weist dabei den höchsten Glühverlust und den geringsten Gehalt an HCl-unlöslichen Bestandteilen auf. Dies bestätigt Untersuchungen, wonach es bei Aufbereitung in einem Backenbrecher mit geringer Austragsspaltweite zu einer Anreicherung von Zementstein in der Feinfraktion kommt.

### Altbeton

- Die gemessenen chemischen Zusammensetzungen der Altbetone B 15 und B 35 weisen ebenso wie die Glühverluste und die Gehalte an HCl-unlöslichen Bestandteilen eindeutig den höheren Zementgehalt des B 35 nach.
- Die Glühverluste nehmen mit zunehmender Partikelgröße ab, die HCl-unlöslichen Bestandteile nehmen zu. Ursache sind wiederum erhöhte Zementsteingehalte in den feinen Fraktionen.
- Der Wasseraufnahmegrad der beiden Altbetone nimmt mit zunehmender Partikelgröße ab. Im Feinkornbereich (0/1 mm) bewegt sich die Wasseraufnahme zwischen 15 und 23 %. Bei den groben Kornklassen (4/8; 8/16 und 16/32) liegt der Wasseraufnahmegrad jeweils bei ca. 6 %.

## 3.2 Untersuchungen zur Nutzung als Primärbindemittel nach thermischer Reaktivierung

Zementsteine aus CEM I und CEM III mit unterschiedlicher Hydratationsdauer wurden aufgemahlen und bei verschiedenen Temperaturen (600 °C bis 1400 °C) getempert. Die Temperatur von 600 °C wurde als niedrigste Temperaturstufe gewählt, da sich bei dieser der Portlandit zersetzt. Als höchste Temperaturstufe wurde bei dem CEM I-Zementstein 1400 °C gewählt, was in etwa der Brenntemperatur des Ausgangszementes entspricht. Für den CEM III-Zementstein tritt bei dieser Temperatur bereits massive Schmelzphasenbildung auf, so daß der Temperaturbereich auf maximal 1200 °C begrenzt werden mußte. Die Temperprodukte wurden hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und ihres Reaktionsvermögens mit Wasser charakterisiert und auf ihre Frisch- und Festmörteleigenschaften hin getestet. Die Tabelle 1 faßt die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchungen dieses Teilgebiets als Gegenüberstellung zusammen. Als Bezug dient dabei der Ausgangszement bzw. die für Normzemente gültigen Grenzwerte. Im Ergebnis werden die erzielten Druck- und Biegezugfestigkeiten mit dem Referenzwert verglichen. Auf einen Vergleich der Frischmörteleigenschaften und Trockenrohdichten wird aufgrund der unterschiedlichen Wassorzementwerte verzichtet.

**Tabelle 1:** Zusammenfassung der Ergebnisse zum Teilgebiet Primärbindemittel

	CEM I 180 Tage				CEM III 180 Tage		
	600	1100	1200	1400	600	1100	1200
SO <sub>3</sub> -Gehalt in Masse-%	<	<	<	<	>	>	=
CaO <sub>frei</sub> in Masse-%	>	>	>	<	<	<	<
Glühverlust in Masse-%	>	<	<	<	<	<	<
Mineralogie	-	+	+	++	-	+	+
Hydratationswärme	+	-	-	++	+	--	--
Festigkeiten der Mörtel	<<	<	<	>	<<	--	--

Symbole:	<	kleiner als der geforderte Grenz- bzw. Orientierungswert
	>	größer als der geforderte Grenz- bzw. Orientierungswert
	++	sehr gute Voraussetzungen im Vergleich zum Referenzzement
	+	gute Voraussetzungen / Ergebnisse
	-	schlechte Voraussetzungen / Ergebnisse
	--	sehr schlechte Voraussetzungen / Ergebnisse

Als Resümee der Untersuchungen getempertter Zementpasten läßt sich feststellen, daß

- von allen Temperprodukten des CEM I der Orientierungswert für den  $\text{SO}_3$ -Gehalt für Zement eingehalten wird, während er beim CEM III größer bzw. gleich ist,
- die ermittelten Werte für den Freikalk beim CEM I bei den mittleren Temperaturnen weit über dem Orientierungswert liegen, während sie beim CEM III deutlich darunter liegen,
- der Grenzwert für den Glühverlust nur bei der thermischen Behandlung des CEM I bei  $600\text{ }^\circ\text{C}$  überschritten wird,
- die röntgenographische Phasenanalyse des Temperprodukts von  $1400\text{ }^\circ\text{C}$  des CEM I nahezu mit der des Ausgangszements übereinstimmt, während bei den Temperprodukten des CEM III keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt wurden.

Zu den Untersuchungen an Mörteln, welche die getemperten Zementpasten als Bindemittel enthielten, läßt sich zusammenfassen, daß

- eine adäquate Verarbeitbarkeit (Konsistenz) der Mörtel mit Temperprodukten nur durch erhöhte w/z-Werte gegeben war, was die erzielten Festigkeiten und Rohdichten negativ beeinflusste,
- bei zukünftigen Untersuchungen der Einsatz eines Fließmittels zur Konsistenzverbesserung (bei konstanten Wasserzementwerten) sinnvoll ist,
- der Referenzwert für die Druck- und Biegezugfestigkeit nur vom Mörtel aus dem  $1400\text{ }^\circ\text{C}$ -Temperprodukt des CEM I erreicht bzw. überschritten wird,
- Temperprodukte  $>1100\text{ }^\circ\text{C}$  aus CEM III offenbar nicht als Primärbindemittel geeignet sind.

Die Untersuchungen zeigen, daß nur ein Portlandzementstein, der bei der ursprünglichen Sintertemperatur der Zementklinkerherstellung reaktiviert wurde, vergleichbare Eigenschaften wie der Ausgangszement besitzt. Nur unter diesen Bedingungen können die ursprünglichen Zementphasen wieder gebildet werden. Die hydraulische Aktivität dieser rückgebildeten Phasen scheint die der ursprünglichen Phasen zu erreichen oder sogar zu übertreffen.

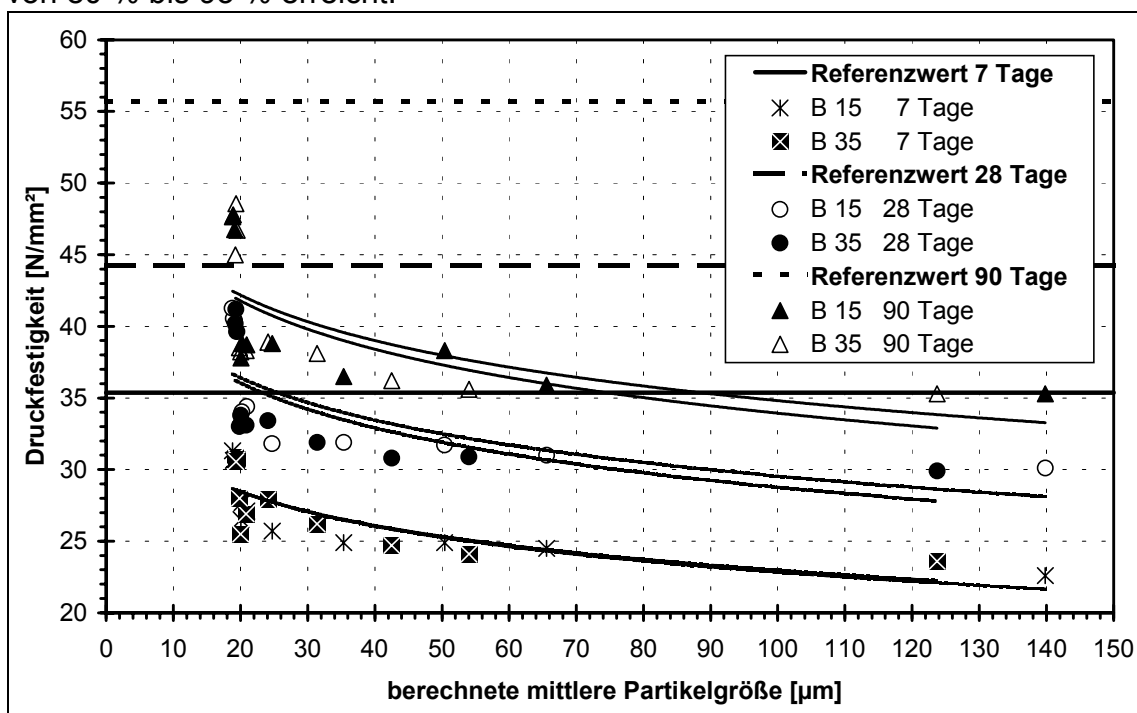
### 3.3 Untersuchungen zur Nutzung als Sekundärbindemittel

In den Untersuchungen zur Nutzung als Sekundärbindemittel sollte der Frage nachgegangen werden, ob aufgemahlener Zementstein bzw. Altbeton, der anteilig einem Zement zugegeben wird, zur Festigkeitsbildung beiträgt. Die Untersuchungen wurden auf drei Abstraktionsebenen durchgeführt:

- Auf der ersten Ebene wurden 20 Masse-% des Referenzzementes durch den gleichen, aber nachgefeinten Zement ersetzt.
- Auf der zweiten Abstraktionsebene wurden Zementsteine aus CEM I und CEM III mit unterschiedlicher Hydratationsdauer aufgemahlen und dem Referenzzement in einem Anteil von 20 Masse-% zugefügt.
- Den Bezug zu den praktischen Recyclingmaterialien stellen die Untersuchungen dar, in denen Altbetone auf unterschiedliche Feinheiten aufgemahlen und einem Zement in einem Anteil von 20 Masse-% zugegeben wurden.

Als Vergleichsmaterial diente zum einen der Referenzzement. Zum anderen wurde Quarzmehl mit vergleichbaren Feinheiten als Zusatzstoff verwendet. Da in diesem Fall eine Beteiligung des Quarzmehls ( $\text{SiO}_2$ ) an Erhärtungsreaktionen nicht ausgeschlossen werden kann, kam außerdem Korund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) als Inertmaterial zum Einsatz. An den aus den Mehlen und dem Referenzzement hergestellten Mischbindemitteln wurden die wichtigsten Bindemittleigenschaften und die mörteltechnischen Eigenschaften untersucht.

Der Vergleich der Festigkeiten der Mörtel mit Altbetonmehlzusatz (Abbildung 3) zeigt, daß die Festigkeit der Referenzproben nicht erreicht wird. Bis zu einer berechneten mittleren Partikelgröße der Gemische von ca. 20  $\mu\text{m}$ , was einer mittleren Partikelgröße der Mehle von ca. 15  $\mu\text{m}$  entspricht, bleiben die bezogenen Druckfestigkeiten unter 80 % des Referenzwertes. Unterhalb dieser Partikelgröße werden jedoch Relativwerte von 80 % bis 93 % erreicht.



**Abbildung 3:** Druckfestigkeiten der Mörtel mit Altbetonmehlzusatz

Als Resümee der Untersuchungen läßt sich feststellen, daß

- sich der Wasseranspruch der Mischbindemittel mit den verschiedenen Mehlen entweder erhöht, senkt oder nicht ändert,
- die Erstarrungszeiten durch die Feinstoffzugabe nur wenig beeinflusst und die DIN-Grenzwerte eingehalten wurden,
- die Konsistenz der Frischmörtel im steifen bis plastischen Bereich lag, wobei teilweise eine verflüssigende Wirkung mit zunehmender Feinheit der Zusätze beobachtet wurde,
- die Druckfestigkeiten der Festmörtel mit Mischbindemitteln nur selten die Werte des Referenzmörtels erreichten,
- die Trockenrohdichten durch den anteiligen Austausch des Zements nur wenig beeinflusst wurden,
- die erzielten Festigkeiten bei Verwendung von Korund statt Quarz als Inertmaterial deutlich geringer waren.

Die Untersuchungen führten zu teilweise gegenläufigen Ergebnissen. So beeinflusst die Zugabe von Mehlen aus Zementstein die Konsistenz nur wenig bzw. sehr indifferent, während sich bei Betonmehlzusatz mit zunehmender Feinheit die Konsistenz

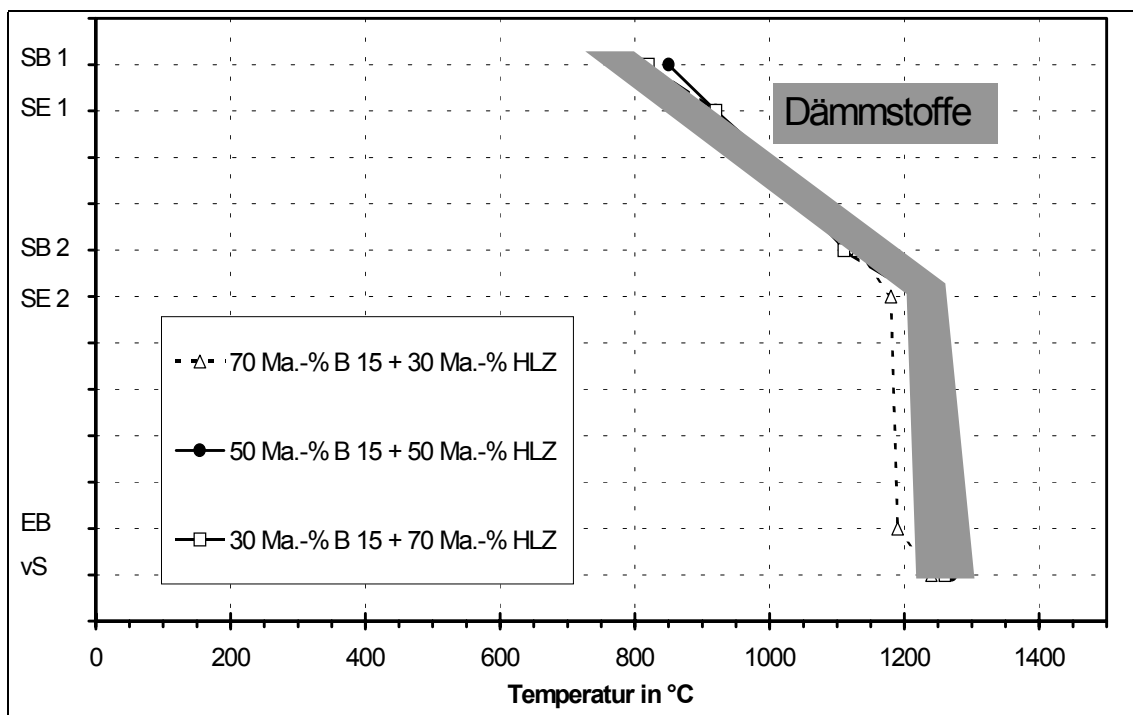
verbessert. Bezüglich der Festigkeit wirkt die Zugabe von Zementsteinmehlen mit hohen Hydratationsgraden nicht festigkeitsmindernd, in einigen Fällen sogar festigkeitssteigernd.

Weiterhin wurde festgestellt, daß die Kornformen der Zusätze durch die Mahltechnologie beeinflusst werden. Eine daraus resultierende Auswirkung auf die Konsistenzen und Festigkeiten der Mörtel konnte dagegen nicht eindeutig nachgewiesen werden, sollte aber wegen ihrer Praxisrelevanz Ansatz für zukünftige Untersuchungen sein.

### 3.4 Untersuchungen zur Nutzung als Rohstoffkomponente für mineralische Dämmstoffe

In diesem Abschnitt des Projekts wurde der Einsatz von Recyclingbetonsand als Rohstoffkomponente zur Herstellung von mineralischen Dämmstoffen untersucht. Dabei wurde das Schmelzverhalten von unterschiedlichen Zementen, Zementsteinen bzw. Altbetonen ohne und mit verschiedenen Zusätzen mit Hilfe eines Heitztischmikroskops ermittelt. Als Referenzmaterialien wurden derzeit eingesetzte Ausgangsmaterialien und Endprodukte von Dämmstoffen in die Untersuchungen einbezogen. Damit konnten Aussagen zum Einfluß der Art des Altbetons sowie der Zusatzmaterialart und -menge auf das Schmelzverhalten getroffen werden.

Bei einer Gegenüberstellung der Endprodukte aus der Herstellung mineralischer Dämmstoffe mit Altbeton-Ziegel-Gemischen (Abbildung 4) zeigte sich beispielsweise eine sehr gute Übereinstimmung bzgl. des Sinter- und Schmelzverhaltens. Der Schmelzbeginn und die vollständige Schmelze werden etwas früher erreicht, können aber durch die Zusammensetzung des Gemisches beeinflusst und dem thermischen Verhalten der Referenzmaterialien angepaßt werden.



**Abbildung 4:** Sinter- und Schmelzverhalten der Altbeton-Ziegel-Gemische und der Endprodukte aus der Dämmstoffherstellung

Im Überblick läßt sich folgendes thermisches Verhalten der untersuchten Stoffgruppen feststellen:

- Der Portlandzement und der daraus hergestellte Zementstein zeigten ein ähnliches Schmelzverhalten. Der Schwindungs- und Erweichungsbeginn konnte jedoch beim Zementstein bei tieferen Temperaturen beobachtet werden. Beide wiesen bis 1500 °C (maximal erreichbare Temperatur mit dem verwendeten Heitzischmikroskop) keine vollständige Schmelze auf.
- Der Hochofenzement weist einen Erweichungsbeginn auf, der geringfügig über dem des Portlandzements liegt. Die Temperatur für die vollständige Schmelze ist jedoch deutlich geringer als beim Portlandzement.
- Das Schmelzverhalten der untersuchten Betonvarianten B 15 und B 35 war bis auf geringe Temperaturabweichungen gleich. Beide zeigten bis 1500 °C vollständige Schmelzen. Dabei lag die Schmelztemperatur des B 35 wenig unter der Schmelztemperatur des B 15. Aussagen zum Schmelzverhalten unterschiedlicher Fraktionen können anhand der Versuchsergebnisse nicht getroffen werden. Die reinen Abbruchbetone sind wegen hoher Schmelztemperaturen und langer Schmelzintervalle als Ausgangsstoffe für die Herstellung von Dämmstoffen nicht geeignet.
- Als möglich Zusätze wurden Quarz, Hochlochziegel, Glas und Asche eingesetzt. Reiner Ziegel zeigt hinsichtlich des Schmelzbeginns und der vollständigen Schmelze eine gute Übereinstimmung mit dem Referenzmaterial. Die charakteristischen Temperaturen liegen nur geringfügig höher als bei den parallel untersuchten Dämmstoffen bzw. deren Ausgangsmaterialien.
- Die Untersuchungen der Zementstein-Ziegel-Gemische und der Zementstein-Quarz-Gemische ergaben einen wesentlich früheren Schwindungsbeginn der Gemische gegenüber den reinen Zusätzen Ziegelmehl und Quarzmehl, während bei den Zementstein-Glas-Gemischen der Schwindungsbeginn zu höheren Temperaturen verschoben wird. In bezug auf den Erweichungsbeginn wird durch die Zugabe von Ziegelmehl eine Temperatursenkung um bis zu 150 K gegenüber dem reinen Zementstein erreicht. Alle Gemische wiesen bis 1500 °C vollständige Schmelzen auf. Die Schmelztemperaturen der untersuchten Gemische lagen unter den Temperaturen der reinen Stoffe Zementstein- und Quarzmehl, was auf die Bildung neuer Eutektika schließen läßt.
- Gemische aus Beton und Ziegel zeigen eine ähnlich gute Übereinstimmung mit den Referenzmaterialien wie der reine Ziegel. Der Schmelzbeginn und die vollständige Schmelze können durch die Zusammensetzung des Gemisches beeinflusst und dem thermischen Verhalten der Referenzmaterialien angepaßt werden. Die Zugabe von Altglas bzw. Asche führt dagegen nicht zu akzeptablen Ergebnissen. Durch Glaszusätze werden die charakteristischen Temperaturen weit unter die des Referenzwertes gesenkt, während mit einer Aschezugabe nur höhere Werte erzielt werden konnten.
- Die Ausgangsstoffe der Dämmstoffe und die Endprodukte zeigten aufgrund ihrer unterschiedlichen chemischen und mineralogischen Zusammensetzung z.T. ein sehr unterschiedliches Schmelzverhalten.

Anhand der Versuchsergebnisse kann eingeschätzt werden, daß Gemische aus Beton und Ziegel ein Sinter- und Schmelzverhalten zeigen, daß näherungsweise dem der ebenfalls untersuchten Dämmstoffe entspricht und nur wenig von der Zusammensetzung des Gemischs abhängt. Da das Beton-Ziegel-Gemisch als Modell für einen Mauerwerksabbruch betrachtet werden kann, der nach [24] ca. 50 bis 80 % Ziegel und 9 bis 27 % Beton enthält, ergibt sich aus den vorgelegten Untersuchungsergebnissen ein neuer Ansatz für die Verwertung von Mauerwerksabbruch.

#### 4. Zusammenfassung

Die Untersuchungen zum Teilgebiet *Primärbindemittel* ergaben, daß eine thermische Reaktivierung von Altbetonmörteln prinzipiell möglich ist, jedoch keine Möglichkeit zur großtechnischen Verwertung von RC-Betonsanden darstellen kann. Der Referenzwert für die Druck- und Biegezugfestigkeit wurde nur vom Mörtel aus dem 1400 °C-Temperprodukt des CEM I erreicht bzw. überschritten. Probleme bezüglich der Verarbeitbarkeit der Mörtel traten vor allem bei CEM III-Mörteln auf.

Beim Einsatz als *Sekundärbindemittel* (20-prozentige Zementsubstitution) verhalten sich die Altbetonmehle trotz ihres hohen Quarzanteils nicht wie Inertstoffe. Entsprechend aufgemahlen ist eine Verwendung als Zusatz für die Herstellung von Mörtel und Beton denkbar, wobei bereits bei mittleren Feinheiten brauchbare Verarbeitungseigenschaften im Hinblick auf die Konsistenz erzielt werden. Bei höherer Feinheit können sie auf das Gemisch verflüssigend wirken, sodaß der Wasserbedarf gesenkt wird. Daraus könnte sich ein neuer Ansatzpunkt für den praktischen Einsatz dieser Recyclingprodukte als konsistenzverbessernde Zusätze ergeben. Der Vergleich der Festigkeiten der untersuchten Inertstoffmörtel mit Quarz und Korund deutet auf eine Beteiligung des Quarzes an der Festigkeitsbildung hin. Die erzielten Festigkeiten bei Verwendung von Korund als Inertmaterial waren geringer.

Die Untersuchungen zum Schmelzverhalten im Teilgebiet *mineralische Dämmstoffe* zeigen, daß der Verwertungsweg, Altbetonmehl als Rohstoffkomponente zur Dämmstoffherstellung zu nutzen, realistisch erscheint. Allerdings wird der Altbeton nur eine Komponente der Ausgangsmischung darstellen können, sodaß die am Zementstein nachgewiesene Möglichkeit, das thermische Verhalten durch Zusätze zu beeinflussen, genutzt werden muß. Gute Übereinstimmung mit dem Schmelzverhalten der Referenzmaterialien wurde von Altbeton-Ziegel-Gemischen mit Betonanteilen von 30 bis 70 % (Abbildung 4) erzielt.

#### Literatur

- [1] <http://www.umweltbundesamt.de>
- [2] Bilitewski, B.  
Recycling von Baureststoffen  
EF-Verlag für Energie und Umwelt GmbH, Berlin, 1993
- [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. Moderne Bauschuttrecyclinganlage schont 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] Deutscher Ausschuß für Stahlbeton – DafStb  
DAfStb – Richtlinie: Beton mit rezykliertem Zuschlag, August 1998
- [12] Vollpracht, A.  
Recycling von Beton. Erfahrungen aus dem amerikanischen Straßenbau  
In: Beton 6/92 Seite 348
- [13] Nicolay J., Schulz R.-R.  
Transportbeton nach Eigenschaften mit Recyclingsand  
In: Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen – Weimar, Jg. 40 (1994), Nr. 5/6/7, S. 213-219
- [14] Methode zur Identifizierung von Zementen in hydratisierten Mörteln und Betonen  
Zwischenbericht zum DFG-Forschungsthema, Bauhaus-Universität Weimar, August 1999
- [15] Krass, K.:  
Bautechnische und ökologische Aspekte des Betonrecyclings.  
In: Betonwerk + Fertigteil-Technik, Heft 1/1994, S. 103-108
- [16] 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 Technology Unit, University of Dundee, UK on 11-12 November 1998, pp. 287-296
- [17] Lander, S.  
Nacherhärtung von Zementstein aus aufbereitetem Betonabbruch  
Diplomarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung, 1997
- [18] Zierbock, I.  
Untersuchungen zur Substitution von Zement durch zementgebundene Recyclingmaterialien  
Diplomarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung, 1999
- [19] Schönwetter, C.  
Untersuchungen zur Substitution von Zement durch aufbereiteten Betonabbruch  
Diplomarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung, 1999
- [20] Tischer, M.  
Vergleichende Messungen zum Schmelzverhalten  
Diplomarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung, 2000
- [21] Häge, C.; Schönwetter, C.  
Recherche zu Wärmedämmmaterialien  
Studienarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung, 1999
- [22] Wiersdorf, M.  
Vergleichende Messungen zum Schmelzverhalten  
Studienarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung, 2000
- [23] Diedrich, R.  
Baustoffkreislauf im Massivbau - Teilprojekt C 05  
Gesellschaft zur Aufbereitung von Baustoffen mbH Bremen, 1998
- [24] Moldan, D.  
Integrated Waste Management: Prevention, recycling and disposal  
Ciments, Bétons, Plâtres, Chaux – H. 2 S. 93-98, 1998