

Aufbereiten und Verwerten von Bauabfällen – Angebote aus der Forschung für die Praxis

Seit 10 Jahren werden an der Bauhaus-Universität die ingenieurwissenschaftlichen Grundlagen des Baustoffrecyclings gelehrt. Dazu gehören traditionelle Fächer wie Mechanische Verfahrenstechnik ebenso wie neue Lehrgebiete, die sich mit Abbruch- und Rückbauverfahren und Verwertungstechnologien beschäftigen. Bei den Verwertungstechnologien wird die gesamte Palette der im Bau verwendeten Baustoffe und Bauelemente vom Asphalt bis zu sortenreinen Ziegeln betrachtet. Es wird besonderer Wert darauf gelegt, nicht nur darauf einzugehen, was heute Stand der Technik ist, sondern aktuelle Forschungsergebnisse einzubeziehen. Eigene Entwicklungen und die laufende Auswertung der Fachliteratur sind deshalb essentiell für die Lehre an der Professur und geben gleichzeitig neue Ideen für die Forschung.

1 Anforderungen an Bauabfälle und daraus hergestellte Produkte

Technische Normen für Bauprodukte haben sich über einen langen Zeitraum entwickelt. Darin sind die Anforderungen festgehalten, welche die Sicherheit und Gebrauchsfähigkeit gewährleisten. Dagegen steht das Erarbeiten neuer Vorschriften für die bei der Produktherstellung anfallenden Abfälle oder die nach der Nutzung in den Abfall übergehenden Produkte, erst am Anfang. Im Wesentlichen werden bei diesem Prozess drei Schwerpunkte betrachtet:

- **Systematisierung und Klassifizierung von Abfällen:**
Die Anzahl der in einem Wirtschaftssystem anfallenden Abfälle ist mindestens so groß wie die Anzahl der Produkte. Ein sachgerechter Umgang macht deshalb eine Systematisierung erforderlich.
- **Standards für die Bewertung von Umweltauswirkungen:**
Darin sind die Gehalte von Schadstoffen fixiert, die in den aus Abfällen hergestellten Produkten zulässig sind. Liegen höhere Gehalte vor, muss eine Beseitigung, die keine Folgeschäden nach sich zieht, erfolgen.
- **Anforderungen an Produkte aus Bauabfällen**
Für die aus Abfällen hergestellten Produkte nimmt der Straßenbau eine Vorreiterrolle ein. So wurden bereits 1995 mit der TL RC-ToB [1] die Anforderungen an Rezyklate definiert. Neuere Vorschriften sind die DIN 4226-100 [2] und die Richtlinie zum Einsatz rezyklierter Zuschläge im Beton [3].

In der DIN 4226-100 werden die Rezyklate aus Bauabfällen nach drei Merkmalen beurteilt (Tabelle 1). In Bezug auf die Korngrößenverteilung gibt es die Unterscheidung zwischen Brechsanden und Splitten. Hinsichtlich der Bestandteile werden betonreiche und ziegelreiche Rezyklate unterschieden, wobei porosierte Ziegel überhaupt nicht berücksichtigt werden. Parallel dazu wird eine Einteilung nach dem Merkmal Rohdichte vorgenommen, welche die Leitgröße für eine Vielzahl von Eigenschaften darstellt.

Technische Regeln liegen für den Einsatz von Rezyklaten als Betonzuschläge [3] und als Tragschichtmaterial [4] vor. Die dort definierten stofflichen Anforderungen sind in der neuesten Fassung der Richtlinie identisch mit den Stoffgruppen der DIN 4226-100. Vereinfachend kann festgestellt werden, dass Splitt des Typs 1 und des Typs 2 als rezyklierter Zuschlag einsetzbar ist, während Gemische aus Brechsand

und Splitt der Typen 1 und 2 in Tragschichten des Straßenbaus Verwendung finden können. Für die Typen 3 und 4 gibt es bisher keine Empfehlungen für die Verwertung.

Tabelle 1: Anforderungen an rezyklierte Gesteinskörnungen nach DIN 4226

	DIN 4226-100: Rezyklierte Gesteinskörnungen			
	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4
	Betonsplitt/ Beton- brechsand	Bauwerksplitt/ Bauwerk- brechsand	Mauerwerk- splitt/Mauer- werkbrechsand	Mischsplitt/ Misch- brechsand
Bestandteile	[Masse-%]			
Beton und Gesteinskörnungen nach DIN 4226-1	≥ 90	≥ 70	≤ 20	≥ 80
Klinker, nicht porosierter Ziegel	≤ 10	≤ 30	≥ 80	
Kalksandstein			≤ 5	
Andere mineralische Beimengungen*	≤ 2	≤ 3	≤ 5	≤ 20
Asphalt	≤ 1	≤ 1	≤ 1	
Fremdbestandteile*	≤ 0,2	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 1
Kornrohichte	[kg/m ³]			
	≥ 2000	≥ 2000	≥ 1800	≥ 1500

Die gegenwärtige Verwertungspraxis der Rezyklate gemäß DIN 4226 – 100 ist dadurch gekennzeichnet, dass der Einsatz von Betonsplitt als rezyklierter Zuschlag im Beton nur in geringem Umfang realisiert wird, obwohl dieses Gebiet von Seiten der Forschung am intensivsten untersucht wurde. Neben betriebswirtschaftlichen Gründen sind die systematischen Eigenschaftsänderungen, die Betone mit rezyklierten Zuschlägen aufweisen (vgl. [5, 6]), die Hauptursache. So besteht Betonsplitt, der durch eine traditionelle Aufbereitung aus Altbeton erzeugt wurde, aus dem ursprünglichen Zuschlag und Zementstein. Er weist deshalb eine höhere Porosität als Primärzuschlag auf. Die erhöhte Porosität ist verantwortlich für eine Reihe von Qualitätsdefiziten von Betonsplitt – von der erhöhten Wasseraufnahme bis zur verminderten Frostbeständigkeit. Die Auswirkungen der erhöhten Porosität setzen sich im Beton fort. Wird beispielsweise die Druckfestigkeit betrachtet, für die die Porosität die wichtigste Einflussgröße ist, wirkt die erhöhte Porosität festigkeitsmindernd.

In Bezug auf die Sandfraktionen aller vier Rezyklat-Typen ist festzustellen, dass keine adäquaten Verwertungsmöglichkeiten bestehen. Ebenso ist die Verwertung der Rezyklate aus Mauerwerkbruch und mehr noch der gemischten Rezyklate nur in Einsatzgebieten mit niedrigem Niveau möglich.

Aus dieser Aufzählung ergibt sich ein Entwicklungsbedarf hinsichtlich von Aufbereitungsverfahren und Verwertungswegen für das Baustoffrecycling, der von uns aufgegriffen wurde. Als weitere Konsequenz folgt aus der DIN 4226 – 100, dass für die Rohdichte als Klassifizierungsmerkmal eine schnelle und zuverlässige Bestimmung wünschenswert wäre.

2 Aufschlusszerkleinerung

Die Bauschutttaufbereitung stützt sich im Wesentlichen auf die traditionellen Aufbereitungsverfahren. Diese Verfahren kommen an ihre Grenzen, wenn Verbundwerkstoffe aufbereitet werden sollen. Für diese Werkstoffe muss neben der Zerkleinerung ein Aufschluss realisiert werden, bei welchem die einzelnen Bestandteile freigelegt werden, um anschließend eine Trennung vornehmen zu können.

An der Entwicklung von Aufschlussverfahren für Beton, welche die Rückgewinnung zementsteinfreier Zuschläge erlauben, wird an verschiedenen Stellen [7-10] gearbeitet. Einen Beitrag zur Entwicklung solcher Verfahren stellen die Untersuchungen zur Schallimpulszerkleinerung von Beton dar.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass Leistungsschallimpulse als Werkzeug für die Zerkleinerung und den Aufschluss von Altbeton genutzt werden können. Ein Vergleich mit dem Aufschluss, der bei der Zerkleinerung in Backen- oder Prallbrecher erreicht wird, zeigt die Überlegenheit der Schallimpulszerkleinerung deutlich (Bild 1). Der höhere Aufschlussgrad bedingt allerdings einen höheren Energiebedarf. Bei den Laboruntersuchungen lag der Energieinput bei 44-80 J/g. Für die Zerkleinerung von Bauschutt in Brechern beträgt der Energiebedarf ca. 20 J/g. Eine solche Gegenüberstellung ist allerdings nur begrenzt aussagekräftig, weil das hier beschriebene Laborverfahren vom Maßstab und vom Entwicklungsstand her nicht mit einem großtechnischen Verfahren verglichen werden kann.

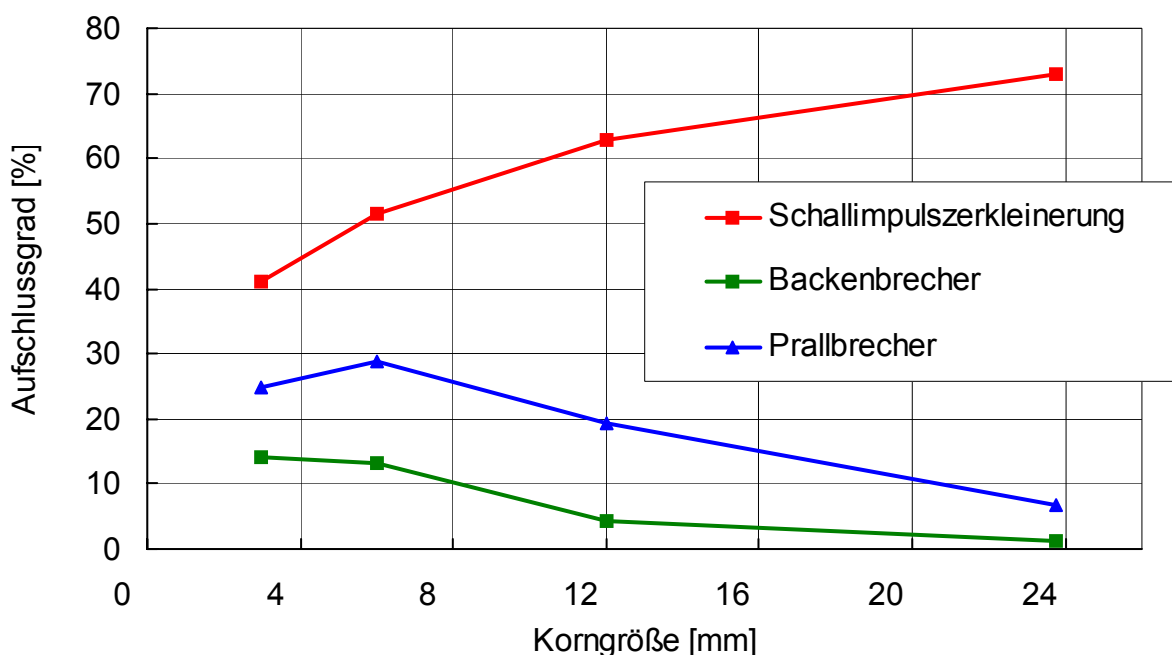


Bild 1: Aufschluss von Altbeton mit der Schallimpulszerkleinerung im Vergleich zu traditionellen Zerkleinerungsverfahren

Neue Herausforderungen an die Aufbereitung sind zu erwarten, wenn zukünftig Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) zu recyceln sind. In Anbetracht der Tatsache, dass WDVS bereits seit 50 eingesetzt werden und die Lebensdauer der WDVS auf maximal 60 Jahre schätzt wird, wird es in den nächsten 20 Jahren zu einer deutlichen Erhöhung des WDVS-Anfalls kommen. Bei kürzerer Lebensdauer – in

der aktuellen Literatur ebenso wie in den Erfahrungsberichten von Firmen und Prüfstellen werden 25 bis 30 Jahre angegeben – ist bereits in unmittelbarer Zukunft mit einer deutlichen Zunahme an WDVS-Abfällen zu rechnen.

- | | |
|------------------------|--------------------------------------|
| 1 – Wandaufbau | 5 – Dübel |
| 2 – Tragfähige Schicht | 6 – Gewebe |
| 3 – Verklebung | 7 – Voranstrich |
| 4 – Dämmung | 8 – Putz + Putzprofile + Dichtbänder |

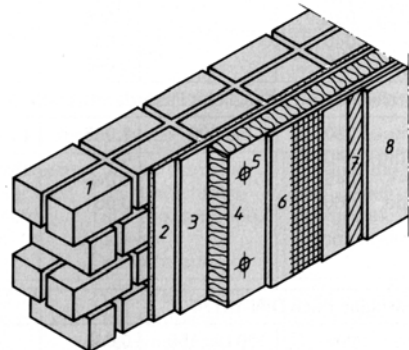


Bild 2: Exemplarischer Aufbau eines WDVS

Im Vergleich zu dem Verbundwerkstoff Beton bestehen bei der Aufbereitung von WDVS-Abfällen folgende Unterschiede:

- Die Anzahl der verbundenen Materialarten ist wesentlich höher, wodurch der Aufschluss und die Trennung erschwert werden.
- Die Grenzfläche zwischen den Materialien ist geringer. Ihr Zerkleinerungsverhalten ist unterschiedlich. Daraus können sich Vorteile ergeben.

In Vorbereitung auf diese Problematik ist daran gedacht, Verbundwerkstoffe im Hinblick auf ihre Aufbereitungsfähigkeit sowohl mit traditionellen Verfahren als auch mit der Schallimpulszerkleinerung zu untersuchen, um eine fundierte Einschätzung der Rezyklierbarkeit geben zu können.

3 Verwertung durch Feinmahlung

Ein Ansatz, der für die Sandfraktionen von Rezyklaten hochwertige Einsatzgebiete eröffnen kann, ist die Herstellung reaktiver Mehle, die auf Grund ihrer Eigenschaften als Bindemittelkomponente im Zement oder als reaktiver Füllstoff im Beton verwendbar sind. Dieser Ansatz basiert auf der Arbeitshypothese, dass durch die Feinmahlung die Reaktivität bestimmter Bestandteile geweckt werden kann: Bei Betonbrechsand kann das die Reaktivität von nicht vollständig hydratisierten Zementpartikeln sein. Bei Mauerwerkbruch können die puzzolanischen Eigenschaften von Ziegelpartikeln die Reaktivität bewirken.

In einer großen Anzahl von in Diplom- und Studienarbeiten durchgeführten Untersuchungen, deren Ergebnisse in [11] zusammengestellt sind, wurde der Einfluss von Materialart, Feinheit und Zusatzmenge im Labor und im Technikum untersucht. Für zusätzliche kleintechnische Untersuchungen wurden Sande aus Betonbruch und Mauerwerkbruch eingesetzt, die von einem Recyclingunternehmen bereitgestellt worden waren. Für die Mahlung kam die Kugelmahl-Sicht-Anlage zum Einsatz, die im Technikum des Lehrstuhls Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung betrieben wird. Es wurden Mineralmehle unterschiedlicher Feinheit erzeugt, aus denen Mischbindemittel mit 20 % Mineralmehlzusatz hergestellt wurden. Die Verarbeitbarkeit und die Festigkeit von Mörteln aus diesen Mischbindemitteln wurden in Anlehnung an die DIN EN 196 geprüft.

Als wichtige Aussage kann festgehalten werden, dass mit beiden Mehlen eine Verbesserung der Verarbeitbarkeit der Mörtel erzielt wurde, wenn eine bestimmte Feinheit überschritten wird. Die von Recyclingsanden durch die Porosität verursachte hohe Wasseraufnahme wird überwunden, wenn die Poren durch die Mahlung aufgeschlossen werden.

Die in Abhängigkeit von der mittleren Korngröße der Mehle erreichte Festigkeit (Bild 3) liegt für den gemahlene Betonbrechsand in der Größenordnung der Mörtel mit Inertstoffzusatz. Betonmehle entwickeln selbst bei Feinmahlung auf mittlere Korngrößen um 10 μm keine nennenswerte Reaktivität. Dagegen trägt das Mineralmehl aus Mauerwerkbrechsand zur Festigkeitsbildung bei. Die erzielten Festigkeiten liegen ab einer mittleren Korngröße von 25 μm über den Festigkeiten, die sich für den mit inertem Mineralmehl versetzten Zement ergeben.

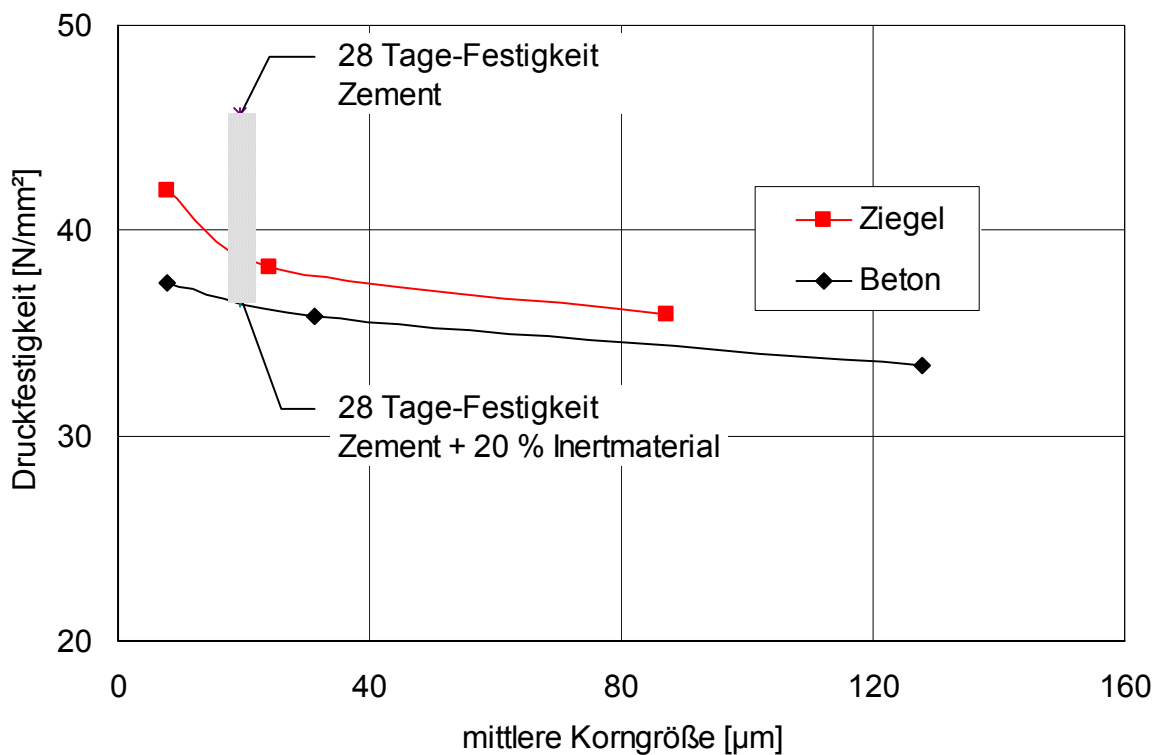


Bild 3: Druckfestigkeiten von Versatzzementen mit 20 % Beton- bzw. Mauerwerkmehl in Abhängigkeit von der mittleren Korngröße der Mehle

Für eine praktische Umsetzung der Idee „Verwertung durch Feinmahlung“ wird gegenwärtig die Herstellung von Mineralmehlen, die im Selbstverdichtenden Beton eingesetzt werden können, untersucht. Geplant ist auch, den Einsatz solcher Mehle in Selbsterhärtenden Tragschichten zu untersuchen. Dazu müssen die vorgelegten Ergebnisse durch weitere Forschungen auf eine breitere Basis gestellt werden. Zu beantworten sind Fragen wie

- Welche Qualitätsparameter, die am Ausgangsmaterial bestimmt werden können, ermöglichen die Auswahl geeigneter Sande?
- Wie hoch ist der Energieaufwand für die Mahlung im Vergleich zu den erreichbaren Effekten?

Konzepte für die notwendige Erweiterung der technischen Ausrüstung einer Recyclinganlage sollen entwickelt werden, um darauf aufbauend die Herstellungskosten ermitteln zu können.

Die Verwertung durch Feinmahlung könnte eine Variante für das Recycling von porierten Mauerziegeln darstellen, die in keinem der gegenwärtig dominierenden Verwertungswege eingesetzt werden können und in der DIN 4226-100 keine Berücksichtigung finden.

4 Verwertung durch Stückigmachen

Ausgangspunkt für diese Entwicklung war die Überlegung, für die Sandfraktionen der Bauabfallarten Porenbetonbruch und Mauerwerkbruch, für die bisher Defizite hinsichtlich der Verwertungsquote und des Verwertungs-niveaus bestehen, Möglichkeiten der gemeinsamen, hochwertigen Verwertung zu finden. Es sollten Rezepturen und Technologien zur Herstellung geblähter Granulate, die als Leichtzuschlag für Beton oder in konstruktiven Leichtschüttungen eingesetzt werden können, entwickelt werden.

Für die Untersuchungen wurde Mauerwerkbruch der Fraktion 0/4 mm von einem Recyclingunternehmen verwendet. Als zweite Komponente wurde Porenbetonsand eingesetzt. Die chemische Zusammensetzung (Tabelle 2) zeigt die typischen Unterschiede zwischen den beiden Ausgangsmaterialien. Im Mauerwerkabbruch ist das Al_2O_3 nach dem SiO_2 die Komponente mit dem höchsten Gehalt. Im Porenbetonbruch ist dagegen das CaO die nach dem SiO_2 dominierende Komponente.

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung der Rohstoffkomponenten

	Gehalt [%]							
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	Glühverlust
Porenbetonabfall	43,6	3,6	1,7	30,1	0,8	0,5	1,9	15,1
Mauerwerkabfall	56,1	15,7	5,8	5,0	2,8	0,9	3,5	2,6

Der technologische Ablauf der Granulatherstellung beginnt mit der getrennten Mahlung und der Ausgangsmaterialien Mauerwerkbruch und Porenbetonabfall auf Korngrößen $< 100 \mu m$. An die Mahlung schloss sich die Mischung der Komponenten unter Zugabe des Blähmittels - geeignet waren z.B. SiC-Rückstände - und die Granulierung an. In dem nachfolgenden thermischen Prozess wurde das Granulat aufgebläht und verfestigt.

In Vorversuchen wurde die Eignung von $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, NaCl, Rübenzucker, Koks-pulver und Siliciumcarbid als Blähmittel getestet. Die auf $< 100 \mu m$ zerkleinerten Materialien wurden den gemahlten Ausgangsstoffen in einem Anteil von 3 % zugegeben. Um die Wirkung der Blähmittel zu beurteilen, wurden die Kornrohdichten der gebrannten Granalien mit denen der Grüngranalien verglichen. Ein deutlicher Unterschied ergab sich, wenn SiC als Blähmittel verwendet wurde. In den weiteren Untersuchungen wurde deshalb nur dieses Blähmittel verwendet.

Die Untersuchungen wurden zunächst im Labormaßstab durchgeführt, um Einflüsse der Rezeptur und der Brennbedingungen auf die Eigenschaften der Granalien zu ermitteln. Anschließend wurde im Technikumsmaßstab eine größere Menge

Granulat hergestellt, um damit Leichtbetonblöcke in einem Betonwerk herstellen zu können.

Es konnte nachgewiesen werden, dass sich die Sandfraktionen von Mauerwerkabbruch und Porenbeton als Rohstoffe für die Herstellung von Leichtzuschlägen eignen. Der Anteil des Mauerwerkmehl im Gemisch kann bis zu 100 % betragen, während der Anteil an Porenbetonmehl 30 % nicht übersteigen sollte. Die Rohdichten der Granulate bewegen sich zwischen $0,53$ und $1,80 \text{ g/cm}^3$. Die Rohdichten der Ausgangsmaterialien betragen $1,85 \text{ g/cm}^3$ für den Mauerwerkbruch und $0,64 \text{ g/cm}^3$ für den Porenbeton.

Im Bild 4 ist die Herausbildung polyedrischer Poren in Granalien mit unterschiedlichen Blähmitteldosierungen dargestellt. Leichte Granalien mit einer Rohdichte von $0,62 \text{ g/cm}^3$ entstehen, wenn die Blähmittelzugabe 3 M.-% beträgt. Dichte Granalien entstehen, wenn ganz auf die Blähmittelzugabe verzichtet wird. Durch die Dosierung des Porosierungsmittels können die Granulate also an die gestellten Aufgaben angepasst werden.

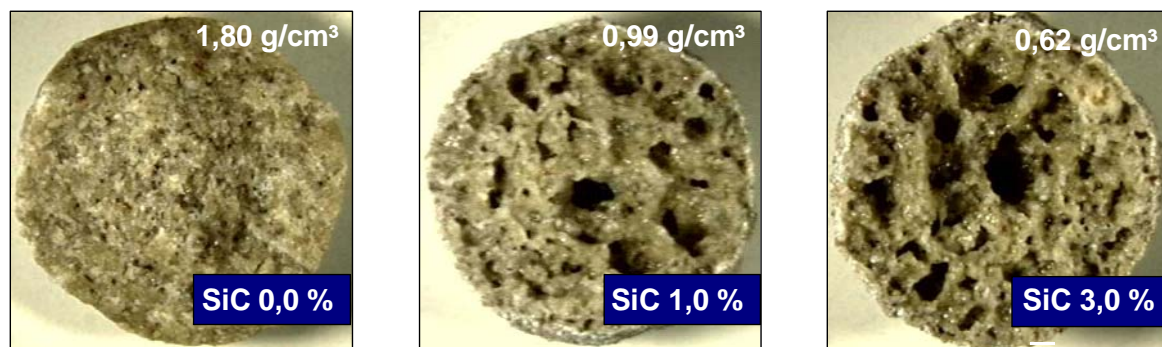


Bild 4: Ausbildung der Poren in Granulaten auf der Basis von Gemischen aus Mauerwerkabbruch und Porenbetonabfall

Beim Recycling von Bauabfällen ist die strikte Abhängigkeit der Produktqualität von der Qualität des Ausgangsmaterials oftmals typisch. In dem aufgezeigten Verwertungsweg für Mauerwerkbruch wird diese Abhängigkeit deutlich reduziert, wenn nicht vollständig aufgehoben. Aus einem feinkörnigen, gemischten Material mit schwankender Qualität wird ein homogenes Produkt mit definierter Korngröße und Zusammensetzung hergestellt.

5 Optoelektronische Dichtemessung

Die Qualitätsüberwachung von Rezyklaten erfordert u.a. die Messung der Korngrößenverteilung, der Kornform/Bruchflächigkeit und der Rohdichte mit erhöhter Prüfhäufigkeit. Für die Bestimmung der Korngrößenverteilung und der Kornform sind

optische Partikelmessungen mittels digitaler Bildanalyse in der Lage, eine parallele Ermittlung beider Größen in Analogie zur traditionellen Sieb- und Kornformanalyse zu gewährleisten. Damit ist eine Verringerung des Aufwands für die Qualitätsüberwachung möglich, die noch deutlich gesteigert werden kann, wenn die Rohdichte als weiteres Qualitätsmerkmal im gleichen Messvorgang erfasst werden könnte.

Vorraussetzungen dafür sind, dass das Volumen der Rezyklate mittels optischer Messungen genau genug bestimmt werden kann und dass eine Wägung der Rezyklate in den Messablauf integriert werden kann.

Erste experimentelle Untersuchungen zur optischen Volumenbestimmung wurden mit dem Messgerät HAVER CPA 4-2MB Real Time durchgeführt. Bei diesem Gerät werden die Konturen der Partikel mit einer Zeilenkamera erfasst und daraus die Korngröße sowie mehrere Kornformparameter berechnet. Mit den Untersuchungen sollte zunächst die prinzipielle Möglichkeit erkundet werden, ob durch eine optische Messung mit einer Kamera die Chance besteht, das tatsächliche Volumen zu bestimmen. Die Ergebnisse weisen aus, dass bei kantigen Körpern das optisch bestimmte Volumen über dem tatsächlichen liegt. Bei gerundeten Formen, wie sie beispielsweise für Kiese typisch sind, gibt es dagegen eine gute Übereinstimmung.

In der Literatur wird über die optische Erfassung von Korngröße und -form mit drei, orthogonal angeordneten Kameras berichtet [12]. Trägt man die dort angegebenen, optisch bestimmten Kornvolumina über die Volumina auf, die aus der für jedes Korn bestimmten Masse und der Rohdichte der Gesamtprobe berechnet werden können, ergibt sich der im Bild 5 dargestellte Zusammenhang.

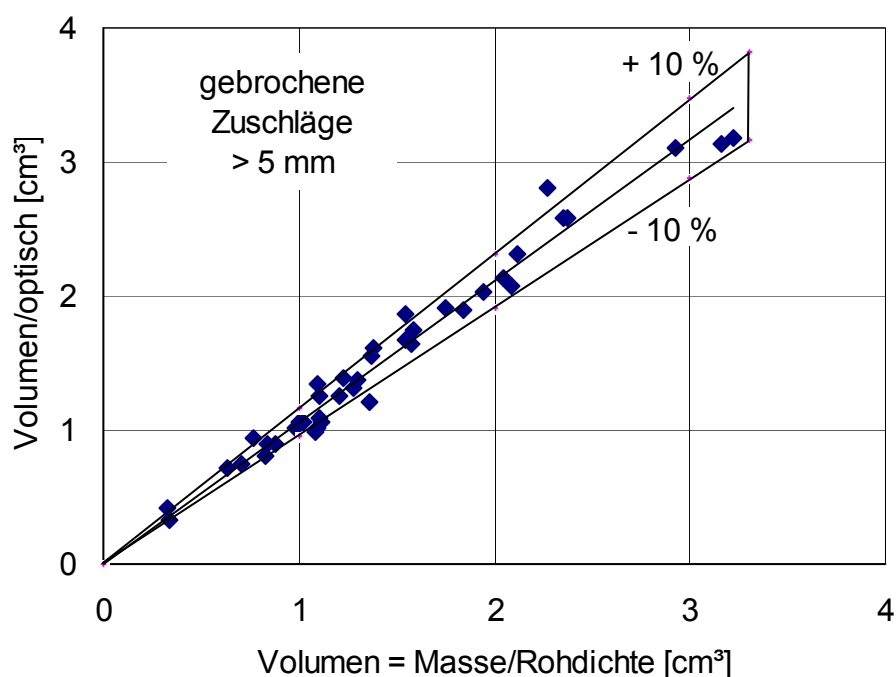


Bild 5: Gegenüberstellung von optisch bestimmten Kornvolumina und Kornvolumina aus Kornmasse und Rohdichte nach [12]

Bis auf wenige Ausnahmen liegen alle Messwerte in dem markierten Bereich von $\pm 10\%$ Abweichung. Für eine klare Unterscheidung zwischen Rezyklaten des Typs 1 der DIN 4226-100 mit einer Rohdichte von 2000 kg/m^3 und des Typs 3 mit 1800 kg/m^3 ist diese Abweichung noch nicht akzeptabel. Allerdings geht in diese Abweichung auch der Fehler der berechneten Volumina ein, da sich die für die Berechnung verwendete Rohdichte der Gesamtprobe von der tatsächlichen Rohdichte der einzelnen Körner unterscheiden kann. Wenn dieser Fehler eliminiert wird, erscheint es realistisch, dass Abweichungen von unter $\pm 5\%$ erreicht werden können. Damit

könnte auf der Basis der optischen Partikelmessung mittels digitaler Bildanalyse ein Verfahren entwickelt werden, mit welchem Korngrößenverteilungen, Kornformparameter und Rohdichten in einem Arbeitsgang gemessen werden können.

6 Ausblick

Bei der Wiederverwertung von Bauabfällen ist in Deutschland bereits Beachtliches erreicht, wenn die Menge, die verwertet wird, betrachtet wird. Vom Verwertungs-niveau her sind die bevorzugten Einsatzgebiete bisher wenig anspruchsvoll. Besonders für die Bauabfälle aus dem Hochbau ist eine geschlossene Kreislaufführung bei Weitem noch nicht erreicht.

Bisher wird im Wesentlichen versucht, natürliche Baustoffe durch Rezyklate zu ersetzen. Eigenständige, originelle Lösungswege, welche die besonderen Eigenschaften von Bauabfällen bzw. deren Bestandteilen bewusst nutzen, fehlen. Forschungsprojekte auf diesem Sektor, wie die Herstellung technogener Substrate aus Ziegelabfällen oder die Granulatherstellung aus gemischten Abfällen leisten einen Beitrag zur Produktentwicklung, welche gemeinsam mit Unternehmen der Recyclingbranche fortgeführt und ausgebaut werden sollte.

Literatur

- [1] Technische Lieferbedingungen für Recycling-Baustoffe in Tragschichten ohne Bindemittel – TL RC-ToB 95. Ausgabe 1995.
- [2] DIN 4226-100, Gesteinskörnungen von Beton und Mörtel, Teil 100. Rezyklierte Gesteinskörnungen. DIN-Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth-Verlag, Berlin 2002.
- [3] 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. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton 2003.
- [4] Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau - TL Gestein-StB, derzeit in Vorbereitung / Druck.
- [5] Roos, F.: Ein Beitrag zur Bemessung von Beton mit Zuschlag aus rezyklierter Gesteinskörnung nach DIN 1045-1, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen, Technische Universität, Dissertation, 2001.
- [6] Müller, A.: Baustoffkreisläufe - Stand und Entwicklung, ibausil, Weimar, 2003, pp 1289-1308.
- [7] Kasai, Y.: Recent status of the production and reuse of demolished concrete in Japan. Persönliche Mitteilung 1997.
- [8] Yanagibashi, K.: A new concrete recycling technique for coarse aggregate regeneration process. Sustainable Concrete Construction. Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK, September 2002, S.

511 – 522.

- [9] Li, B.; Hiroyuki, M.; Takao, U.: Recycled aggregate from demolished concrete using heat-treatment and rubbing method. Proceedings of the 5th International Symposium on the Cement and Concrete, Shanghai, China, 28. Okt. – 1. Nov. 2002, S. 803 – 810.
- [10] Mulder, E.; Blaakmeer, J.; Nijland, T.; Tamboer, L.: Closed Material Cycle for Concrete as a Part of an Intergrated Process for the Reuse of the Total Flow of C&D Waste. Proceedings of the International Conference „Challenges of Concrete Construction“: Sustainable Concrete Construction, Dundee (Scotland), 9 - 11 September 2002, S. 555 – 562.
- [11] Müller, A.; Lander, S.; Stark, U.: Bauabfallverwertung durch Feinmahlung. Ratgeber Abbruch & Recycling 3/2001, S. 70 – 80.
- [12] Tutumluer, E. Rao, C.; Stefanski, J.A.: Video image analysis of aggregates. Department of Civil and Environmental Engineering; University of Illinois at Urbana-Champaign; Urbana, Illinois; July 2000.

Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. habil. Anette Müller
Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung
Bauhaus-Universität Weimar
Coudraystrasse 7, 99421 Weimar
e-mail: anette-m.mueller@bauing.uni-weimar.de
Tel.: 03643/584606