

Aufbereiten und Verwerten von Bauabfällen – aktueller Stand und Ausblick

1 Entstehung von Bauabfällen

Der Abbruch von Bauwerken kann vereinfacht darauf zurückgeführt werden, dass sich während des Lebenszyklus eines Bauwerks einerseits Verschleißerscheinungen einstellen und/oder Veränderungen der technischen Anforderungen auftreten. Andererseits ergibt sich in der Regel im Laufe von im Mittel 80 Jahren Bauwerkslebensalter ein grundlegender Wandel der gesellschaftlichen Ansprüche. Während die Aspekte von Verschleiß bzw. technischen Anforderungen nicht zum Abbruch führen müssen, sondern mit Instandhaltung und Ertüchtigung kompensiert werden können, sind veränderte Ansprüche der Nutzer oftmals das Ende von intakten Bauwerken. Zwei Beispiele sollen hier genannt werden:

- Stadien sind heute keine reinen Sportstätten, sondern Zentren für Unterhaltung, Geschäftskontakte, Einkauf und vieles mehr. Die Folge ist, dass abgerissen und umgebaut wird. Das betrifft Stadien mit einer 80jährigen Geschichte wie das Wembley-Stadion ebenso wie Stadien [1], die erst Mitte der 70er Jahre gebaut oder umgebaut wurden und von denen Betonbruchstücke heute als Souvenirs angeboten werden (Bild 1 links).
- Wohnungen in Plattenbauweise erfüllen nicht mehr die heutigen Ansprüche an Wohnqualität. Als Folge entstanden nach 1990 neue Wohnungen, was zusammen mit der Bevölkerungsentwicklung, der Bevölkerungswanderung etc. einen Leerstand von ca. 10 % (1999) der Wohnungen in Plattenbauten bewirkt hat mit steigender Tendenz [2]. Diese Bauten werden jetzt per Abbruch vom Markt genommen (Bild 1 rechts).



Bild 1: Abbruchbeton eines Stadions als Souvenir (links), Abbrucharbeiten an Plattenbauten (rechts)

Es ließen sich noch extreme Beispiele anführen, wo Bauwerke nach einer Nutzungsdauer von weniger als 10 Jahren oder noch vor ihrer Fertigstellung auf Grund veränderter gesellschaftlicher Randbedingungen abgerissen wurden. Einige Fallbeispiele sind in der Literatur [3,4] beschrieben.

Obwohl an dieser Stelle nicht mit systematischen Untersuchungen belegt, zeigen diese wenigen Beispiele, dass sich die Lebenszyklen von Bauwerken zunehmend verkürzen. Das hat Konsequenzen für die entstehende Menge an Bauabfällen und deren Zusammensetzung. Gerade in Bezug auf die Zusammensetzung kann eine Zunahme des Betonanteils prognostiziert werden. Außerdem sind durch den Einsatz von „Intelligenten Baustoffen“, die in der Regel Verbundwerkstoffe sind, neue Herausforderungen zu erwarten.

2 Aufbereitung von Bauabfällen

2.1 Aktueller Stand

Die Aufbereitung hat die Aufgabe, aus dem Sekundärrohstoff Bauabfall einen Recycling-Baustoff mit definierter Korngrößenzusammensetzung und definierter Stoffzusammensetzung zu erzeugen. Die gegenwärtig eingesetzten Techniken sind vor allem darauf ausgerichtet, die Korngrößenzusammensetzung durch eine Zerkleinerung den jeweiligen Anforderungen anzupassen. In mobilen Anlagen übernehmen i.d.R. Prallbrecher diese Aufgabe, während in stationären Anlagen die Zerkleinerung teilweise auch zweistufig mit einem Backenbrecher als Vorbrecher und einem Prallbrecher als Nachbrecher erfolgt.

Wesentlich schwieriger ist es, zu einer definierten Stoffzusammensetzung zu kommen. Das wird deutlich, wenn die in Tabelle 1 dargestellten Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung entsprechend der DIN 4226-100 den summarischen Zusammensetzungen von zwei Referenzbauwerken (Tabelle 2) gegenübergestellt werden. So liegt der Anteil an Fremdbestandteilen in den Bauwerken deutlich über den Grenzwerten. Die Anforderungen an den Betongehalt für eine rezyklierte Gesteinskörnung nach Typ 1 der DIN 4226-100 können selbst von den Plattenbauten streng genommen ohne Selektion nicht erfüllt werden.

Tabelle 1: Anforderungen an rezyklierte Gesteinskörnungen nach DIN 4226-100 [5]

	DIN 4226-100: Rezyklierte Gesteinskörnungen			
	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4
	Betonsplitt/ Betonbrech- sand	Bauwerksplitt/ Bauwerk- brechsand	Mauerwerk- splitt/Mauer- werkbrechsand	Mischsplitt/ Mischbrech- sand
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 wie porosierter Ziegel, Leichtbeton, haufwerksporiger Beton, Putz, Mörtel, poröse Schlacken, Bimsstein	≤ 2	≤ 3	≤ 5	≤ 20
Asphalt	≤ 1	≤ 1	≤ 1	
Fremdbestandteile wie Glas, NE- Metallschlacke, Stückgips, Gummi, Kunststoff, Metall, Holz, Pflanzen- reste, Papier, Sonstiges	≤ 0,2	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 1
Kornrohddichte	[kg/m ³]			
	≥ 2000	≥ 2000	≥ 1800	≥ 1500

Tabelle 2: Stoffliche Zusammensetzung von zwei Referenzgebäuden

Stoffgruppen nach DIN 4226-100	„Hypothetisches Durchschnittsgebäude“ nach DOKA [6]		P 2 Standardgebäude in Plattenbauweise [7]	
	Masse-%			
Beton	69,9		86,6	
Ziegel	18,1		-	
Kalksandstein	-		-	
Andere mineralische Bestandteile (siehe Tabelle 1)	3,9	Σ(Innenputz +Außenputz)	7,0	Σ(Schlackensand +Terrazzo)
Asphalt	-		-	
Fremdbestandteile (siehe Tabelle 1)	8,1	Σ(Gips+Glas+Stahl +Kunststoffe+Holz +Elektrokabel)	6,4	Σ(Gips+Glas+Stahl +Mineralwolle+Kamelit +Dämmstoffe+PVC)

In den Ablauf der Bauschutttaufbereitung muß also eine Sortierung einbezogen werden. Dabei können unterschiedliche Wege beschrrieben werden (Bild 2):

- In-place-Sortierung: Die Trennung der Materialien erfolgt vor Ort. Zunächst werden zugängliche Fremdbestandteile und Wertstoffe kontrolliert rückgebaut, um so das Bauwerk wieder in einen rohbauähnlichen Zustand zurückzusetzen. Anschließend erfolgt der Abbruch. Bei Bauwerken mit geringerem Ausbaugrad kann ein selektiver Abbruch ohne vorgelagerte Demontagestufen erfolgen, wobei mindestens eine Sortierung in die Materialarten Betonbruch, Mauerwerkbruch, Metalle, Holz vorgenommen wird.
- In-plant-Sortierung: Der Abbruch erfolgt ohne Selektion. Die Trennung der Materialarten erfolgt im Zuge der Aufbereitung. Diese Vorgehensweise ist unter technischen Gesichtspunkten immer dann erforderlich, wenn die zu trennenden Komponenten vor der Sortierung durch eine Zerkleinerung aufgeschlossen werden müssen.

Welche Vorgehensweise zu bevorzugen ist, hängt von dem Gebäudetyp, den Abmessungen des Gebäudes, den verwendeten Baustoffarten, den Platzverhältnissen etc. ab. Die Demontage von umweltrelevanten Schadstoffen und bautechnischen Störstoffen vor dem Abbruch ist in jedem Fall erforderlich.

Die in stationär betriebenen Recyclinganlagen angewandten Sortierverfahren leiten sich aus traditionellen Verfahren der Rohstoffaufbereitung ab oder sind spezielle Weiterentwicklungen für das Recycling [8-18]. Bei aller Unterschiedlichkeit der Verfahren, über die Tabelle 3 einen Überblick gibt, wird bei der Mehrzahl auf die Dichte als Sortiermerkmal zurückgegriffen. Die Abhängigkeit der Sinkgeschwindigkeit eines Feststoffkorns in einem fluiden Medium von seiner Masse wird genutzt, um Körner gleicher Größe nach der Dichte zu trennen. Bei nassmechanischen Sortierverfahren werden zusätzliche Effekte wie Aufschwimmeffekte, Filmströmungen und Schichtungerscheinungen in pulsierenden Strömungen einbezogen.

Mit trockenen Sortierverfahren lassen sich hauptsächlich leichte Störstoffe abtrennen. Bei nassen Verfahren liegen die Trenndichten im Bereich von 1200 kg/m³ bis über 2000 kg/m³. Bei ausreichenden Dichteunterschieden könnten also auch mineralische Komponenten getrennt werden. Die Untersuchungen von MESTERS und KURKOWSKI [18] mit einer Setzmaschine zeigten allerdings, dass aus einem Mauerwerkbruch, der aus Beton, Ziegel, Holz und Leichtstoffen bestand, nur die Leichtstoffe und das Holz wirkungsvoll abgetrennt werden konnten. In Bezug auf Beton und Ziegel war die erreichte Trennung nicht zufriedenstellend.

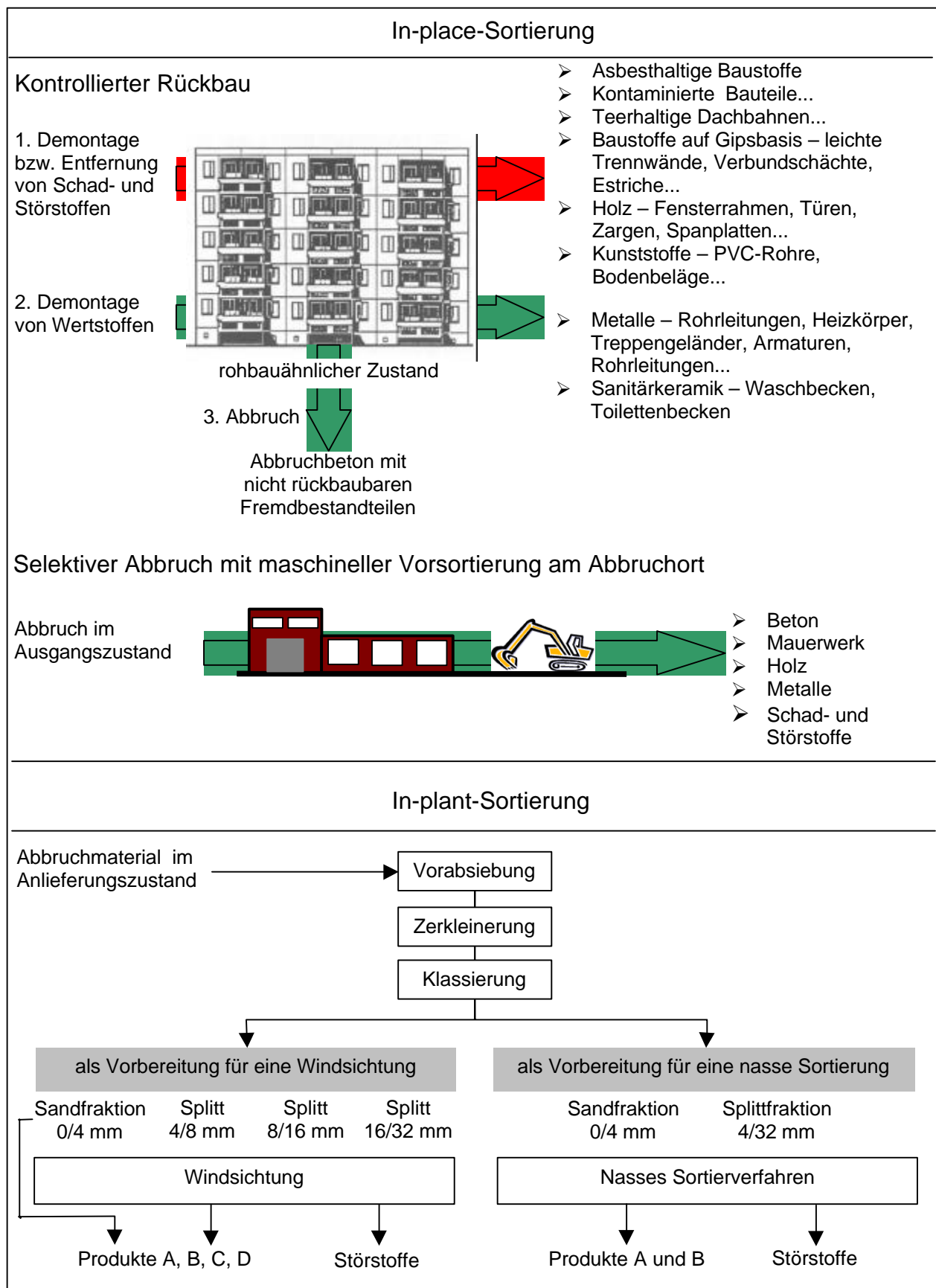


Bild 2: Einordnung von Sortiervorgängen in den Gesamtprozess der Bauschuttgewinnung und -aufbereitung

Tabelle 3: Verfahrensmerkmale und Ausführungsbeispiele von Sortierverfahren

Trockene Sortierverfahren	Nasse Sortierverfahren
Verfahrensmerkmale <ul style="list-style-type: none"> – Abtrennung leichter Störstoffe mit Dichten < 300 kg/m³ – enge Klassierung des Materials erforderlich – Fraktion 0/4 mm bzw. 0/8 mm kann nicht sortiert werden – Abluftreinigung erforderlich 	Verfahrensmerkmale <ul style="list-style-type: none"> – Stofftrennung im Dichtebereich ab 1200 kg/m³ – Klassierung des Materials in die Sand- und Splittfraktionen ausreichend – Abwasserreinigung und Wasserkreislauf erforderlich
Ausführungsbeispiele <ul style="list-style-type: none"> – Windsichtung in Gegenstrom-, Querstrom- oder Zick-Zack-Sichtern [9,10] – Siebmaschinen mit Störstoffausblasung [11,12,13] 	Ausführungsbeispiele <ul style="list-style-type: none"> – Filmschichtsortierung mittels Hydrobandscheider oder Hydrotrommelscheider [8,14,15] – Schwimm-Sink-Sortierung in Schrägradscheidern oder Leichtstoffscheidern [8] – Schnecken-Aufstrom-Sortierer [8] – Setzmaschinen [16,17,18]

2.2 Entwicklungen zur Aufschlusszerkleinerung

Unter Aufschließen wird in der Primärrohstoffaufbereitung das Freilegen der Wertstoffminerale aus ihren Verwachsungen mit anderen Mineralen verstanden, was in der Regel durch eine Zerkleinerung erfolgt. Bei der Bauabfallaufbereitung werden durch eine Aufschlusszerkleinerung Materialverbünde getrennt. Es können mindestens drei Typen von Verbundbaustoffen unterschieden werden. Beton steht für einen Baustoff mit näherungsweise isotropem Gefüge. Mauerwerk kann als Schichtenverbund aufgefasst werden. Als Beispiel für einen oberflächenbeschichteten Werkstoff können Gipskartonplatten angesehen werden.

Für die Aufschlusszerkleinerung von Beton eignet sich die elektrohydraulische Zerkleinerung, die in einem nachfolgenden Beitrag beschrieben wird. Die Trennung von Zuschlag und Zementsteinmatrix wird bei diesem Verfahren durch direkt an der Phasengrenzfläche wirkende Kräfte erreicht. Bei herkömmlichen mechanischen Verfahren kann eine solche gezielte, lokal wirkende Beanspruchung nicht verwirklicht werden. In der Literatur werden deshalb zweistufige Verfahren für die Erzeugung von zementsteinarmen Sekundärzuschlägen aus Abbruchbeton vorgeschlagen. Bei diesen Verfahren erfolgt nach einer traditionellen Zerkleinerung eine Beanspruchung der Brechprodukte durch Abrasion. Dadurch wird auf den Kornoberflächen anhaftender Zementstein entfernt. Auf den Bildern 3 und 5 sind verschiedene Aggregate, die auf japanische Quellen zurückgehen [19,22], dargestellt. In der Waschtrommel entsprechend Bild 3 werden grobe Zuschläge behandelt, die nach dem Abrasionsvorgang eine Kornrohichte von 2,52 g/cm³ und eine Wasseraufnahme von 3 % aufweisen. Die Parameter des Ausgangsmaterials sind nicht angegeben. Nach einem ähnlichen Prinzip arbeitet die Friktionstrommel im Bild 4, die Mitte der 80er Jahre für die Rundung von gebrochenen Zuschlägen oder die Entfernung von Lehmanbackungen auf den Oberflächen von Kieskörnern entwickelt wurde [20,21], also nicht unmittelbar für den Aufschluss von Altbetonzuschlägen. Das Material und Wasser

(ca. 0,4 m³/t Material) werden der Trommel aufgegeben. Das Material wird in dem Spalt zwischen der Trommel und dem exzentrisch gelagerten Rotor, der sich gegenläufig zur Trommel dreht, beansprucht. Dadurch kommt es zu einer selektiven Zerkleinerung von weniger festen Oberflächenanhaftungen oder porösen Körnern wie im Bild 4 dargestellt.

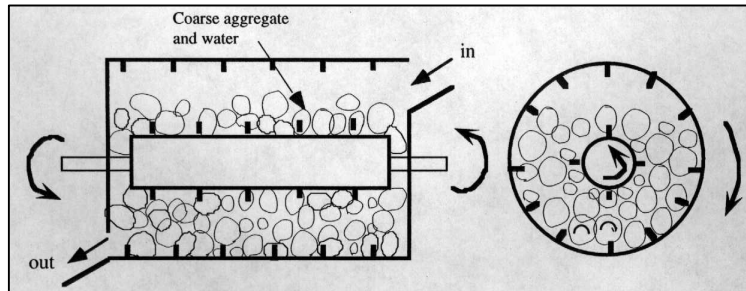


Bild 3: Trommel zur Abrasionsbehandlung von Zuschlägen aus Abbruchbeton nach [19]



Bild 4: Friktionstrommel nach [20,21]

Bild 5 zeigt ein großtechnisch erprobtes, trockenes Verfahren, bei dem die Abreinigung eines im Backenbrecher zerkleinerten Altbetons in einem kegelbrecherähnlichen Aggregat erfolgt, dessen Spaltweite allerdings deutlich über der Aufgabekorngröße liegt [22]. Die Beanspruchung erfolgt im Spalt zwischen dem äußeren Mantel und dem exzentrisch gelagerten Rotor, der zusätzlich vibriert. Die Rohdichte der aufgeschlossenen Recycling-Zuschläge aus Altbeton liegt zwischen 2,4 und 2,53 g/cm³. Sie ist nur 2,3 bis 4 % geringer als die Rohdichte der zur Betonherstellung verwendeten Orginalzuschläge. Aussagen zum verbleibenden Zementsteingehalt werden nicht gemacht. Die Qualität der Betone, die mit den aufgeschlossenen Zuschlägen > 5 mm hergestellt wurden, unterscheidet sich praktisch nicht von der der Referenzbetone mit natürlichen Zuschlägen.

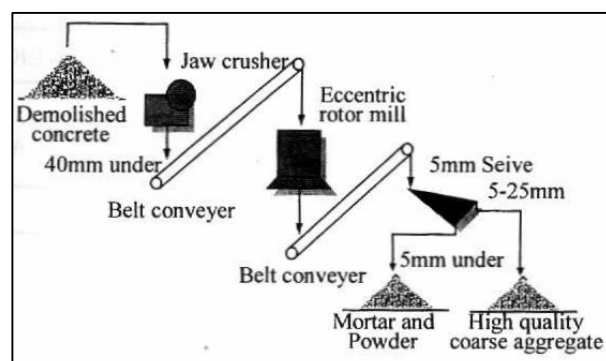
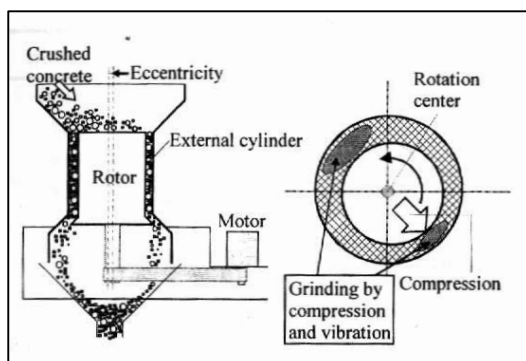


Bild 5: Exzentrische Rotormühle für den Aufschluss von Altbeton (links) und Verfahrensschema für die Herstellung hochwertiger Zuschläge (rechts) nach [22]
Eine weitere Gruppe von Aufschlussverfahren bezieht eine thermische Vorbehandlung bei 750 °C [23] bzw. 500 °C [24] ein. Durch diese Vorbehandlung werden die Bindungskräfte der Zementsteinmatrix soweit abgebaut, dass diese leicht entfernt werden kann. In [24] wird experimentell nachgewiesen, dass sich die Rohdichte und die Wasseraufnahme der groben, rezyklierten Zuschläge nach der thermischen Behandlung nur wenig von den Werten der Originalzuschläge unterscheiden.

2.3 Entwicklungen zur Sortierung

Wie eingangs dargestellt, ist mit den bei der Bauschutttaufbereitung eingesetzten Sortierverfahren die Abtrennung leichter Störstoffe möglich. Für die Trennung der verschiedenen Bauschuttbestandteile sind sie nur bedingt geeignet, weil das Trennmerkmal Rohdichte sich in einem zu engen Bereich bewegt. Durch Veränderungen oder Anpassungen der Setzmaschinenteknik wird versucht, die Trennergebnisse zu verbessern. Darüber wird in zwei nachfolgenden Beiträgen berichtet.

Einen auf die Klauerverfahren zurückgehenden Ansatz haben die detektierenden Sortierverfahren, die im Zusammenhang mit der Abfallaufbereitung entwickelt wurden und zunehmende Verbreitung erfahren. Bei der optoelektronischen Sortierung als einer Verfahrensvariante wird das Aufgabegut, das eine bestimmte Mindestkorngröße nicht unterschreiten darf, als in seine Einzelpartikel aufgelöster Gutstrom an einer CCD-Zeilenkamera vorbeigeführt. Die Signale der Kamera werden von einem Computer im Hinblick auf die optischen Sortiermerkmale wie Helligkeit, Transparenz, Echtfarben, Korngröße und Kornform analysiert. Die Abtrennung bestimmter Körner erfolgt über pneumatisch betriebene Ausblaseeinheiten, die von dem Prozesscomputer gesteuert werden.

In Bezug auf die Bauschutt-sortierung sind bisher keine Anwendungen von optoelektronischen Sortierverfahren beschrieben worden. Erste eigene Testreihen mit zwei unterschiedlichen Ausgangsmaterialien ergaben gute Resultate. So ergab die Sortierung von Sanitärkeramikscherven, die bewusst mit weißen Störstoffen aus Kunststoffen, Silikon etc. sowie mit anderen Fremdbestandteilen versetzt wurden, ein Produkt mit einer Sortenreinheit von 99,8 %. Der Abweistrom bestand überwiegend aus den genannten Störstoffen und enthielt daneben aber auch noch Sanitärkeramik.



Bild 6: Ergebnis einer Probesortierung von Sanitärkeramikscherven: Produkt mit nachträglich händisch aussortierten Fremdbestandteilen (links)

Ebenso gelang die Trennung von Modellgemischen aus Beton und Ziegel wesentlich überzeugender als mit traditionellen Sortierverfahren.

3 Verwerten von Bauabfällen

3.1 Aktueller Stand zu Anfallmengen, Verwertungsquoten und Einsatzgebieten

Angaben zum Aufkommen an Bauabfällen können den regelmäßig vorgelegten Monitoringberichten des Bundesverbandes der Deutschen Recycling-Baustoff-Industrie entnommen werden. Der aktuelle Bericht [25] weist aus, dass in Deutschland im Jahre 1998 insgesamt ca. 80 Mio. t Bauabfälle anfielen, die zu über 70 % verwertet wurden. Mit dieser hohen Verwertungsquote werden Zielvorgaben der Europäischen Union bereits erfüllt, allerdings bei z.T. recht niedrigem Verwertungs niveau.

Angaben zu dem Aufkommen der einzelnen Stoffgruppen, die im Bauabfall enthalten sind, gehen aus den Bilanzen nur für die vergleichsweise homogenen Abfälle Ausbauasphalt und (Beton)-Straßenaufbruch hervor (Tabelle 4), für die auch die höchsten Verwertungsquoten erreicht werden.

Tabelle 4: Aufkommen an Bauabfällen, Mengen der daraus hergestellten Recycling-Baustoffe und Verwertungsquoten für 1999 [26]

	Aufkommen [Mio. t/a]	Verwertung	
		[Mio. t/a]	[%]
Ausbauasphalt	15	15	100
Straßenaufbruch	28	27	96
Bauschutt	45	29	64
Baumischabfälle	12	4	33

In der Kategorie Bauschutt, die mit 45 Mio. t die größte Abfallfraktion ist, sind Beton- und Mauerwerkbruch zusammengefaßt. Der Bauschutt stammt nach den von Krass [26] regelmäßig durchgeführten Umfragen zu Anfall- und Verwertungsmengen zu je einem Drittel aus dem Straßenbau und aus dem Hochbau, das restliche Drittel kommt aus nicht genau zu identifizierenden Quellen. Bei den Einsatzgebieten zeigte sich wiederum eine Drittelung (Bild 7).

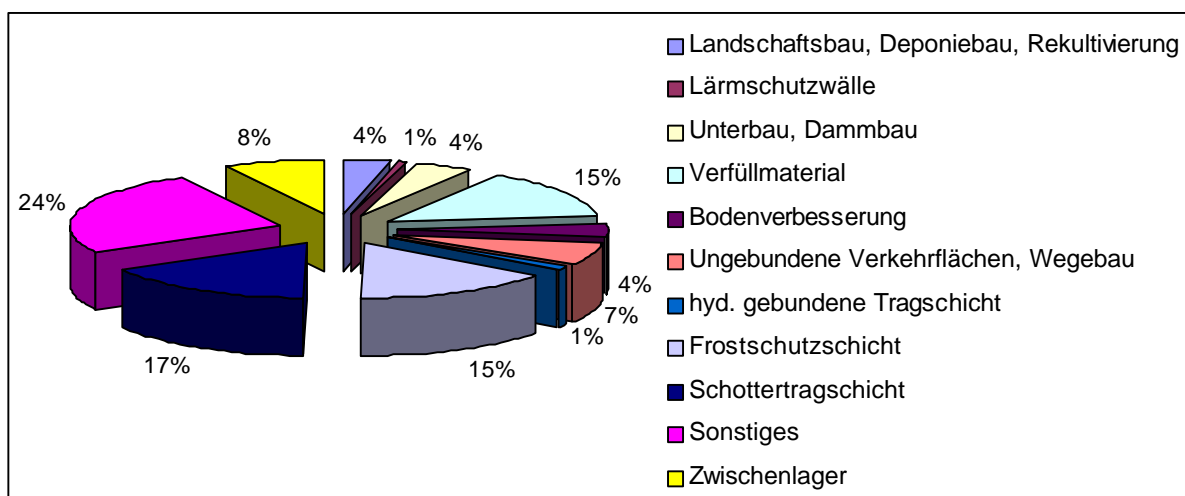


Bild 7: Einsatzgebiete für Bauschutt und deren Anteile an der Verwertung [26]

Etwa ein Drittel der aus dem Bauschutt hergestellten Recycling-Baustoffe wird in Tragschichten und Frostschutzschichten eingesetzt. Im Erd- und Landschaftsbau kommt ebenfalls ein Drittel zum Einsatz. Sonstige Verwertungen und der Lagerbestand bilden das restliche Drittel.

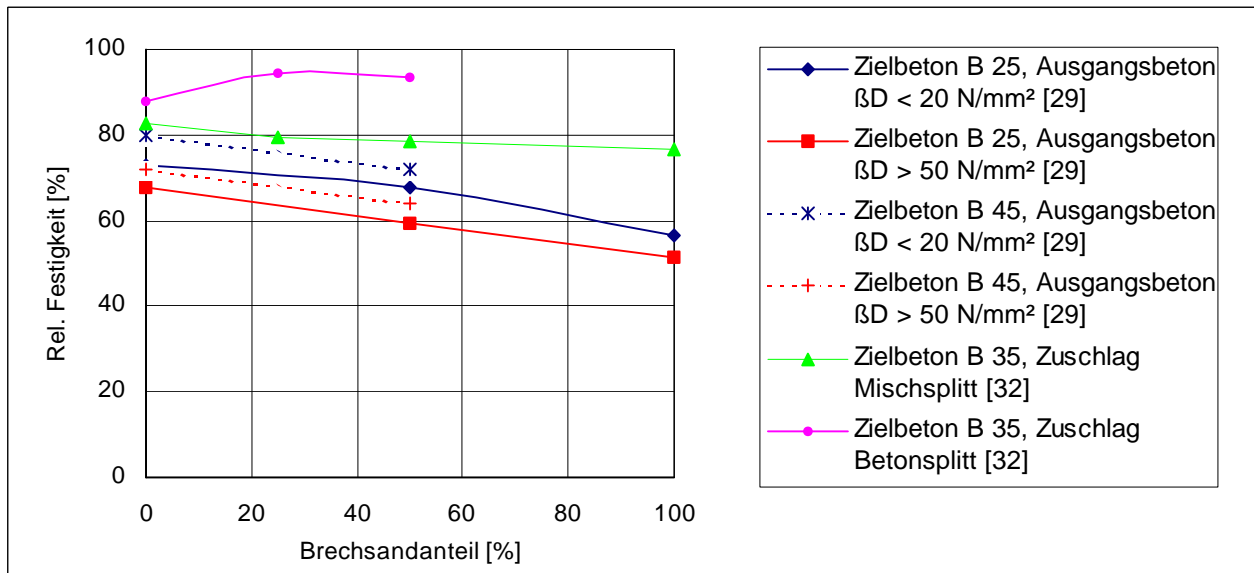
3.2 Aktuelle Forschungsergebnisse zur Bauschuttverwertung

In Ergänzung zu der o.g. summarischen Betrachtungsweise soll im folgenden auf einige in der Literatur veröffentlichte Ergebnisse zu Eigenschaften von Baustoffen aus aufbereiteten Bauabfällen eingegangen werden. Der Schwerpunkt der in der Literatur beschriebenen Verwertungswege liegt darauf, die aufbereiteten Bauabfälle im Beton einzusetzen. Es gibt eine kaum noch zu überschauende Anzahl von Arbeiten, die sich mit den Eigenschaften von Betonen beschäftigen, die rezyklierte Zuschläge aus Betonbruch enthalten. Betone aus Mauerwerkbruch wurden weniger häufig untersucht. Einige wichtige Arbeiten zum Recycling von Beton sind z.B. die den Zeitraum von 1945 bis 1985 umfassenden Recherchen von Schulz [27], die experimentellen Arbeiten zur Charakterisierung von Bauabfällen und zur Verwertung von Mauerwerkbruch von Winkler [28], die experimentellen Untersuchungen zu den Eigenschaften von Betonen, die aus im Labor aufbereiteten Rezyklaten oder aus Praxisgemischen hergestellt wurden [29,30], sowie die Berichte und Veröffentlichungen, die im Rahmen des Forschungsprojekts „Baustoffkreislauf im Massivbau“ entstanden sind, und z.T. on-line unter b-i-m.de [31] abrufbar sind.

Wenn man aus den Ergebnissen dieser Arbeiten den Erkenntniszuwachs herausfiltern will, besteht nach wie vor das Problem widersprüchlicher Aussagen. Andere Zusammenhänge stimmen zwar in ihrer Tendenz überein, unterscheiden sich aber quantitativ. Zusammengefasst wirkt sich der Einsatz rezyklierter Zuschläge wie folgt auf die Frischbetonkonsistenz, die Druckfestigkeit sowie die Verformungskennwerte aus.

In Bezug auf die Frischbetoneigenschaften ergeben sich durch den Einsatz von Betonbrechsanden und Betonsplitten negative Auswirkungen, da die Recyclingmaterialien im Gegensatz zu natürlichen Zuschlägen einen höheren, schwankenden Wasserbedarf zeigen. Trotzdem lassen sich befriedigende Verarbeitbarkeiten erreichen, indem durch folgende technologische Maßnahmen gegengesteuert wird: Austausch des Brechsandes durch Natursand, Vornässen der Zuschläge, Verflüssigerzugabe, Einsatz von Steinkohlenflugasche.

Zu den Druckfestigkeiten von Betonen aus Betonbrechsand und Betonsplitt gibt es unterschiedliche Aussagen. Nach [29] liegen die Festigkeiten der Betone, die Altbetonsplitt und -sand als Zuschlag enthalten, um bis zu ca. 50 % unter der Festigkeit der Vergleichsbetone. Wird der Betonbrechsand durch Natursand ausgetauscht, beträgt die Festigkeitsabnahme nur 25 %. Eine Abnahme von ca. 20 % wird von Müller [30] für Betone mit rezyklierten Zuschlägen > 2 mm gefunden. Dagegen wird von Fraij [32] ermittelt, dass der Festigkeitsrückgang durch die Verwendung grober rezyklierter Zuschläge 10 % für den Betonsplitt und 20 % für den Mischsplitt betrug. Beide Splitte waren Praxisgemische und entsprachen der niederländischen Norm NEN 5905. Es ergab sich ein geringerer Einfluss des Anteils an Brechsand, der allerdings gewaschen war, auf die Festigkeit. Im Bild 8 sind die Ergebnisse zum Einfluss des Brechsandanteils gegenübergestellt.



- Parameter der untersuchten Betone:
- 280 kg/m³ CEM I 32,5 + 180 kg/m³ wirksames Wasser + 0 – 113,4 kg/m³ Saugwasser + Altbetonzuschlag (Laborherstellung) + Fließmittel für Zielbeton B 25 [29]
 - 320 kg/m³ CEM I 42,5 R + 167,5 kg/m³ wirksames Wasser + 0 – 77,3 kg/m³ Saugwasser + Altbetonzuschlag (Laborherstellung) + Fließmittel für Zielbeton B 45 [29]
 - 350 kg/m³ CEM III 42,5 LH HS + 157,5 kg/m³ Wasser + Praxiszuschlag + Hochleistungsverflüssiger für Zielbeton B 35 [32]

Bild 8: Auf die Festigkeit des Referenzbetons bezogene relative Festigkeiten von Recyclingbetonen in Abhängigkeit vom Brechsandanteil

In [32] wird weiter festgestellt, dass in der untersuchten Festigkeitsklasse B 35 der tatsächliche Wasserzementwert die Festigkeit stärker beeinflusst als die Art und die Menge an rezykliertem Material. Alle hergestellten Recyclingbetone folgten einer Abhängigkeit zwischen Druckfestigkeit und Wasserzementwert, die mit dem für ungebrauchte Zuschläge gültigen w/z-Wert-Gesetz nahezu übereinstimmt. Das galt auch, wenn die Betone gewaschenen Brechsand anstelle von Natursand enthielten. Voraussetzung war, dass durch den Einsatz von Hochleistungsverflüssigern auf die Zugabe von zusätzlichem Wasser, das von den Zuschlägen aufgesaugt wird, verzichtet werden kann.

Die Druckfestigkeit von Betonen, für die die Porosität die wichtigste Einflussgröße ist, wird also hauptsächlich durch die auf den Wasserzementwert wirkenden Eigenschaften der Recycling-Zuschläge beeinflusst, wenn Betone mittlerer Festigkeitsklassen hergestellt werden sollen. Die Kornfestigkeit spielt in diesem Bereich eine untergeordnete Rolle.

Der Elastizitätsmodul von Betonsplittbeton verringert sich summarisch betrachtet um ähnliche Prozentsätze wie die Druckfestigkeit [29]. Bei differenzierterer Betrachtungsweise ergibt sich, dass die Abnahme des E-Moduls überwiegend größer als die Abnahme der Festigkeit ist (Bild 9). Dieser Befund scheint plausibel, weil für den E-Modul die Porosität *und* die Struktur der festigkeitsbildenden Calciumsilikathydrate im Zementstein wichtige Einflussgrößen darstellen.

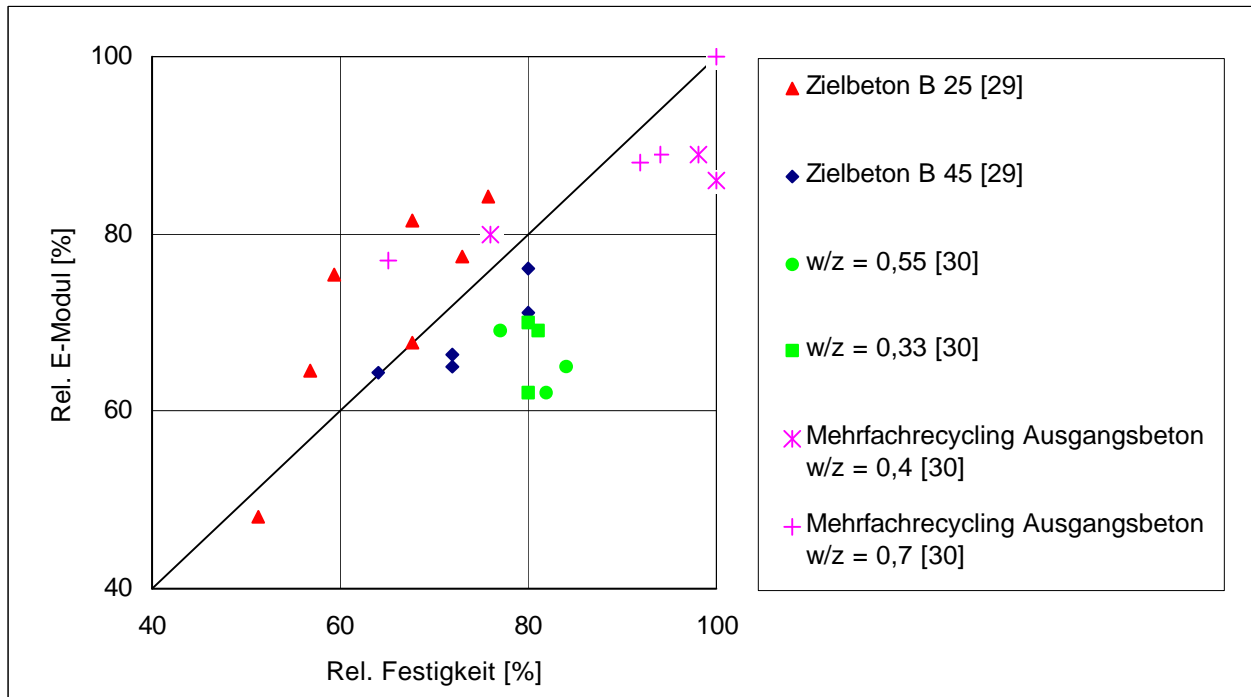


Bild 9: Auf die Werte des Referenzbetons bezogene relative statische E-Moduli von Recyclingbetonen in Abhängigkeit von der relativen Festigkeit

Durch Betrachtungen zu den möglichen „Extremwerten“ wird der zusätzliche Einfluss des Zementsteins auf die Verformungskennwerte noch deutlicher. Bei einem Anstieg des Zementsteingehaltes, wie er beim Mehrfachrecycling auftritt, geht der E-Modul stärker zurück als die Druckfestigkeit [30]. Ursache ist, dass beim Einsatz rezyklierter Betonzuschläge zusätzlicher „alter“ Zementstein eingebracht wird und der Zementsteingehalt mit jedem Kreislauf durch die erneute, für die Festigkeitsbildung benötigte Zementzugabe ansteigt. So setzt sich beispielsweise der Zementstein in der zweiten Betongeneration zusammen aus (altem Zementstein des Originalbetons + altem Zementstein des 1. Recyclingbetons + erhärtungswirksamen Zementstein des 2. Recyclingbetons). Im Umkehrschluss dürften zementsteinfreie rezyklierte Zuschläge keine Veränderungen bewirken, was von YANAGIBASHI [22] nachgewiesen wurde. Der Beton aus den infolge der Abrasionsbehandlung nahezu zementsteinfreien groben Zuschlägen zeigte nahezu keine Unterschiede im Schwinden und Kriechen im Vergleich zu Kiesbeton.

Die Eignung von Rezyklaten aus Mauerwerkbruch zur Betonherstellung wurde mehrfach untersucht [33-40] mit dem Ergebnis, dass bei Substitution der Sandfraktion durch Natursand und der Verwendung von Fließmitteln brauchbare Betone hergestellt werden können. Im technischen Maßstab werden solche Rezyklate bisher kaum für die Betonherstellung genutzt. Gründe sind die Heterogenität dieser Rezyklate und nicht völlig auszuschließende Anteile an betonschädigenden Inhaltsstoffen.

Trotz des großen Wissensfundus spielt die Betonherstellung aus rezyklierten Zuschlägen bisher kaum eine Rolle, sicherlich auch, weil sich in Bezug auf den Altbeton die Verwertung in Tragschichten bewährt hat.

4 Eigene Entwicklungen

Die Schwerpunkte der eigenen Arbeiten weichen bewußt von den o.g. Verwertungswegen ab. So wird versucht durch eine Mahlung, die bisher bei der Bauabfallaufbereitung unüblich ist, technologische Vorteile zu erzielen. Solche Vorteile bestehen in folgendem:

- Durch eine Feinmahlung wird der Mischungszustand der Bauabfälle verbessert, da die Substanzmenge, die eine für die Gesamtzusammensetzung repräsentative Anzahl der unterschiedlichen im Gemisch vorliegenden Baustoffpartikel enthält, mit sinkender Partikelgröße abnimmt. Nach Abschätzungen auf der Basis von [41] ist bei 0,1 mm- Partikeln eine Masse von etwa 0,1 g erforderlich, während bei 1 mm Partikeln erst eine Probe von ca. 100 g in ihrer mittleren Zusammensetzung der Grundgesamtheit entspricht.
- Durch die Feinmahlung wird die Porosität der Recycling-Baustoffe, die wie oben ausgeführt bei der Anwendung als rezyklierter Zuschlag störend sein kann, herabgesetzt bzw. völlig beseitigt.
- Die Feinmahlung kann auch dazu genutzt werden, mögliche Reaktionspotentiale in Recyclingmaterialien zu wecken.

Nachteil einer Feinmahlung ist der dafür benötigte Energieaufwand. Deshalb ist es immer notwendig, anhand von verfahrenstechnischen *und* bautechnischen Untersuchungen die Frage zu klären, ob der Aufwand den erzielten Nutzen rechtfertigt. Darüber wurde an dieser Stelle bzw. in Veröffentlichungen [42,43] bereits mehrfach berichtet. Zwei Verwertungswege, die auf einer Feinmahlung basieren, sollen im folgenden vorgestellt werden.

4.1 Reaktive Mehle aus Mauerwerkbruch

Ein Ansatz, der für heterogenen Mauerwerkbruch hochwertige Einsatzgebiete eröffnen kann, ist die Herstellung reaktiver Mehle. Dieser Ansatz basiert auf der Arbeitshypothese, dass Mauerwerksabbruch puzzolanische Eigenschaften besitzt, die durch eine Feinmahlung auf Zementkorngröße nutzbar gemacht werden. Damit könnten Mineralmehle erzeugt werden, die auf Grund ihrer Eigenschaften als Bindemittelkomponente im Zement oder als reaktiver Füllstoff im Beton verwendbar wären.

Unter Puzzolanität wird die von bestimmten natürlichen Gesteinen wie zum Beispiel vulkanischen Aschen und Tuffen oder industriellen Nebenprodukten wie kalzinierten Tonen und Steinkohlenflugasche bekannte Fähigkeit verstanden, mit dem bei der Hydratation des Zements gebildeten $\text{Ca}(\text{OH})_2$ zu reagieren. Als Reaktionsprodukte entstehen Calciumsilikathydrate, die zur Festigkeitsbildung im Mörtel oder Beton beitragen. Bei der Zugabe von puzzolanisch aktiven Mehlen zu einem Zement werden also zusätzliche, nicht aus dem Zement stammende Bestandteile in die Hydratationsreaktionen einbezogen, so dass das Defizit, das sich aus der „Verdünnung“ des Zements ergibt, zum Teil wieder ausgeglichen wird. Im Unterschied zur hydraulischen Reaktion verläuft die puzzolanische Reaktion allerdings langsam und liefert erst ab einer Erhärtungsdauer von 28 Tagen nennenswerte Festigkeitsbeiträge.

Wichtige Einflussgrößen für die Puzzolanität sind der Gehalt der Mehle an puzzolanisch aktiven Bestandteilen. In Ziegelmehlen sind das reaktive Kieselsäure und reaktionsfähige Al_2O_3 -Verbindungen, die bei ausreichender Feinheit mit dem $\text{Ca}(\text{OH})_2$

reagieren. Ein aussagekräftiger Summenparameter für die Puzzolanität aus chemischen und granulometrischen Kennwerten kann aber nicht abgeleitet werden, so dass die Beurteilung der Puzzolanität hauptsächlich auf Festigkeitsmessungen basiert.

Die Zielstellung der eigenen Untersuchungen an Mineralmehlen, die aus ungebrauchten Ziegeln und Mauerwerksbruch hergestellt wurden, war die Ermittlung des durch die Puzzolanität verursachten Beitrags dieser Mehle an der Festigkeitsbildung von Mörteln. Die Mehle aus den Ziegeln wurden in einer Chargenkugelmühle erzeugt und im Verhältnis 1:5 mit Portlandzement gemischt. Aus den Mischungen wurden Normmörtelprismen, deren Zusammensetzung der DIN EN 196, Teil 1 entsprach, zur Ermittlung der Festigkeit hergestellt.

In Bild 10 sind charakteristische granulometrische Kennwerte und die Verteilungsdichtekurven der Mineralmehle angegeben. Daraus geht hervor, dass die Feinheit in der Reihenfolge Hochlochziegelmehle – RC-Mehle – Mehle aus Mauerziegel bzw. Klinkermauerziegel zunimmt. Aber selbst die feinsten Ziegelmehle sind noch gröber als der eingesetzte Zement. Die Festigkeiten der Mörtel mit Mineralmehlen aus Klinkermauerziegel bzw. Mauerziegel sowie RC-Materialien bewegen sich bis zum 28. Tag in dem für die Inertstoffzugabe berechneten Bereich (Bild 11). Erst nach längerer Erhärtung wird ein Festigkeitszuwachs erreicht. Mörtel mit Hochlochziegelmehlen liegen zu allen Prüfterminen über der Inertstoffkurve. Nach 90 Tagen werden Festigkeiten erreicht, die nur noch 5 % unter dem Referenzwert liegen. Dieser Festigkeitsanstieg nach längerer Reaktionsdauer lässt den Schluss zu, dass sich besonders Mehle aus niedrig gebrannten Ziegeln aktiv an der Festigkeitsbildung beteiligen.

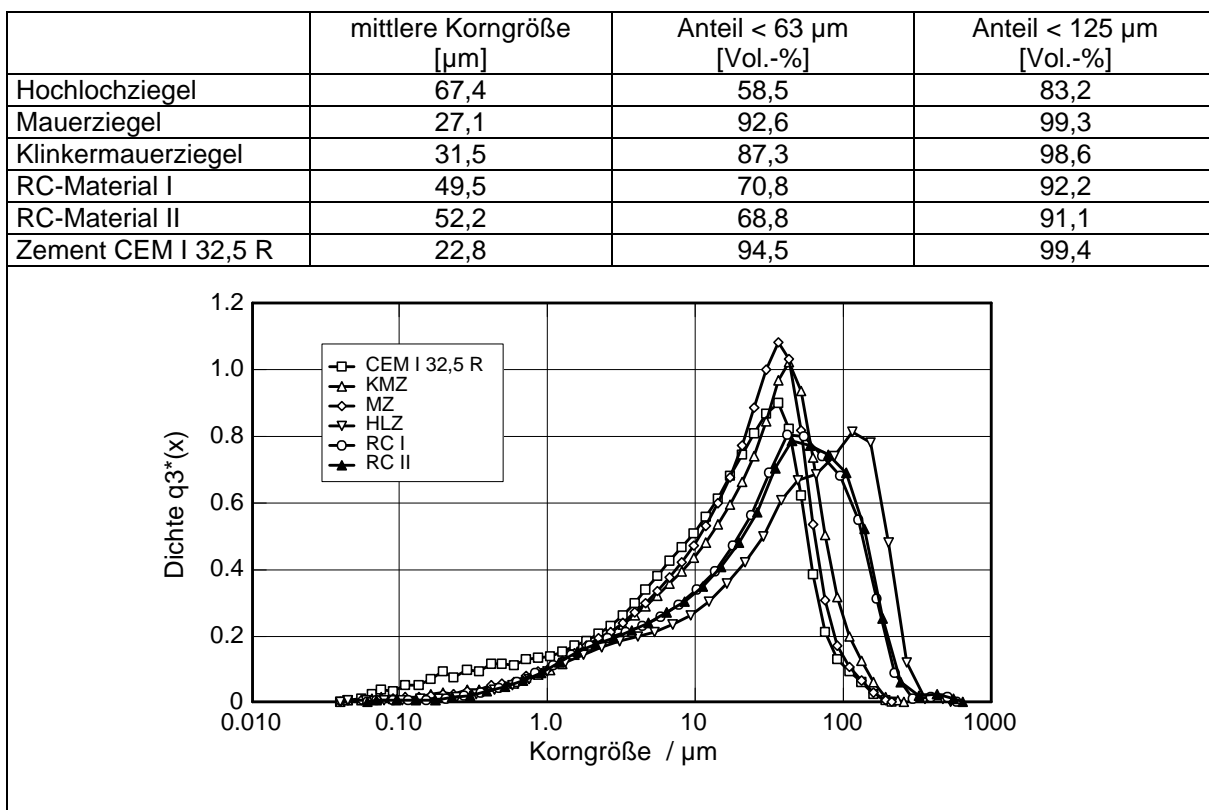


Bild 10: Charakteristische granulometrische Kennwerte und Verteilungsdichtekennlinien der getrennt gemahlene Mineralmehle aus Ziegeln bzw. Mauerwerkbruch und des Zements

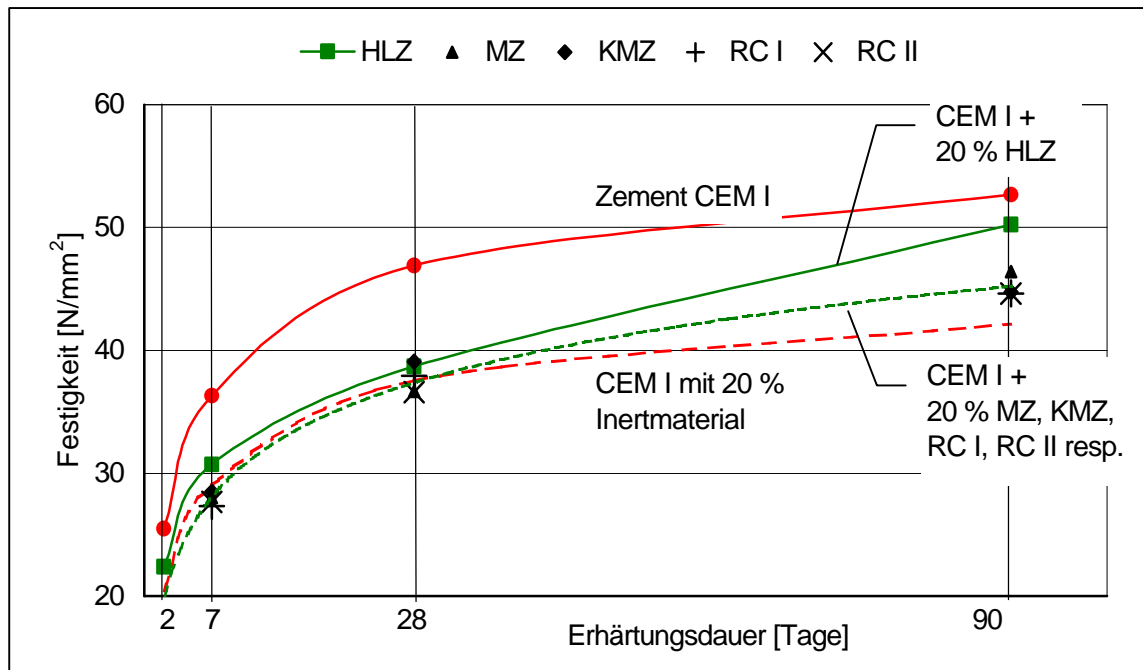


Bild 11: Druckfestigkeitsentwicklung für Bindemittel mit Ziegel- bzw. Recyclingmehlen im Vergleich zum Referenzzement bzw. zur berechneten Inertstoffzugabe

Die Laboruntersuchungen wurden durch kleintechnische Untersuchungen mit systematisch abgestuften Feinheiten der Mineralmehle ergänzt. Für diese Untersuchungen wurden Sande aus Beton- 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 an der Bauhaus-Universität Weimar betrieben wird. Die Anlage ist in [43] beschrieben, die Vorgehensweise bei der kleintechnischen Mahlung der Sande aus Bauschutt kann [44] entnommen werden. Es wurden Mineralmehle erzeugt, aus denen analog zu den Laboruntersuchungen Mischbindemittel hergestellt wurden. Die Mörtelfestigkeitsverläufe dieser Mischbindemittel sind im Bild 12 in Abhängigkeit von der Erhärtungsdauer dargestellt. Zum Vergleich sind Festigkeitsverläufe für hydraulische Straßenbinder nach Sommer [45] angegeben.

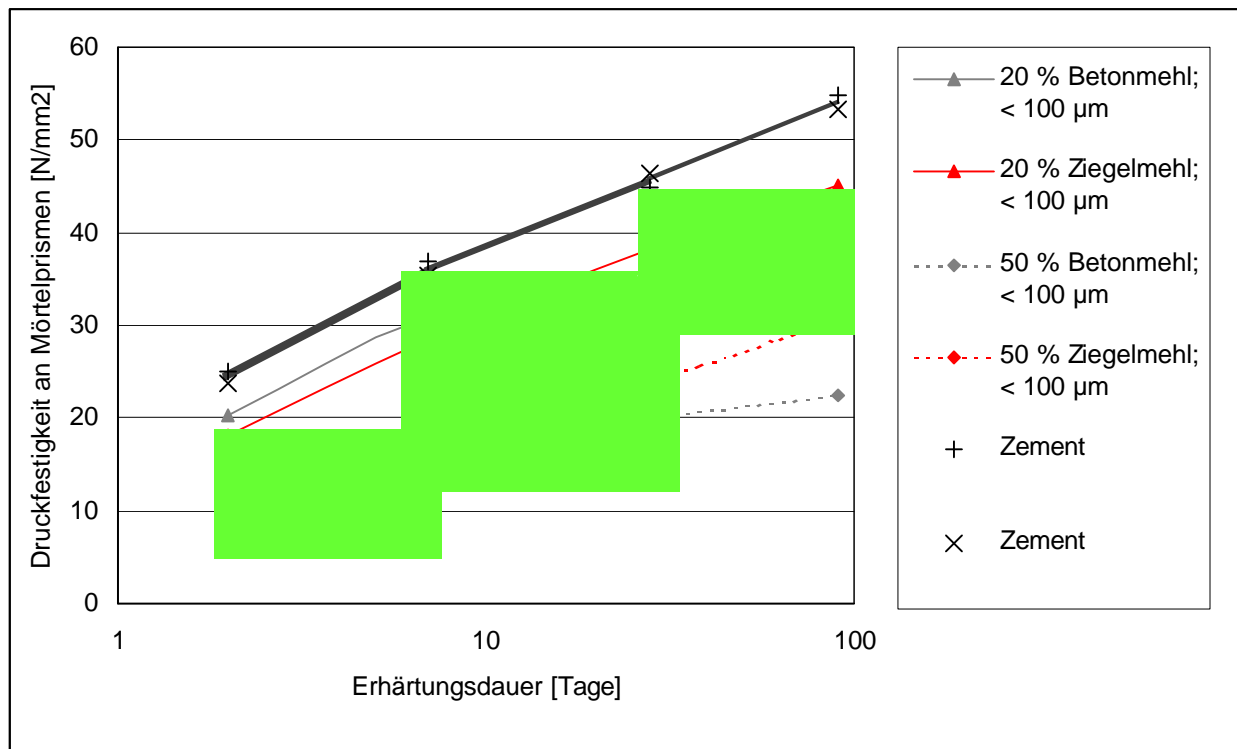


Bild 12: Druckfestigkeitsentwicklung für die Bindemittel mit Mehlen aus Beton- und Mauerwerkbruch unterschiedlicher oberer Korngröße

Nach Bild 12 wird der markierte Bereich der Straßenbaubindemittel bei 20 % Recyclingmehlzugabe über- und bei 50 % Zugabe unterschritten. Optimierungsversuche in Bezug auf die Korngrößenverteilung und die Zugabemenge müssen angestellt werden.

4.2 Blähgranulate aus Mauerwerkbruch

Ausgangspunkt für diese Entwicklung war ein Forschungsprojekt, in dem Technologien zur gemeinsamen Verwertung von Porenbeton und Mauerwerkbruch untersucht wurden [46-50]. Ziel der Entwicklung waren Rezepturen und Technologien zur Herstellung geblähter Granulate, die als Leichtzuschlag für Beton oder in konstruktiven Leichtschüttungen eingesetzt werden können. Die Auswahl der Ausgangsstoffe erfolgte hauptsächlich aus der Sicht des Baustoffrecyclings – für diese Materialien bestehen Defizite hinsichtlich der Verwertungsquote und des Verwertungs-niveaus. Nach einer erheblichen Anzahl von Versuchen wurde erkannt, dass sich aufgemahlener Mauerwerkbruch allein oder gemischt mit Porenbetonmehl gut für die Granulatherstellung eignet.

Die Ausgangsmaterialien Mauerwerkbruch und Porenbetonabfälle wurden zunächst getrennt auf Korngrößen < 100 mm aufgemahlen und dann gemischt. Der Anteil des Mauerwerkme-hls im Gemisch kann bis zu 100 % betragen, während der Anteil an Porenbetonmehl 50 % nicht übersteigen sollte. An die Aufmahlung schlossen 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 den Untersuchungen wurde Mischbrechsand von einer stationären Recyclinganlage verwendet, der erhebliche Schwankungsbreiten hinsichtlich der stofflichen Zusammensetzung aufweisen kann. Um trotzdem ein Produkt mit ausgeglichenen und definierten Eigenschaften zu erzeugen, kommen der Mahlung und dem thermischen Prozess besondere Bedeutung zu. Durch die Mahlung wird der bereits beschriebene technologische Effekt der Verbesserung der Homogenität erreicht. Außerdem wird die Agglomerierfähigkeit soweit verbessert, dass stabile Grüngranalien ohne Zugabe von Bindemitteln auf dem Granulierteller erzeugt werden konnten.

Der thermische Prozess und die Art, der Gehalt und die Feinheit des Blähmittels sind ausschlaggebend für die Umwandlung der Grüngranulate in Blähgranulate mit definierten Eigenschaften. Bei der thermischen Behandlung ist eine ausreichende Gasbildung durch das Blähmittel in einem Temperaturbereich, in dem bereits genügende Mengen an Schmelzphasen vorhanden sind, notwendige Voraussetzung für die Erzeugung poröser Granulate. Gleichzeitig ist das Kollabieren der Granalien aufgrund zu hoher Schmelzphasenanteile zu vermeiden. Bild 13 verdeutlicht diese Zusammenhänge:

- Das linke Diagramm weist aus, dass der einzuhaltende Temperaturbereich zwischen 1260 und 1290 °C liegt. Bei zu geringen Brenntemperaturen (< 1260 °C) findet keine vollständige Zersetzung des SiC statt und die Menge an Schmelzphase, die sich bildet, ist nicht ausreichend. Bei zu hohen Temperaturen schrumpfen die Granalien. Die Rohdichte steigt an.
- In Bezug auf die Menge und die Feinheit des Porosierungsmittels gibt es ebenfalls ein Optimum. Bei geringen Zusatzmengen oder im Vergleich zum Matrixmaterial größerer Korngröße des Porosierungsmittels werden dichte Granalien mit hoher Rohdichte erzeugt. Bei höheren Zusatzmengen und feinerer Aufbereitung nimmt die Porenbildung zu, woraus eine geringere Rohdichte resultiert. Bei einer weiteren Erhöhung der Zugabemenge kollabieren die Granalien. Die Rohdichte steigt wieder an.

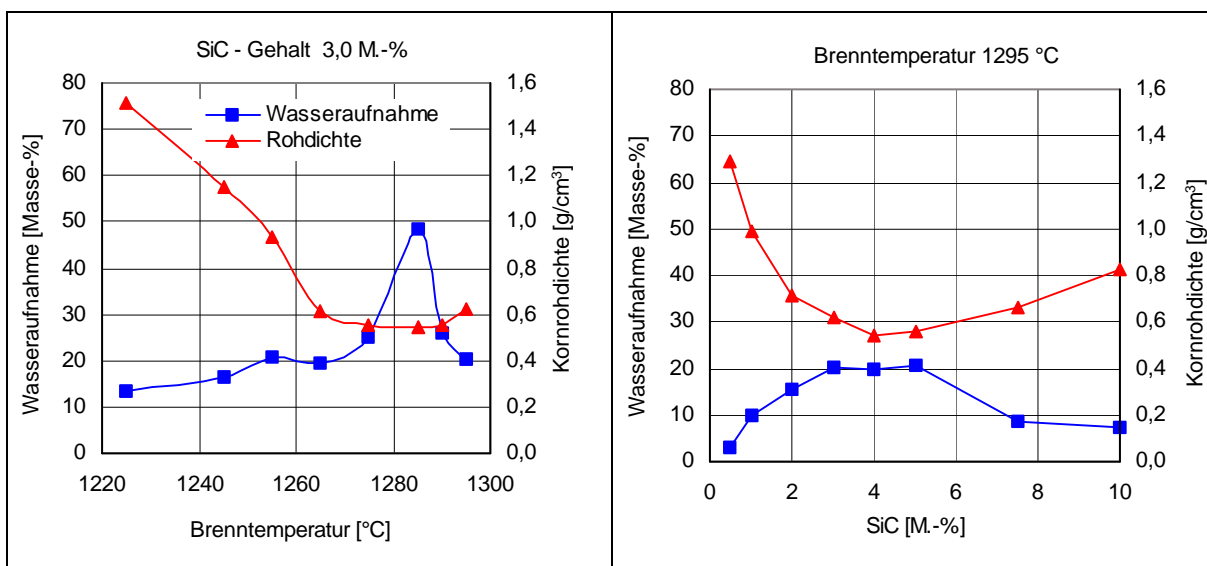


Bild 13: Einfluß der Brenntemperatur und der Zugabemenge an SiC auf die Kornrohddichte und die Wasseraufnahme der erzeugten Granulate

Im Bild 14 ist die Herausbildung polyedrischer Poren in Granalien mit unterschiedlichen Blähmitteldosierungen dargestellt. Leichte Granalien mit einer Rohdichte von 0,62 g/cm³ 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. Die Kornrohddichten nehmen Werte zwischen $0,5$ und $1,8 \text{ g/cm}^3$ an. Die Wasseraufnahmen liegen zwischen 2,3 und 15 Masse-%.

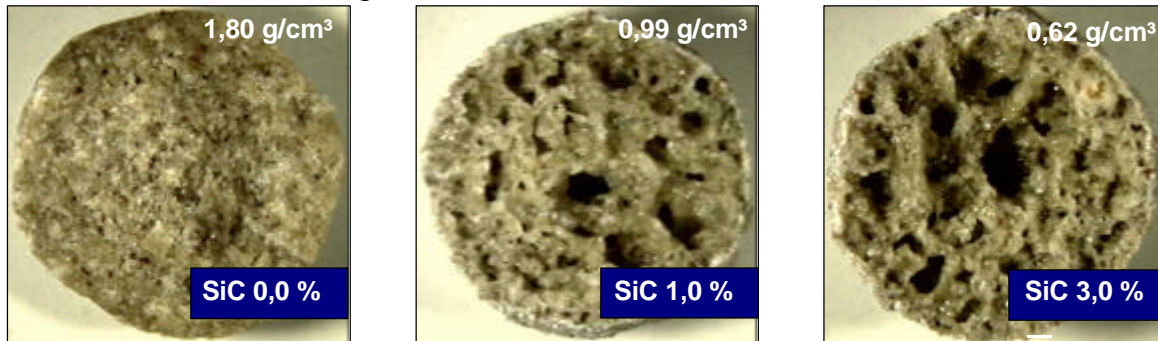


Bild 14: Ausbildung der Poren in Granulaten auf der Basis von Mauerwerkabbruch und Porenbeton

Die Baustoffkenngrößen, die an einer größeren, kleintechnisch hergestellten Granulatcharge nach DIN EN 1097, DIN 4226-2 und DIN 52104-N ermittelt wurden, sind in der Tabelle 5 den Eigenschaften eines Blähtons gegenübergestellt. Diese Ergebnisse belegen ebenso wie die Betonwarenherstellung unter Verwendung dieser Granulate in einem Betonwerk, dass die hier vorgestellten mineralischen Leichtzuschläge aus Mauerwerkbruch in ihren Eigenschaften den auf dem Markt eingeführten Produkten wie Blähton mindestens ebenbürtig sind. Besonders im Hinblick auf die Wasseraufnahme haben die Granulate aus Mauerwerkbruch Vorteile gegenüber dem Blähton.

Tabelle 5: Parameter der Leichtgranulate aus Mauerwerkbruch im Vergleich zu Blähton

	Leichtgranulat	Blähton
Brenntemperatur [°C]	1250*	1150*
Kornrohddichte [kg/m ³]	780	700
Schüttdichte [kg/m ³]	540	330
Wasseraufnahme [M.-%]	14	27
Frostbeständigkeit [M.-%]	0,03	n.b.
Kornfestigkeit [kN]	12,72	n.b.
Raubeständigkeit [M.-%]	0,33	n.b.

* Technikumsversuch mit indirekt elektrisch beheiztem Drehrohrföfen

** technische Herstellung im direkt befeuerten Drehföfen

Mit der Leichtgranulatherstellung aus Mauerwerkbruch wird nachgewiesen, dass dieses Material rohstofflich recycelt werden kann. Bei einer Gegenüberstellung mit Ton als dem traditionellen Rohstoff der Blähtonherstellung wird folgendes deutlich: Der Mauerwerkbruch verfügt zwar nicht mehr über die typischen Toneigenschaften wie Plastizität und Bildsamkeit, ist aber bei entsprechender Aufmahlung trotzdem granulierbar. Er enthält kein chemisch gebundenes Wasser, was aus energetischer Sicht von Vorteil ist. Blähfähige Stoffe sind ebenfalls nicht vorhanden und müssen deshalb im technologischen Ablauf zugefügt werden. Die für die thermische Verfestigung der Granulate unabdingbaren Eigenschaften, wie das Sinter- und Schmelzverhalten, haben aber sowohl den Primärprozess der Ziegelherstellung als auch den Prozess der Nutzung reversibel überlebt und sind in einem Sekundärprozess für die Herstellung hochwertiger Rezyklate nutzbar.

5 Zusammenfassung

Ausgehend von einer einführenden Betrachtung zu dem sich ausweitenden Abbruchgeschehen, wird der aktuelle Stand der Bauschutttaufbereitung einschließlich der Strategien der Sortierung von in-place bis in-plant kurz beschrieben. Es werden verfahrens-technische Entwicklungen zur Aufschlusszerkleinerung von Beton erläutert, die aus der Literatur entnommen wurden, und ein Überblick über Sortierverfahren gegeben.

Im Hinblick auf die Verwertung wird versucht, aktuelle Forschungsergebnisse zu den Spezifika von Betonen mit rezyklierten Zuschlägen, wie sie aus der Literatur hervorgehen, zusammenzufassen und zu interpretieren. Die Fortschritte der eigenen Entwicklungen zur Verwertung von Mauerwerkbruch werden dargestellt.

6 Literatur

- [1] Rheinstadion Düsseldorf
<http://www.wdr.de/themen/sport/1/rheinstadion/index.jhtml?rubrikenstyle>
- [2] Wohnungswirtschaftlicher Strukturwandel in den neuen Bundesländern.
Bericht der Kommission im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Nov. 2000.
<http://www.bmwbw.de/Anlage1723/Bericht-der-Kommission.pdf>
- [3] DRABEK, R.
Abbruch der Kaiserbau ruine in Trosdorf-Sieglar.
Vortrag anlässlich der Fachtagung „Abbruch 2002 in Berlin.“
- [4] JANSSEN, B.
Abbruch des Hotels RADISSON SAS in Berlin-Mitte.
Vortrag anlässlich der Fachtagung „Abbruch 2002 in Berlin.“
- [5] DIN 4226-100, Gesteinskörnungen von Beton und Mörtel, Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen.
DIN-Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth-Verlag, Berlin 2002.
- [6] DOKA, G.
Ökoinventar der Entsorgungsprozesse von Baumaterialien. Forschungsprogramm „Rationelle Energienutzung in Gebäuden“.
Bundesamt für Energie. Zürich 2000.
- [7] METTKE, A.; THOMAS, C.
Wiederverwendung von Gebäuden und Gebäudeteilen.
Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden 1999.
- [8] PETIT, E.
Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Naßaufbereitung von Bauschutt.
Aachener Beiträge zur Angewandten Rechner-technik, Bd. 22, 1997.
- [9] TOMAS, J. et al.
Aufschließen und Abtrennen von Wertstoffen aus Bauschutt.
Entsorgungspraxis (1999), H. 5, S. 22-26.

- [10] HANISCH, J.
Aktueller Stand der Bauabfallsortierung.
Aufbereitungs-Technik 39 (1998), H. 10, S.485-492.
- [11] KELLERWESSEL, H.
Sortieren mit Luft im Recycling-Bereich – Verfahren, Apparate, Grenzen.
Aufbereitungs-Technik 34 (1993), H. 3, S.144-150.
- [12] Frische Brise aus der Schweiz.
Baustoff Recycling+Deponietechnik (1996), H. 7/8, S.61-62.
- [13] Sortierverfahren für die Aufbereitung.
Steine+Erden (1997), H. 2, S. 52-59.
- [14] BUNTENBACH, S.; PETIT, E.; HOBERG, H.
Naßmechanische Aufbereitung von Bauschutt.
Aufbereitungs-Technik 38 (1997), H. 3, S.130-138.
- [15] BÖHRINGER, P.; HÖFFL, K.
Baustoffe wiederaufbereiten und verwerten.
AVS-Institut GmbH-Verlag, Unterhaching.
- [16] JUNGMANN, A.
Bauschutttaufbereitung in alljig-Setzmaschinen in Europa und USA.
Aufbereitungs-Technik 38 (1997), H. 10, S. 543-549.
- [17] DERKS, J.W.; MOSKALA; R.; SCHNEIDER-KÜHN, U.
Naßaufbereitung von Bauschutt mit Schwingsetzmaschinen.
Aufbereitungs-Technik 38 (1997), H. 3, S. 139-143.
- [18] MESTERS, K.; KURKOWSKI, H.
Dichtesortierung von Recycling-Baustoffen mit Hilfe der Setzmaschinenteknik.
Aufbereitungs-Technik 38 (1997), H. 10, S. 536-542.
- [19] KASAI, Y.
Recent status of the production and reuse of demolished concrete in japan.
Persönliche Mitteilung 1997.
- [20] WOLFF, W.; ROHR, W.
„Hurricane“-Friktionstrommel zur Optimierung von Betonzuschlagstoffen.
Sonderdruck aus „Aufbereitungs-Technik“ 1983, Heft 3, Seite 365 – 369.
- [21] SCHMIDL, H.; DACHROTH, W.; ROHR, W.
Die künstliche Rundung von Splitt und Schotter.
Sonderdruck aus „Aufbereitungs-Technik“ 1986, Heft 6, Seite 144 – 151.
- [22] 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.
- [23] MULDER, E.; BLAAKMEER, J.; NIJLAND, T.; TAMBOER, L.
A closed material cycle for concrete as part of an integrated process for reuse of the total flow of C&D waste.
Sustainable Concrete Construction. Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK, September 2002, S. 291 – 304.
- [24] BAOQUN LI; HIROYUKI MIZUGUCHI; TAKAO UEDA.
Recycled aggregate from demolished concrete using heat treatment and rubbing method.
Proceedings of the 5th International Symposium on the Cement and Concrete, Shanghai, China, 2002.

- [25] KOHLER, G.; PAHL, G.
Deutschland: Status des Baustoffrecycling. Baustoff Recycling + Deponietechnik 1-2, 2002, S. 20 – 24.
- [26] KRASS, K.; JUNGFELD, I.; TROGISCH, H.
Anfall, Aufbereitung und Verwertung von Recycling-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten im Wirtschaftsjahr 1999 – Teil 1: Recycling-Baustoffe. Straße und Autobahn, Heft 1, 2002, S. 22 – 30.
- [27] SCHULZ, R. R.; WESCHE, K.
Recycling von Baurestmassen, ein Beitrag zur Kostendämpfung im Bauwesen. Abschlußbericht Institut für Bauforschung, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1986.
- [28] WINKLER, A.
Herstellung von Baustoffen aus Baurestmassen. Forschungsbericht, Bauhaus-Universität Weimar, Shaker-Verlag, Aachen 2001.
- [29] DILLMANN, R.
Einfluß der Altbetonfestigkeit auf die Eigenschaften des unter Verwendung von Betonsplitt hergestellten Betons. Forschungsbericht aus dem Fachbereich Bauwesen 91. Universität Essen 2002.
- [30] MÜLLER, C.
Beton als kreislaufgerechter Baustoff. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 513, Berlin 2001.
- [31] B-I-M
<http://www.b-i-m.de/>
- [32] FRAAIJ, A.L.; PIETERSEN, H.S.; VRIES, J.
Performance of concrete with recycled aggregates. Sustainable Concrete Construction. Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK, September 2002.
- [33] ENGELHARDT, K.
Untersuchungen zur Verwendung von Ziegelrestmassen zur Herstellung von Mörtel und Beton. Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Diplomarbeit, Weimar 1993.
- [34] WINKLER, A.
Eigenschaften von Mörteln und Betonen aus Ziegelrestmassen. Fakultät Bauingenieurwesen, Schriften der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar 101, Diplomarbeit, Weimar 1995.
- [35] WORN, F.
Beton aus Recyclingmaterial. Baustoff Recycling + Deponietechnik 8/1992, S. 18 – 19.
- [36] CRESCIONINI, M.
Beton aus Beton- und Mischabbruchgranulat, Teil I. Baustoff Recycling + Deponietechnik 5/1995, S. 64 – 66.
- [37] CRESCIONINI, M.
Beton aus Beton- und Mischabbruchgranulat, Teil II. Baustoff Recycling + Deponietechnik 5/1995, S. 91 – 95.
- [38] OLBRECHT, H.; LEEMANN, A.
Beton aus Mischabbruch. Baustoff Recycling + Deponietechnik 6/1999, S. 50 – 52.
- [39] MPA Dresden, FuE-Vorhaben „Baustoffkreislauf im Massivbau“, Thema C/01: Einflüsse der Aufbereitung von Bauschutt für eine Verwendung als Betonzuschlag.

- Themenverantwortlicher: Prof. Reichel MPA Dresden
<http://www.b-i-m.de/Berichte/C01/C01z0198.doc>
- [40] JANKOVIC, K.
Using Recycled brick as concrete aggregate.
Sustainable Concrete Construction. Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK, September 2002.
- [41] STIESS, M.
Mechanische Verfahrenstechnik 1.
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1995.
- [42] MÜLLER, A.; LANDER, S.; STARK, U.
Bauabfallverwertung durch Feinmahlung.
Abbruch & Recycling 3/2001, S. 70 – 80.
- [43] WIENKE, L.; LANDER, S., STARK, U.; MÜLLER, A.
Untersuchungen zur Mahlung von Rohstoffen, Abfällen und Zwischenprodukten in einer kleintechnischen Anlage.
ZKG 8 (2002), S. 39 – 48.
- [44] LATOCHA, M.
Verwertungsmöglichkeiten der Feinfraktionen aufbereiteten Abbruchmaterials als Betonzusatzstoff.
Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Projektarbeit, Weimar 1999.
- [45] SOMMER, H.:
A Tailor made road binder for hydraulically bound bases with induced cracks.
Sustainable Concrete Construction.
Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK, September 2002.
- [46] REINHOLD M.; MÜLLER, A.
Leichtzuschläge aus Feinstoffen des Mauerwerksabbruchs
Vortrag zur Recycling'01, Weimar, 12. Oktober, 2001.
- [47] MÜLLER, A.; REINHOLD, M.
Lightweight Aggregate Produced From Fine Fractions of Construction and De-molition Waste.
R'02 World Congress on Integrated Resources Management, Vortrag, Genf, 2002, ISBN 3-905555-23-9.
- [48] MÜLLER, A.; REINHOLD, M.
The measurement of important granulometric characteristics of aggregates on the basis of photo-optical image analysis systems.
Innovations and Developments in Concrete Materials and Construction. Proceedings, S. 957–966, Dundee, September 2002.
- [49] MÜLLER, A.; REINHOLD, M.
Leichtgranulate aus Mauerwerkbruch.
Vortrag „10 Jahre UVR – FIA GmbH“, Freiberg, 2002.
- [50] MÜLLER, A.; REINHOLD, M.; SCHWIEGER, B.; KNOPF, U.
Patent „Poröse Granulate aus Bauabfällen zur Verwendung als Leichtzuschlag“.
Inanspruchnahmeerklärung, 29.01.2003.