

Nassaufbereitung von Betonbrechsand durch Dichtentrennung – neue Ergebnisse und Einsatzmöglichkeiten

Einleitung

Die Nassaufbereitung als Möglichkeit der Verbesserung der Materialeigenschaften von Bauschutt und speziell von Altbeton ist schon seit längerem Thema verschiedener Arbeiten und Projekte, sowohl in der Forschung im Labor- und Technikumsmaßstab, als auch seit mittlerweile einigen Jahren in der praktischen Umsetzung in industrieller Größe [1, 2].

Die meisten Untersuchungen zum Recycling von Bauschutt- oder Betonbruch wurden an gröberen Fraktionen durchgeführt [3]. Ursache hierfür ist, dass Körner mit größerem Korndurchmesser ein höheres und damit für Baustoffe günstigeres Verhältnis von Gesteinskörnung zu anhaftender Zementmatrix haben. Verschiedene Materialeigenschaften, die einer höherwertigen Verwendung als Baustoff entgegen stehen, wie z.B. geringere Dichte oder Wassersaugen, stehen in direktem Zusammenhang mit dem anhaftenden Zementstein [4]. Da der Anteil an Zementstein in den feineren Fraktionen analog höher ist, ist der trocken aufbereitete Betonbrechsand als potentieller Baustoff weniger geeignet [5].

Der Einsatz von aufbereitetem Betonbruch als Gesteinskörnung in der Betonherstellung hat in der Wiederverwertung von Altbeton in den meisten Ländern nur eine geringe Bedeutung. Aufgrund der oben beschriebenen Materialeigenschaften werden dazu in den meisten Fällen gröbere Körnungen eingesetzt.

Für Deutschland wird die Recyclingquote vom Kreislaufwirtschaftsträger Bau (KWTB) für das Jahr 2000 mit 74,5 % angegeben, aber nur ca. 3 % wurden in der Betonherstellung verwertet [6]. Seit Ende 2003 ist die Verwendung der feinen Fraktionen < 2 mm in der Betonproduktion nach der überarbeiteten Richtlinie des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) [7] ohne Einzelfallzulassung durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) nicht mehr möglich.

In Europa sind die Größenordnungen, in denen Bauschutt recycelt und verwertet wird, sehr unterschiedlich. Während Belgien im Jahr 1990 bereits 87 % des Bauschutts recycelt und 17 % in der Betonherstellung wiederverwendet hat, betrug diese Quote in Spanien noch im Jahr 2003 nur 10%, wobei ausschließlich die gröberen Körnungen > 4 mm und zwar nur im Straßenbau und als Füllmaterial verwendet wurden [8]. Im Jahr 1999 wurden innerhalb der Europäischen Union etwa 28 % des Bauschutts recycelt, nur 2,2 % wurden in der Betonherstellung eingesetzt [8].

Um die höherwertige Verwertung von Bauschutt in Europa im Sinne eines nachhaltigen Umgangs mit Naturressourcen zu unterstützen, wurde im Zeitraum 2001 bis 2004 im Rahmen des LIFE-Programmes der EU das Demonstrationsprojekt RECDEMO gefördert [9]. Ziel des Projektes war die Gewinnung eines qualitativ möglichst hochwertigen Betonbrechsandes, dessen Materialeigenschaften den Einsatz in der Produktion von Baustoffen ermöglichen sollten. Das Projekt wurde gemeinsam mit drei Partnern aus der Industrie durchgeführt. Zur Zeit erfolgen noch ergänzende Untersuchungen durch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung.

Projektkonzept

Der erste Schritt im Projektablauf war die Herstellung eines trocken aufbereiteten Betonbrechsandes, der möglichst schadstoffarm und von hoher Sortenreinheit sein sollte. Dazu wurde Material aus einem selektiven Rückbau gewählt, da diese Vorgehensweise für die Gewinnung von qualitativ hochwertigem Betonbruch besonders geeignet ist [10, 11]. Verschiedene Qualitätssicherungsschritte im Rahmen der Annahme und der trockenen Aufbereitung stellten die hohe Qualität des trocken aufbereiteten Betonbrechsandes 0/4 mm sicher [12].

Das so gewonnene Material, Material A, wurde nassmechanisch aufbereitet und auf seine Eignung als Baustoff getestet. Zum Vergleich wurden zwei weitere Materialien, die Vorabsiebung 0/5 gleicher Herkunft, sowie ein anderer, jedoch ebenfalls selektiv gewonnener Betonbrechsand, Material B, nassaufbereitet und untersucht. Die Verwertung der bei der Nassaufbereitung abgetrennten Reststoffe sowie eine ökologische und ökonomische Betrachtung des Aufbereitungsprozesses sind weitere Bestandteile des Projektkonzeptes.

Aufbau der Versuchsanlage

Der zweite Schritt, des Projektablaufs, die nassmechanische Aufbereitung des so gewonnenen Ausgangsmaterials, erfolgte in einer Versuchsanlage der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM). Die ursprünglich für die Bodensanierung eingesetzte Anlage arbeitet mit Durchsätzen von bis zu 1 t/h. In diesem Projekt wurde mit einer Durchsatzleistung von 400 – 700 kg/h gearbeitet. Das Verfahrenskonzept ist in der nachfolgenden Abbildung 1 vereinfacht dargestellt.

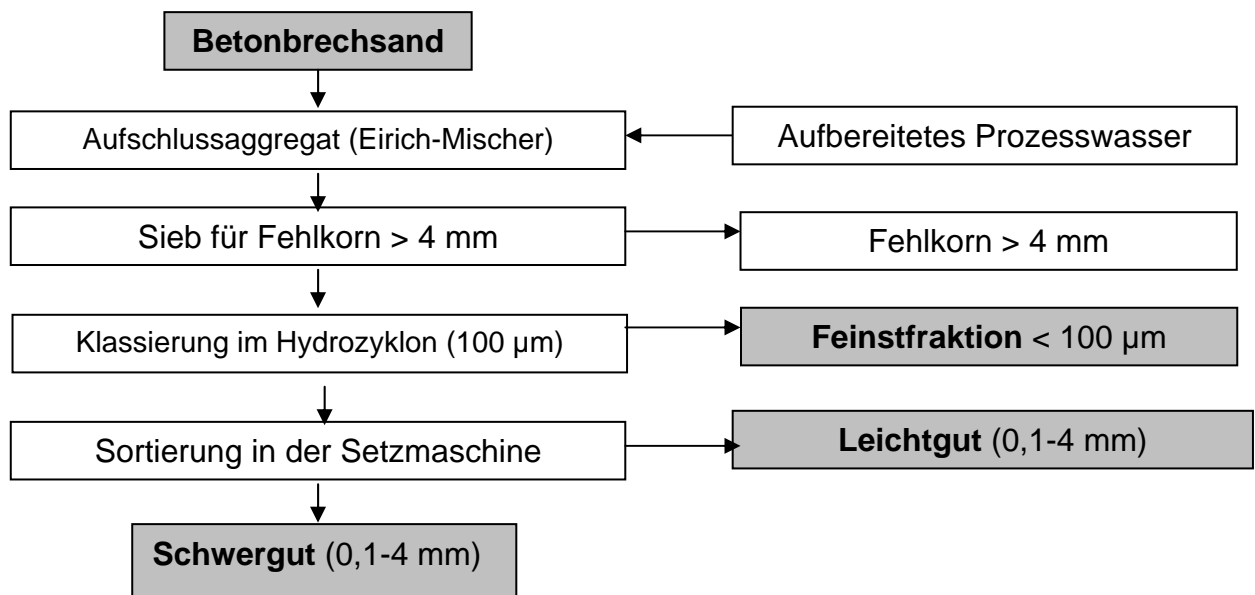


Abb. 1: Verfahrensfliessbild der Nassaufbereitung von Betonbrechsand

Als erste Verfahrensstufe der Nassaufbereitung durchläuft das mit Wasser ange-mischte Material 0-4 mm einen Aufschluss durch Attrition in einem Eirichmischer.

Ziel dieses Schritts ist der Abrieb von anhaftender Zementmatrix durch mechanischen Energieeintrag.

In der folgenden Klassierungsstufe wird über einen Hydrozyklon die Fraktion $< 100 \mu\text{m}$ abgetrennt. Ziel dieser Stufe ist die Entfernung von abgeriebenem Zementstein und bereits im Ausgangsmaterial vorhandenen abschlämmbaren Bestandteilen. Nach Zugabe eines Flockungsmittels (ein kationisches Polyacrylamid) wurde dieser Stoffstrom, der nachfolgend als Feinstgut bezeichnet wird, aus dem Prozesswasserkreislauf entfernt.

Nassaufbereitung mittels Setztechnik

Kernstück des Nassaufbereitungsverfahrens ist die Dichtesortierung des Materialhauptstromes 0,1 – 4 mm unter Anwendung der Setztechnik zur Dichtentrennung in ein Leichtgut und ein Schwergut.

Die Setztechnik ist ein Verfahren zur Trennung von körnigen Stoffgemischen nach der Dichte und wird bereits seit mehreren hundert Jahren in der Aufbereitung von mineralischen Stoffen eingesetzt. Sie wurde erstmals 1556 von Agricola als Verfahren zur Erzgewinnung beschrieben und ist seitdem fester Bestandteil der Aufbereitungstechnik [13].

Im Setzprozess wird das zu sortierende Gut mittels Durchströmung mit einem pulsierenden Fluid jeweils kurzzeitig aufgelockert und mit nachlassendem Impuls wieder verdichtet. Partikel gleicher Größe aber unterschiedlicher Dichte erfahren durch die pulsierende Fluidströmung eine Schichtung. Dieser Vorgang kann auch von anderen Faktoren, wie Oberflächeneigenschaften und z.B. Kornform beeinflusst werden.

Grundvoraussetzung des Einsatzes der Setztechnik bei der Bauschutt- oder Betonbruchaufbereitung sind die Dichteunterschiede der im Altbeton enthaltenen Komponenten Naturstein, Beton und Zementstein. Im Altbeton enthaltene Natursteinkörnung hat eine höhere Dichte als der ebenfalls enthaltene Zementstein. Die Dichte der einzelnen Betonpartikel bewegt sich in Abhängigkeit vom jeweiligen Verhältnis Naturstein zu Zement – naturgemäß – dazwischen.

Als Fluid wird bei der Bauschuttaufbereitung Wasser verwendet. Bei eher heterogen zusammengesetztem Bauschutt können mit dem Setzverfahren auch leichte Störstoffe wie z.B. Holzpartikel entfernt werden. Das Verfahren ist bisher überwiegend an gröberen Fraktionen angewandt worden [2, 14]. Im Projekt RECDEMO wurde für die Nassaufbereitung eine modifizierte luftgepulste Setzmaschine der Firma Allmineral eingesetzt.

Im Verlauf der verschiedenen Versuchsreihen wurden unterschiedliche Intensitäten des Aufschlussaggregates getestet. An der Setzmaschine wurden die Parameter Schichtdicke, Hubfrequenz, Hubhöhe und Austragsregulierung variiert. Der vom Hersteller vorgegebene Verlauf des Setzzyklus ist sinusförmig.

Das Prozesswasser wird bei dem gewählten Verfahren im Kreislauf geführt, so dass die Nassaufbereitung weitestgehend abwasserfrei verläuft. Mit der Feuchte der Austragsgüter entferntes Wasser wurde diskontinuierlich ersetzt.

Begleituntersuchungen

Die bei der Aufbereitung gewonnenen Materialströme Schwergut, Leichtgut und Feinstgut durchlaufen verschiedene Begleituntersuchungen in Hinblick auf ihre Wiederverwertung. Die Untersuchungen der Materialeigenschaften wurden an den gewonnenen Fraktionen und am jeweiligen Ausgangsmaterial durchgeführt.

Es wurden von jeder Versuchsfahrt Massenbilanzen durch Wägung von Ausgangsmaterial und den gewonnenen Einzelfraktionen erstellt. Über Feuchtebestimmungen erfolgte eine Rückrechnung der Austragsfraktionen aller Fahrten.

Zur Erfassung der Klassierungseffekte wurden für alle Fraktionen außer der Feinstfraktion ($< 100 \mu\text{m}$) Siebanalysen durchgeführt. Für die Bestimmung des Gehaltes an Zementstein wurde der säurelösliche Anteil von Ausgangsmaterial und aufbereiteten Fraktionen ermittelt. Hierzu wurde ein standardisiertes Salzsäureaufschlussverfahren verwendet. Weiterhin wurden Reindichte und Kornrohddichte von ausgewähltem Versuchsmaterial bestimmt. Ergänzend wurde auch der Gehalt an Sulfat und Chloriden im 24-h-Eluat ermittelt.

Für die Untersuchungen zur Eignung der Brechsandfraktionen als Gesteinskörnung wurde aus dem getrockneten Probematerial zunächst die 10-min-Wasseraufnahme gemessen und bei der Herstellung von Mörtel bzw. Beton entsprechend berücksichtigt. Es folgte die Ermittlung der Kennwerte Ausbreitmaß, Luftgehalt und Frischmörtel- oder Frischbetonrohddichte.

An den hergestellten Mörtelprüfkörpern wurden Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit und dynamischer Elastizitätsmodul sowie die Rohddichte über den Verlauf von 28 Tagen ermittelt.

Für die ökologische und ökonomische Bewertung des Prozesses wurden im Verlauf des Projektes der Energieverbrauch sämtlicher Einzelaggregate sowie der Gesamtenergieverbrauch der einzelnen Versuchsfahrten gemessen.

Reststoffverwertung

Für die bei der Aufbereitung anfallenden Reststoffe Leichtfraktion und Feinstfraktion wurde entsprechend dem Projektkonzept eine spätere Verwendung als Zuschlagstoff bei der Kompostierung vorgesehen um natürliche Ressourcen, wie z.B. Gesteinsmehl, zu ersetzen.

Grundvoraussetzung für diesen Einsatz war die weitestgehende Schadstofffreiheit des Ausgangsmaterials, da abzusehen war, dass sich eventuell vorhandene Schadstoffe im Leicht- und vor allem im Feinstgut anreichern würden [11]. Die biologische Verträglichkeit des eingesetzten Flockungsmittels wurde vorab sichergestellt.

Ergebnisse

Eine Übersicht über Ergebnisse der Begleituntersuchungen der Materialien A und B sowie der Vorabsiebung und den jeweils aus den Einsatzstoffen gewonnenen Einzelfraktionen ist den nachfolgenden Tabellen 1 bis 3 zu entnehmen. Da nur aus

einem Teil der im Rahmen der Versuche gewonnenen Materialien Baustoffe hergestellt und entsprechende Baustoffprüfungen durchgeführt wurden, ist die Datenbasis für diese Tabellen und die noch folgende Abbildung 4 geringer als für die Darstellungen in den Abbildungen 2 und 3.

Tabelle 1: Materialeigenschaften von Material A

	Ausgangsgut	Schwergut	Leichtgut	Feinstgut
Anteile < 100 µm [%] ¹	5,41	0,39	2,49	100,00
Säurelösliche Bestandteile [%] ²	22,35	16,45	27,09	47,38
Wasseraufnahme [%] ³	9,24	6,28	11,01	n.b.
Reindichte [g/cm ³]	2,54	2,56	2,48	n.b.
Konsistenz [cm] ⁴	50,83	46,90	44,88	n.b.
Druckfestigkeit [N/mm ²] ⁵	17,37	19,45	16,00	n.b.
Biegezugfestigkeit [N/mm ²] ⁵	3,38	3,83	3,09	n.b.
Dynamischer E-Modul [N/mm ²] ⁵	12.312	15.030	9.526	n.b.

Tabelle 2: Materialeigenschaften von Material B

	Ausgangsgut	Schwergut	Leichtgut	Feinstgut
Anteile < 100 µm [%] ¹	3,40	0,46	1,41	100,00
Säurelösliche Bestandteile [%] ²	17,30	13,45	21,66	37,18
Wasseraufnahme [%] ³	5,62	3,75	6,78	n.b.
Reindichte [g/cm ³]	2,54	2,57	2,51	n.b.
Konsistenz [cm] ⁴	48,57	50,21	43,44	n.b.
Druckfestigkeit [N/mm ²] ⁵	15,01	15,39	14,22	n.b.
Biegezugfestigkeit [N/mm ²] ⁵	2,93	3,10	2,96	n.b.
Dynamischer E-Modul [N/mm ²] ⁵	13.648	14.256	11.589	n.b.

Tabelle 3: Materialeigenschaften von Material Vorabsiebung

	Ausgangsgut	Schwergut	Leichtgut	Feinstgut
Anteile < 100 µm [%] ¹	7,36	0,46	2,85	100,00
Säurelösliche Bestandteile [%] ²	16,90	10,97	23,85	32,06
Wasseraufnahme [%] ³	7,82	3,63	n.b.	n.b.
Reindichte [g/cm ³]	2,59	2,62	2,54	n.b.
Konsistenz [cm] ⁴	41,00	48,00	n.b.	n.b.
Druckfestigkeit [N/mm ²] ⁵	17,75	18,43	n.b.	n.b.
Biegezugfestigkeit [N/mm ²] ⁵	3,43	3,29	n.b.	n.b.
Dynamischer E-Modul [N/mm ²] ⁵	13.525	14.671	n.b.	n.b.

¹ Prozent Trockensubstanz

² Prozent Trockensubstanz, bestimmt mit Salzsäureaufschlussverfahren

³ Prozent Trockensubstanz nach 10 Minuten

⁴ Ausbreitmaß nach DIN 1048 -10 Minuten

⁵ (4 x 4 x 16) cm³ Mörtelprismen nach 28 Tagen

Die Auswertung der mit den unterschiedlichen Einstellungen der Setzmaschine erzeugten Massenströme von Leicht- und Schwergut ergaben zusammen mit den Ergebnissen der Materialuntersuchungen, dass eine Prozessführung mit Schwergutausträgen in der Größenordnung zwischen 70 % und 85 % des Eingangsmaterials die günstigste Verfahrensführung für das Material A bewirkten. Bei der Abtrennung deutlich geringerer Anteile von Leichtgut wurden nur geringe Veränderungen der Materialeigenschaften bewirkt. Die Abtrennung größerer Mengen an Leichtgut führte teilweise, jedoch nicht immer, zu einer Verbesserung der Analyseergebnisse des Schwergutes und stand dem Projektziel eine möglichst große Menge an Betonbrechsand dem Baustoffkreislauf wieder zuzuführen entgegen.

Der Anfall an Feinfraktion war vom Ausgangsmaterial abhängig. Die Auswertung von 70 Versuchsreihen des Materials A ergab die in Abbildung 2 dargestellten, über die Feuchtebestimmung rückgerechneten Anteile der Austragsfraktionen.

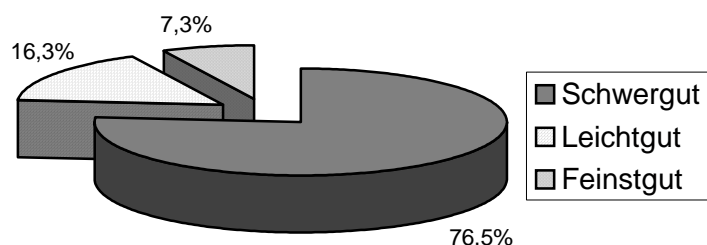


Abb. 2: Anteile der aufbereiteten Fraktionen berechnet als Trockensubstanz am Gesamtaustragsgut (< 4 mm)

Die Siebanalysen der einzelnen Fraktionen zeigten, dass in der Setzmaschine erwartungsgemäß auch Klassierungseffekte auftreten. Im Schwergut reichern sich im Vergleich zum Leichtgut erkennbar mehr Körner größeren Durchmessers an. Weiterhin wurde deutlich, dass durch die mechanische Beanspruchung des Brechsandes in der Aufbereitungsanlage eine Erhöhung der Feinkornanteile bewirkt wurde. Dabei waren die Effekte der unterschiedlichen Einstellungen des Aufschlussaggregates kaum zu erkennen.

Die Nassaufbereitung führte bei allen aufbereiteten Materialien zu einer Abreicherung des über die Säurelöslichkeit definierten Zementsteins in der Schwerfraktion. Die Größenordnung variierte jedoch in Abhängigkeit von den Anlageneinstellungen. Durchschnittswerte mehrerer Fahrten (Material A: 70, Material B: 10, Vorabsiebung: 20) der unterschiedlichen Materialien sind in Abbildung 3 dargestellt. Bezugsgröße der Veränderung sind die Zementsteingehalte des jeweiligen Ausgangsmaterials.

Die Veränderung der Zementsteingehalte führte erwartungsgemäß auch zu einer Veränderung der 10-Minuten-Wasseraufnahme der einzelnen Fraktionen. Die Wasseraufnahme in der Schwerfraktion verringerte sich wie beabsichtigt bei sämtlichen untersuchten Schwergutproben, gleichzeitig war ein Anstieg der Wasseraufnahme der Leichtfraktionen bei Material A und B zu verzeichnen.

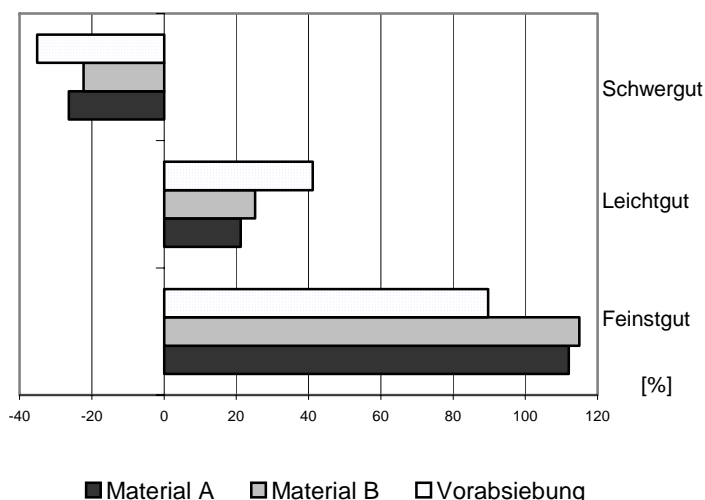


Abb. 3: An- und Abreicherungen von Zementstein (gemessen als säurelösliche Anteile) in den aufbereiteten Brechsandfraktionen

Die Leichtfraktion der Vorabsiebung war aufgrund erhöhter Schluffgehalte nicht für die Herstellung von Mörtel geeignet. Ebenso wurde auf die Messung der Wasseraufnahme der Feinstfraktionen verzichtet. Die durchschnittlichen Werte der Wasseraufnahme der einzelnen Austragsfraktionen sind in Abbildung 4 dargestellt.

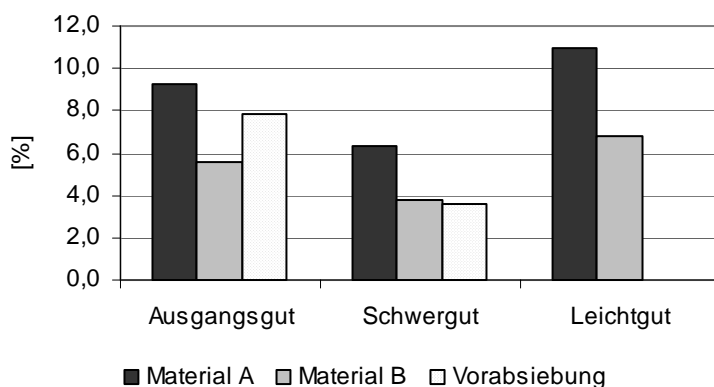


Abb. 4: Wasseraufnahme vor und nach der Aufbereitung bezogen auf die Trockensubstanz

Die Ergebnisse der Messungen von Kornrohichte und Reindichte der Materialien A und B sowie der Vorabsiebung bestätigten in jeder geprüften Versuchsreihe eine Erhöhung der Dichten im Schwergut und überwiegend eine Reduzierung der Leichtgutdichten im Vergleich zum Ausgangsmaterial. In Ausnahmen war die Dichte des Leichtgutes im Vergleich zum Ausgangsmaterial jedoch geringfügig erhöht. Dies beruhte auf dem Abrieb der anhaftenden Zementmatrix, verbunden mit einer nicht ausgeprägten Dichtentrennung. Die Dichten des Schwergutes lagen jedoch in jeder Messung über den Dichten des Leichtgutes.

Ein weiterer beabsichtigter Effekt des Nassaufbereitungsverfahrens war die Reduzierung des Sulfat- und Chloridgehaltes im Schwergut, da diese als Problemstoffe bei der Herstellung von Beton und Mörtel nicht erwünscht sind. Wie erwartet haben

sich die Gehalte an Sulfat und Chlorid in den Eluaten (hergestellt in Anlehnung an das Verfahren DEV S4 (DIN 38 414-4)) aus Schwergut, im Vergleich zu den Werten von Eluaten aus dem entsprechenden Ausgangsgut, in den meisten Versuchen verringert. Jedoch lagen bereits die Gehalte der eluierbaren Sulfate und Chloride des Ausgangsmaterials deutlich unter den zulässigen Höchstwerten nach der Richtlinie des DAfStb, Anhang 2-3, [7, 15] von 600 mg/l für Sulfat und 150 mg/l für Chlorid.

Der überwiegende Teil der Baustoffprüfungen wurde an Mörtelprüfkörpern durchgeführt. Da aufgrund des Größtkorns von 4 mm die Gesteinskörnung zu 100 % aus Betonbrechsand bestehen kann, sollten Veränderungen der Materialeigenschaften hier deutlichere Auswirkungen haben als in Beton, der auch gröbere Körnungen enthalten muss.

Die Reduzierung von Zementsteingehalten und Wasseraufnahme sowie die Erhöhung der Dichte belegten, dass sich die Materialeigenschaften in der Schwerfraktion – wie gewünscht – in Richtung natürlicher Gesteinskörnung verlagert haben. Daher war eine Verbesserung der Eignung des Materials als Gesteinskörnung für die Baustoffherstellung zu erwarten. Dies wird auch durch Ergebnisse der Messungen von Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit und dynamischem Elastizitätsmodul an den getesteten Mörtelprüfkörpern aus Betonbrechsand bestätigt. Die Ergebnisse der aus dem Material Vorabsiebung hergestellten Mörtelprüfkörper variierten stärker. Erwartungsgemäß war die positive Veränderung bei den gemessenen Werten des dynamischen Elastizitätsmoduls von Betonbrechsand und Vorabsiebung am größten [4].

Die Ergebnisse der Festigkeitsmessungen lagen jedoch klar unter den an Mörtelprüfkörpern aus Natursand gemessenen Werten. Sichtbar wurde anhand der Untersuchungsergebnisse ebenfalls, dass bei dem vollständigen Ersatz von natürlicher Gesteinskörnung im Mörtel durch Brechsand auch Klassierungseffekte des Materials in der Setzmaschine einen deutlichen Einfluss ausüben.

In Ergänzung zu den Mörteltests wurden Baustoffprüfungen an aus Betonbrechsand, Schwergut und Ausgangsmaterial, hergestellten Betonprüfkörpern durchgeführt. Die Prüfkörper hatten einen Brechsandanteil von bis zu 50 % der gesamten Gesteinskörnung. Die Ergebnisse wurden mit denen von Betonproben mit reiner Natursteinkörnung verglichen. Um den Einfluss von durch die Aufbereitung verursachten Sieblinienunterschieden auszuschließen, wurden die Sieblinien der eingesetzten Gesteinskörnungen entsprechend einheitlich zusammengestellt.

Bei einem Brechsandanteil von 20 % an der Gesteinskörnung wurde kein Verlust der Druckfestigkeit festgestellt. Bei einem Brechsandanteil von 50 % betrug die Verringerung der Festigkeit bei nur trocken aufbereitetem Ausgangsmaterial ca. 20 %. Wesentlich geringer, nämlich nur 5 %, war der Druckfestigkeitsverlust bei dem mittels Nassaufbereitung gewonnenem Schwergut. Diese Ergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt.

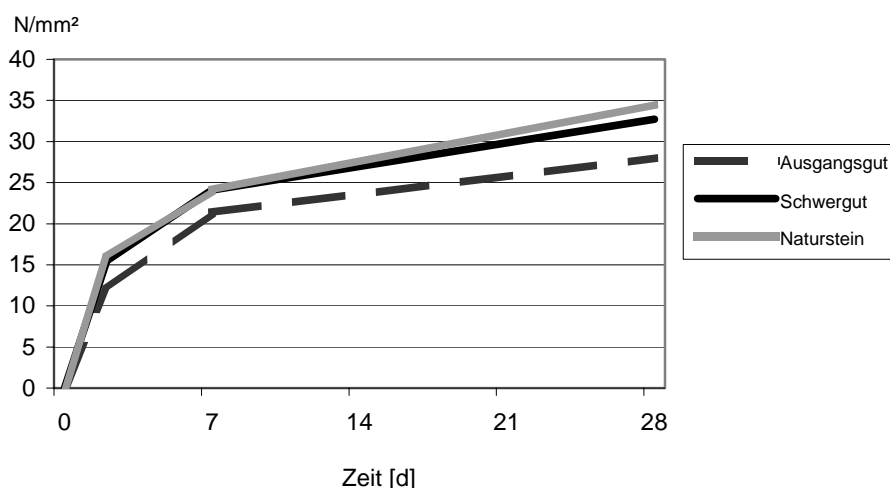


Abb. 5: Entwicklung der Druckfestigkeit von Betonprüfkörpern mit einem Betonbrechsandanteil von 50 % der Gesamtgesteinskörnung

Kompostierung

Voraussetzung für den Einsatz der bei der Nassaufbereitung anfallenden Reststoffe Leichtgut und Feinstgut in der Kompostierung ist die Einhaltung der gesetzlich festgelegten Grenzwerte für Schadstoffe. Da das Versuchsmaterial mittels selektivem Rückbau gewonnen wurde, konnten auch die aufgrund einer geringfügigen Anreicherung stärker belasteten Reststoffe den Anforderungen genügen. Der Einsatz als mineralischer Kompostzuschlagstoff nach Anhang 1 der Bioabfallverordnung [16] war somit möglich.

Das Material wurde in Größenordnungen von 2,5 % – 5 % Masseanteil zusammen mit Grünschnitt kompostiert. Zum Vergleich wurden Ansätze mit anderen mineralischen Beigaben in Rotteboxen von 1 m³ Inhalt angesetzt (siehe Abbildung 3). Freilandversuche waren aufgrund der Witterungsverhältnisse im Versuchszeitraum nicht möglich.



Abb. 3: Umsetzung von Kompost mit Gehalten an Feinst- und Leichtfraktion

Im Anschluss an die Rotte wurden Kressetests für eine erste Bewertung der Eignung der Materialien Leichtgut und Feinstgut durchgeführt. Die Auswertung der Versuche ergab, dass die Reststoffe der Brechsandaufbereitung sich in der Rotte ähnlich verhielten wie natürliche mineralische Beigaben. Die Feinstfraktion erwies sich hierbei als geeigneter als die Leichtfraktion, dies ist möglicherweise mit dem zusätzlichen Gehalt an gut abbaubarer organischer Substanz, dem Flockungsmittel, oder mit einem besseren Wasserhaltevermögen zu erklären.

Für die Umsetzung in einen größeren Maßstab müssten jedoch noch weitere Versuche und vertiefende Untersuchungen erfolgen. Grundsätzlich könnte die Möglichkeit zur Kompostierung von – in Hinblick auf Schadstoffe unbedenklichen – Reststoffen aus der Nassaufbereitung von Betonbrechsand auch in größeren Maßstab umsetzbar sein.

Ökologische Bewertung des untersuchten Verfahrens zur Nassaufbereitung von Betonbrechsand

Ziel der ökologischen Betrachtung des untersuchten Nassaufbereitungsverfahrens für Betonbrechsand ist die Bewertung der Umweltverträglichkeit des produzierten Schwergutes in Hinblick auf den Einsatz in der Betonherstellung und der Vergleich mit der Umweltverträglichkeit des Rohstoffs Natursand. Da gerade bei einem Recyclingprozess die Umweltverträglichkeit eine Schlüsselrolle spielt, kann die ökologische Bewertung innerhalb des Demonstrationsprojektes neben der technischen Bewertung als Entscheidungshilfe für eine weitere Verfolgung dieses Verfahrens gesehen werden.

Als Untersuchungsrahmen wurde der Aufbereitungsprozess unter Einsatz der Setzmaschinenteknik, also die Herstellung eines für die Betonproduktion geeigneten Schwergutes, festgelegt. Die Untersuchung der am Prozess beteiligten Stoffströme sowie des Energieverbrauchs in der Aufbereitungsanlage erfolgte mit einem Software-Programm für Ökobilanzierung und Stoffstromanalysen [17]. Die Angaben zur ökologischen Bewertung von Natursand wurden der Literatur entnommen [18].

Da im Rahmen der ökologischen Bewertung davon ausgegangen wurde, dass das Material Betonbrechsand als Reststoff bei der Verwertung von Altbeton anfällt und damit ein Transport vom Entstehungsort zu einer weiteren Verwertung oder Entsorgung in jedem Fall anfallen wird, wurden die Transporte nicht in die Bewertung miteinbezogen. Gleichzeitig wäre die Bereitstellung von Natursand für die Betonherstellung ebenfalls mit Transporten verbunden, deren Abschätzung nicht Bestandteil der in diesem Rahmen durchgeführten ökologischen Betrachtung ist. Bei der Planung einer Anlage für den industriellen Einsatz muss jedoch die Bewertung der notwendigen Transporte in die standortbezogene ökologische Betrachtung einfließen [18].

Entsprechend wurden bei der Festlegung der Input- und Outputströme im Rahmen der Sachbilanzierung nur die am eigentlichen Aufbereitungsprozess beteiligten Stoffströme erfasst. Die identifizierten und quantifizierten Input- und Output-Ströme sind in der nachfolgenden Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4: Input- und Output-Ströme des untersuchten Nassaufbereitungsverfahrens

Input-Ströme	Output-Ströme
Energie	Emissionen
Prozesswasserzugabe	Abwasser
Ausgangsgut	Schwertgut
	Leichtgut
	Feinstgut

Die im Rahmen der Versuche durchgeführten Messungen der Energieaufnahmen der Einzelaggregate wurden ausgewertet. Da die Versuchsanlage der BAM als Pilotanlage den räumlichen Gegebenheiten des Instituts sowie verschiedenen Verfahrensoptionen angepasst worden war, ist sie vergleichsweise aufwändig ausgestattet. Daher wurde die Anlage für die Übertragung in einen industriellen Maßstab modifiziert und der Durchsatz vergrößert. Mit diesem Schritt konnten zahlreiche Aggregate entfallen bzw. modifiziert werden. So wurde beispielsweise für die Entwässerung der Feinstfraktion statt des Dekanters eine Kammerfilterpresse vorgesehen. Für diese Anlage wurde der Energieverbrauch auf Basis der tatsächlich gemessenen Werte abgeschätzt. Für die Herstellung von 1 t Schwertgut für die Betonproduktion würden nach dieser Abschätzung 20,8 kWh benötigt [19].

Für eine vereinfachte Wirkungsabschätzung wurden die folgenden Parameter herangezogen:

- Energieverbrauch sowie entsprechend
- Kohlendioxid und weitere CO₂-Äquivalente
- Schwefeldioxid-Äquivalente
- Einsparung des Rohstoffs Natursand.

Die ökologische Bewertung des Aufbereitungsprozesses erfolgte anhand des ökobilanziellen Vergleichs der Herstellung von Betonkörpern von jeweils 1 m³ Beton gleicher Rezeptur jedoch mit und ohne einen Anteil von 7 % an aufbereitetem Betonbrechsand an der Gesteinskörnung [19]. Hierbei wurden Daten aus der Literatur [18] zu den Energieverbräuchen der eingesetzten Stoffe zugrundegelegt.

Der Energieverbrauch zur Herstellung des Betonkörpers mit RC-Gesteinskörnung lag dabei mit 43,92 kWh nur um etwa 8 % über dem Energieverbrauch für die Herstellung von einem m³ Beton ohne RC-Anteile, da die Bereitstellung des Zements den größten Anteil am Energieverbrauch verursacht [18, 20]. Demgegenüber steht die Ersparnis der natürlichen Ressource Sand, sowie gegebenenfalls eingesparter Deponieraum.

Ökonomische Bewertung des Nassaufbereitung von Betonbrechsand

Für die Durchführung einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, wurde eine Modellanlage entworfen, die auf eine Durchsatzleistung von 10 t/h ausgelegt wurde. Grundüberlegung des Einsatzes einer Anlage mit diesem – vergleichsweise geringen – Durch-

satz ist, die Brechsandaufbereitung als zusätzliche Produktionsstrecke in einem bereits bestehenden Aufbereitungsbetrieb einzurichten. Die Investitionskosten beziehen sich daher auf die Integration der Anlage in ein bestehendes Unternehmen. Auf diese Weise kann vorhandene Infrastruktur genutzt werden und auch das benötigte Personal kann noch anderen Aufgaben nachgehen.

Für die Berechnungen wurde die im Rahmen des Projektes betriebene Versuchsanlage der BAM, wie in dem vorherigen Abschnitt kurz beschrieben, auch in Hinblick auf die Betriebskosten modifiziert. Auf Basis dieser Modellanlage wurden die Aufbereitungskosten pro Tonne Schwerfraktion abgeschätzt.

Es wurde von einer Nutzungsdauer von 10 Jahren und einer Auslastung von durchschnittlich 170 Stunden im Monat ausgegangen. Die Basis für die Energiekosten wurde wie oben beschrieben mit 20,8 kWh abgeschätzt und mit den Preisen für Großkunden des örtlichen Energieversorgers bewertet [19]. Der Verbrauch von Frischwasser von 0,14 m³ pro 1 t Trockensubstanz des aufbereiteten Betonbrechsandes verursacht vergleichsmäßig geringe Kosten.

Die Lohnkosten für den Betrieb der Anlage wurden nach aktuellen Schätzungen des Statistischen Bundesamtes berechnet. Es wurden weiterhin Gemeinkosten abgeschätzt und berücksichtigt. Die Kosten der vorgeschalteten Trockenaufbereitung werden durch die Erlöse der produzierten gröberen Körnungen ausgeglichen und gehen aus diesem Grund nicht in die Kalkulation ein. Weiterhin wurde die Annahme getroffen, dass sich die Reststoffe als Ersatz für Gesteinsmehle ohne zusätzliche Entsorgungs- oder Transportkosten in der Kompostherstellung verwerten lassen.

Die so für den aufbereiteten Betonbrechsand ermittelten Kosten liegen bei ca. 10 Euro pro Tonne und damit über den Kosten für Natursand, der oftmals schon für 4 – 8 Euro pro Tonne erhältlich ist [21]. Wie beschrieben, handelt es sich hierbei ausschließlich um die Kosten der Nassaufbereitung.

Zur Zeit werden sowohl die ökologische als auch die ökonomische Bewertung des Nassaufbereitungsverfahrens unter Berücksichtigung neuer Erkenntnisse, wie z.B. dem möglichen Verzicht auf ein Aufschlussaggregat, überarbeitet. Von der Überarbeitung werden neue Erkenntnisse für eine mögliche Reduzierung der bisher abgeschätzten Energieverbräuche und Produktionskosten erwartet.

Zusammenfassung und Ausblick

Das vorgestellte EU-LIFE-Demonstrationsprojekt RECDEMO hatte zum Ziel die Möglichkeiten einer vollständigen Verwertung von Betonbrechsand durch eine Nassaufbereitung zur Gesteinskörnung für die Baustoffherstellung und die Nutzung der dabei anfallenden Reststoffe in der Kompostierung aufzuzeigen.

Als erster Schritt wurde die Gewinnung eines unbelasteten Betonbrechsandes durch selektiven Abbruch und umfangreiche Qualitätssicherung mittels analytischer Schnelltests und verschiedener Kontrollstufen im Rahmen der trockenen Aufbereitung sichergestellt.

Die Untersuchungen zur Nassaufbereitung haben gezeigt, dass mittels Einsatz der Setzmaschinenteknik zur Dichtentrennung die Materialeigenschaften von Beton-

brechsand in Hinblick auf den Einsatz als Gesteinskörnung für die Baustoffherstellung, wie z.B. Wasseraufnahme, Dichte, Natursteinanteil, gegenüber dem Ausgangsmaterial verbessert werden können. Dies schlägt sich auch in den Ergebnissen der Prüfungen der aus den rezyklierten Gesteinskörnungen hergestellten Mörtel oder Betonprüfkörper nieder.

Die Qualität von Natursanden kann jedoch nicht erreicht werden. Ursachen hierfür können in noch im Brechsand enthaltenen Zementsteingehalten und der damit verbundenen erhöhten Porosität gefunden werden. Anreicherungen von leichter brechbaren Mineralen in der Sandfraktion sowie durch den Brechvorgang geschaffene ungünstigere Kornformen sind weitere negative Einflussfaktoren. Dennoch konnte der Einsatz der aufbereiteten Schwerfraktion als Gesteinskörnung in Beton in unseren Versuchen bis zu einem bestimmten Prozentsatz ohne Verluste bei der Druckfestigkeit erfolgen.

Die bei der Aufbereitung angefallenen Reststoffe Leichtgut und Feinstgut konnten in den im Rahmen des Projektes durchgeführten Kompostierungsversuchen als Ersatz für natürliche Zuschläge für die Mineralisierung verwendet werden. Grundvoraussetzung ist die Unbedenklichkeit in Hinblick auf den Schadstoffgehalt. Für abschließende Aussagen müssten noch weitere, vertiefende Untersuchungen erfolgen.

Eine ökologische Bewertung des Nassaufbereitungsprozesses ergab, dass der Energieaufwand und die damit verbundenen Emissionen für die Herstellung von Beton mit einem Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung etwas höher sind, als bei herkömmlichen Betonen. Dem gegenüber steht jedoch ein reduzierter Flächenverbrauch. Die Abschätzung der Kosten für die Nassaufbereitung von Betonbrechsand liegen nach derzeitigem Kenntnisstand über denen von Natursand und wären bei der derzeitigen Situation in der Bauwirtschaft in Deutschland nicht marktfähig.

Denkbar wäre jedoch der Nutzung der Betonbrechsandaufbereitung in überwiegend gebirgigen Gebieten, z.B. der Schweiz, in denen gebietsweise ein Mangel an feinen Gesteinskörnungen besteht [22]. Weiterhin könnte es in Zukunft auch in Deutschland regional zu Engpässen bei der Bereitstellung von Natursand kommen. Aufgrund der Probleme bei der Genehmigung neuer Standorte wird die Ausbeutung von natürlichen Lagerstätten zunehmend intensiver betrieben werden. Dies führt auch dazu, dass bei der Gewinnung von natürlichen Gesteinskörnungen ein verstärkter, kostenintensiver Aufwand, z.B. mit Setzmaschinen, für die Aufbereitung der Naturrohstoffe betrieben wird [23].

Grundvoraussetzung für die Weiterverfolgung der Nassaufbereitung von Betonbrechsanden für die Baustoffherstellung wäre jedoch eine größere Akzeptanz bei den späteren Nutzern von RC-Baustoffen und eine Erleichterung bei der Umsetzung von Verfahren im Recyclingbereich.

Literaturverzeichnis

- [1] 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.

- [2] Saxer, A., Lukas, W. and Deisl, M., Herstellung von Betonen mit Zuschlägen aus der Wiederverwertung von anorganischen Baureststoffen, 7. Weimarer Fachtagung über Abfall- und Sekundärrohstoffwirtschaft, Weimar, Bauhaus-Universität Weimar (Publisher), 1999.
- [3] Grübl, P. and Rühl, M., Der Einfluß von Recyclingzuschlägen aus Bauschutt auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften und die Bewertung hinsichtlich der Eignung für Baustellen- und Transportbeton nach DIN 1045. Institut für Massivbau - TU Darmstadt, Zwischenbericht (BiM E/03), 09/98 TP E03, Darmstadt, 1998.
- [4] Müller, A., Baustoffkreisläufe - Stand und Entwicklung, ibausil, Weimar, 2003, pp 1289-1308.
- [5] Schmiedmayer, R. and Friedl, L., Zwischenbericht 2/1997 zum BMBF-Forschungsvorhaben "Baustoffkreislauf im Massivbau" Teilprojekt D/01. Technische Universität München, Baustoffinstitut, Zwischenbericht, 2, München, 1997.
- [6] KWTB, 3. Monitoring-Bericht Bauabfälle (Erhebung 2000). Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau, Berlin, Düsseldorf, Duisburg, 2003.
- [7] 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)
- [8] Vazquez, E., Alaejos, P., Sanchez, M., Dapena, E., Barra, M., Exteberria, M. et al., Draft of spanish regulations for the use of recycled aggregate in the production of structural concrete, Use of recycled materials in building and structures, Barcelona, Vazquez, E., Hendriks, C.F. and Janssen, G.M.T. (Editors), RILEM Publications S.a.r.l., Bagneux, France (Publisher), 2004, pp 511-515.
- [9] BAM, Vollständige Verwertung der Sandfraktion aus dem Bauschuttrecycling - Recdemo. Bundesanstalt für Materialforschung und- prüfung, Website, www.recdemo.bam.de, 2005.
- [10] Kümmel, J., Ökobilanzierung von Baustoffen am Beispiel des Recyclings von Konstruktionsleichtbeton, Bauingenieur- und Vermessungswesen, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, Doktorarbeit, 2002.
- [11] Schachermayer, E., Lahner, T. and Brunner, P., Stoffflussanalyse und Vergleich zweier Aufbereitungstechniken für Baurestmassen. Monographien, Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie, Österreich, Wien, 1998.
- [12] Kurkowski, H., Nyatanyi, I. and Penzel, U., Eingangskontrolle und Trockenaufbereitung von rezyklierten Betonsand und -splitten, Bericht zum EU-LIFE Vorhaben "Recdemo", Dresden, 2002.
- [13] Fellensiek, E. and Erdmann, W., Die Setzsartierung - geschichtliche und maschinentechnische Entwicklung, Aufbereitungs-Technik 32(11) (1991) 599-607.
- [14] Mesters, K. and Krass, K., Großtechnische Aufbereitung von RC-Baustoffen mittels Dichtentrennung. Krass & Mesters, Beratungsgesellschaft mbH, Forschungsbericht für Industrieunternehmen, unveröffentlicht, FE 961215, Bochum, 1997.
- [15] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, DAfStb-Richtlinie "Beton mit rezykliertem Zuschlag" Teil 1 und Teil 2, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (1998)
- [16] Bioabfallverordnung (BioAbfVO) Anhang 1 (1998), BGBl. I, 2955
- [17] ifu, Umberto. ifu Hamburg GmbH, Internet: <http://www.umberto.de/de/>, 2004.
- [18] Eyerer, P. and Reinhardt, H.-W., Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden. Baupraxis, Birkhäuser Verlag, Basel, 2000.

- [19] Dzaferi, K., Stoffstromanalyse und ökologische Bewertung des Recyclingprozesses von Betonbrechsand, Betriebliche Umweltinformatik, Fachhochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Bachelorthesis, 2003.
- [20] Weil, M., Jeske, U. and Schebek, L., Eine ökobilanzielle Betrachtung, Baustoff Recycling + Deponietechnik (BR), Vol. 19, 2003, pp 30-41.
- [21] Friedl, L., Perspektiven für Recycling-Körnungen, 3. Münchner Baustoffseminar, München, 2003, pp 18.
- [22] Jacobs, F., Nachhaltiges Bauen mit Beton, TFB cementbulletin, CH 68(7/8) (1999)
- [23] Pollmanns, J., Effektive Kiesentholzung mit Setzmaschinen. Vortrag, Forum Kies und Sand 2004, Vortrag, Aachen, 2004.

Verfasser:

Dipl.-Ing. Karin Weimann, Dr. rer. nat. Lutz B. Giese
Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM)
Fachgruppe IV.3: Abfallbehandlung und Altlastensanierung
Unter den Eichen 87
12005 Berlin
e-Mail: karin.weimann@bam.de oder lutz.giese@bam.de
Tel.: 030 / 8104 - 4839 oder – 030 / 6392-5962