

## **Verwertung überschüssiger Sandfraktionen für die Herstellung von Mineralmehlen für selbstverdichtenden Beton**

### **1. Einleitung**

Das Forschungsthema „Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung selbstverdichtender Betone auf der Basis hochfeiner Mineralmehle“ wird im Rahmen des Förderprogramms „Innovationskompetenz“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit gefördert. Es wird gemeinsam bearbeitet von:

Dr. O. Ressel  
BBP – Beton- und Baustoffprüftechnik GmbH  
Dortmund

Dipl. Ing. M. Friebert  
Bauhaus-Universität Weimar  
Fakultät Bauingenieurwesen  
F. A. Finger – Institut für Baustoffkunde

Dipl. Ing. G. Seifert  
Bauhaus-Universität Weimar  
Fakultät Bauingenieurwesen  
Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung

Die Zielstellung des Forschungsvorhabens ist, überschüssige Sandfraktionen zu nutzen. Dafür werden drei Schwerpunkte untersucht.

- Ermittlung der Mahlbarkeit verschiedener Materialien
- Untersuchung der Eigenschaften von Betonen mit Mineralmehlzusatz
- Überprüfung der Eignung zur großtechnische Anwendung

Durch experimentelle Untersuchungen mit einem definierten Verfahren wird ein Kennwert der Mahlbarkeit und daraus der Arbeitsindex nach Bond ermittelt. Aus diesem als Stand der Technik zu bezeichnenden Prüfverfahren ergibt sich eine Orientierung zur notwendigen Energie bei der Aufmahlung auf eine festgelegte Feinheit. Nicht berücksichtigt wird dabei, dass die Abhängigkeit des Mahlenergieaufwands von der Feinheit des Mahlprodukts stoffabhängig sein kann, weil sich mit zunehmender Feinheit Stoffeigenschaften wie Fließfähigkeit, Schüttdichte etc. ändern können. Die Korngrößen- und Kornformverteilung der Mahlprodukte ist mit den empirischen Beziehungen ebenfalls nicht vorausbestimmbar und kann nur über experimentelle Untersuchungen ermittelt werden. Für den Einsatz der Mineralmehle im Beton sind aber gerade diese Parameter wichtig, weil sie die Verarbeitbarkeit des Frischbetons (Kornform) und die Gefügeausbildung des Festbetons (Korngrößenverteilung) beeinflussen.

Ein potentielles Einsatzgebiet für hochfeine Mineralmehle ist der selbstverdichtende Beton (SVB). Als relativ neue Variante eines Hochleistungsbetons zeichnet sich SVB durch eine erheblich verbesserte Verarbeitbarkeit aus. Betontechnologische Grundvoraussetzung für SVB ist ein ausreichendes Volumen an Mehlkornsuspension, in welcher die gröberen Zuschläge berührungsfrei "schwimmen" können und

der Einsatz von Hochleistungsverflüssigern. Entgegen den herkömmlichen Ansätzen zum Mischungsentwurf muss der Anteil an Mehlkornsuspension groß genug sein, um ein Zusammenstoßen der Zuschlagkörner untereinander zu verhindern. Die Stoffart des Mehlkorns soll dabei von untergeordneter Bedeutung sein. Die bisher eingesetzten Zusatzstoffe sind zum Teil nicht unbegrenzt vorhanden (Zement, Steinkohlenflugasche, Hüttensand) bzw. ist deren Abbau mit einem hohen Landschaftsverbrauch verbunden (Kalksteinmehl).

Im Bild 1 ist die Zusammensetzung von selbstverdichtendem Beton im Vergleich zu Normalbeton und Hochfestem Beton dargestellt. Es wird deutlich, dass selbstverdichtender Beton einen größeren Anteil an Leim und einen geringeren Anteil an Gesteinskörnungen aufweist.

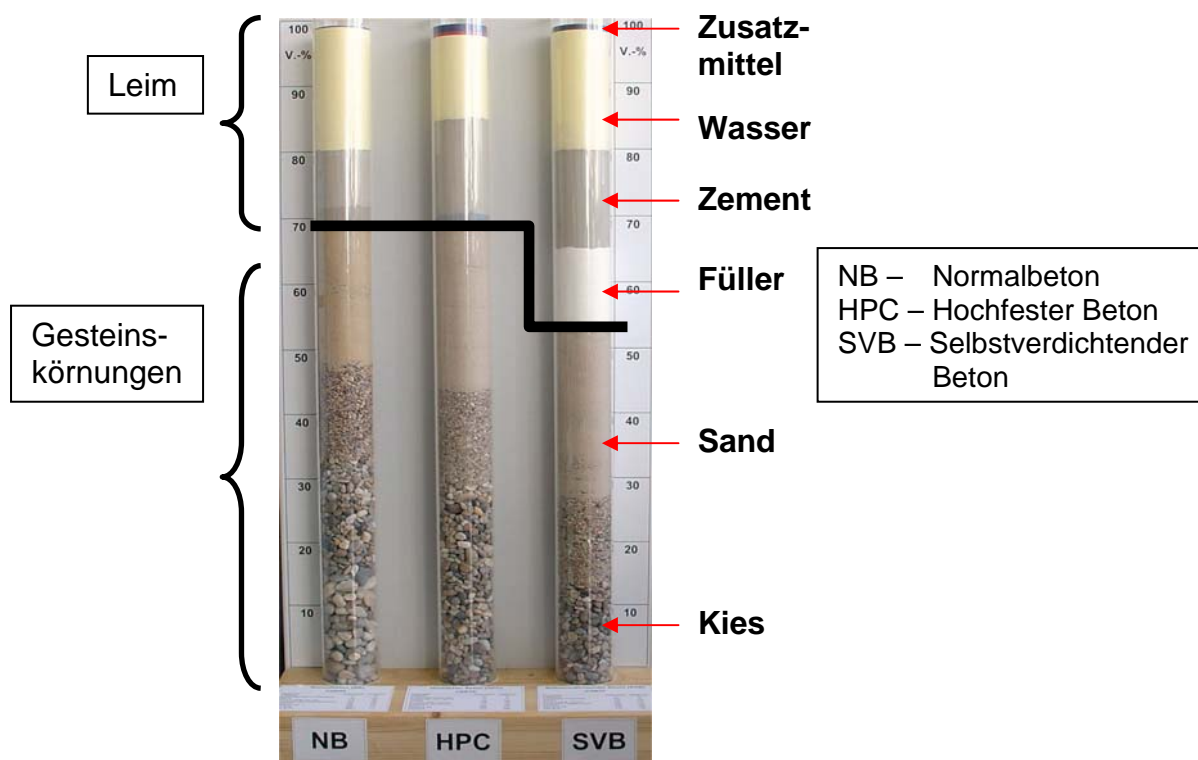


Bild 1: Zusammensetzung von selbstverdichtendem Beton (SVB) [2]

Eine wesentliche Eigenschaft selbstverdichtender Betone ist, dass sie infolge ihrer hohen Fließfähigkeit ohne äußere Einwirkungen jede beliebige Form vollständig ausfüllen können. Der Einsatz von SVB eröffnet damit neue Möglichkeiten im Betonbau. Deshalb ist auf lange Sicht mit einem verstärkten Einsatz dieser Betonart zu rechnen. Weitere Vorteile beim Einsatz von SVB sind die höhere Einbauleistung, die verbesserten gestalterischen Möglichkeiten und der Wegfall körperlich schwerer Verdichtungsarbeit. Nachteilig sind im Wesentlichen die höheren Betonkosten und die höheren Anforderungen an die Betontechnologie. Aufgrund der über die derzeitigen Grenzwerte hinausgehenden Mehlkorngehalte und der sehr hohen Fließfähigkeit ist die Normung von SVB kompliziert und zeitaufwendig. Eine Norm in Deutschland ist derzeit beschlossen, aber noch nicht gültig.

Bei selbstverdichtendem Beton handelt es sich um einen in Europa relativ jungen Baustoff. Die Markteinführung ist mit einer Ausnahme in den europäischen Ländern noch nicht weit vorangeschritten. Die Marktanteile bewegen sich zwischen

0% und 2%. Lediglich in Dänemark (21% in 2003) werden wirklich nennenswerte Anteile selbstverdichtender Beton als Transportbeton produziert.

Die Gründe für die unterschiedliche Marktdurchdringung sind vor allem in der Preisdifferenz zum Beton mit Konsistenz F3 (nach DIN EN 1045 Konsistenzbereich weich mit Ausbreitmaß 42-48 cm) zu sehen. Auf der einen Seite bietet der selbstverdichtende Beton hinsichtlich seiner Verarbeitbarkeit eindeutige Vorteile. Auf der anderen Seite sind die Abnehmer nicht bereit, für diese Vorteile einen deutlich höheren Preis zu bezahlen. Aus diesem Grund wird der selbstverdichtende Beton kurzfristig in den Ländern größere Marktanteile erzielen können, in denen die Preisdifferenz zum Beton mit Konsistenz F3 nicht allzu groß ist. Es muss in diesem Sinne gelingen, durch den Einsatz von Gesteinsmehlen die Herstellungskosten von selbstverdichtendem Beton zu senken, so dass er preisgünstiger angeboten werden kann. Bei einem Transportbetonbedarf von ca. 47 Mio. m<sup>3</sup> in Deutschland im Jahr 2003 wird eingeschätzt, dass der selbstverdichtende Beton ein Potential von 5 – 10 Mio. m<sup>3</sup> Marktanteil hat.

## 2. Aufkommen und Nutzung von Sanden

Sande lassen sich nach ihrer Herkunft wie folgt einteilen und definieren:

- Natursande: ungewaschene Sande aus Lagerstätten mit einer Korngröße < 4 mm
- Brechsande: Sande, die bei der Aufbereitung von mineralischen Rohstoffen entstehen, Sandfraktionen < 4 mm
- Recyclingsande: Sande, die bei der Aufbereitung von mineralischen Abfällen entstehen, Sandfraktionen < 4 mm

Natürliche Gesteinskörnungen werden jährlich 553 Mio. Tonnen produziert, wobei die Kiese und Sande mit 62 % gegenüber den Natursteinen mit 38 % dominieren. Bauschutt fällt pro Jahr in einer Menge von 54,5 Mio. Tonnen an. Nach der Verwertung und Beseitigung kann er wie folgt unterteilt werden [1]:

- Übertägige Verwertung im Bergbau 4,9 Mio. t (9,0 %)
- Verwertung im Deponiebau 1,1 Mio. t (2,0 %)
- Beseitigung in der Deponie 4,2 Mio. t (7,7 %)
- Verwertung im Recycling 40,6 Mio. t (74,5 %)
- Verwertung durch öffentliche Hand 3,7 Mio. t (6,8 %)  
(durch öffentliche Bauträger)

Bei der Aufbereitung von Primärrohstoffen fallen ebenso wie bei der Zerkleinerung von mineralischen Bauabfällen zum Teil erhebliche Mengen an Brechsanden an, für die nur wenige Verwertungsmöglichkeiten bestehen. Für diese Sandfraktionen können durch eine Fein- bzw. Feinstzerkleinerung innovative Verwertungswege erschlossen werden, indem die entstandenen Mahlprodukte in Zementkorngröße als Betonzusatzstoff Einsatz finden. In Abhängigkeit von den Eigenschaften der Mahlprodukte und der Zugabemenge können dadurch Verbesserungen der Eigenschaften von traditionellem Beton erreicht werden oder neue Zusatzstoffe für die Herstellung von selbstverdichtendem Beton rekrutiert werden. Beide Optionen tragen

dazu bei, die Wirtschaftlichkeit der Betonherstellung zu verbessern und gleichzeitig ökologische Vorteile durch die Verwertung bisher nicht verwertbarer Fraktionen zu erzielen.

### 3. Literaturlauswertung zum Einfluss von Feinstoffen auf Mörtel / Beton und deren Mahlbarkeit

Feinstoffe gewinnen bei der Zement- und Betonherstellung zunehmend an Bedeutung. So lässt sich damit zum einen der Klinkeranteil im Zement senken, was energetische Vorteile hat, eine Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emission bewirkt und eine gezielte Beeinflussung der Zementeigenschaften ermöglicht. Zum anderen bewirken hohe Mehlkorngelhalte im Beton eine Verbesserung der Fließfähigkeit und der Packungsdichte.

In der internationalen Literatur zur Zement- und Betonforschung gibt es eine Vielzahl von Veröffentlichungen, die sich mit dem Einfluss von Feinstoffen, die dem Zement oder Beton zugegeben werden, auf die Produkteigenschaften beschäftigen. Allein bei einer Recherche, die sich auf ausgewählte Zeitschriften im Zeitraum nach 2000 bezog, ergaben sich 30 Literaturstellen. Die beschriebenen Stoffe sind sehr vielfältig. Sie lassen sich in drei Gruppen einteilen (Tabelle 1).

Tab. 1: Einteilung der Feinstoffe

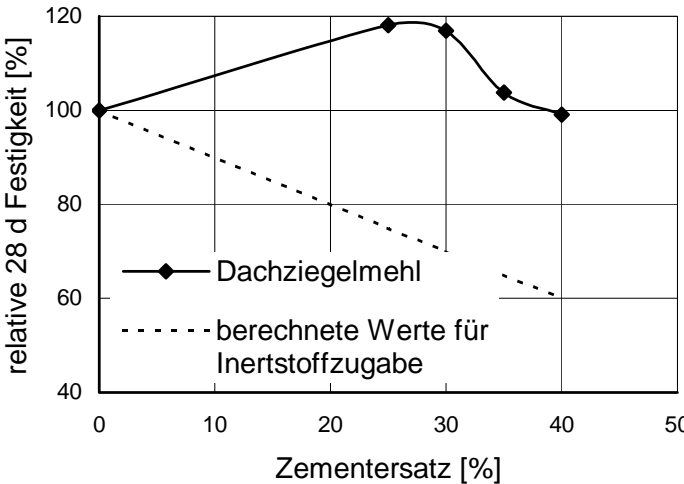
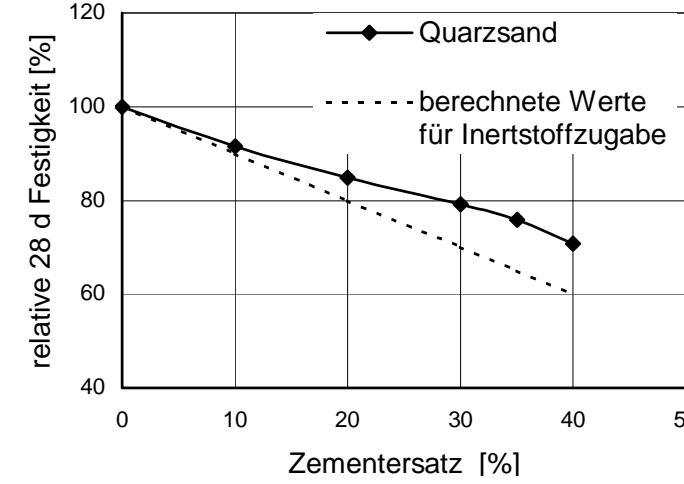
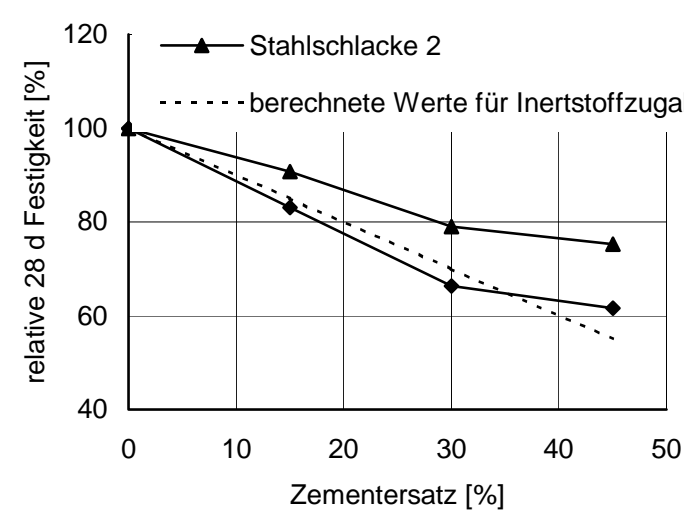
Einteilung	Beispiele
Bauabfälle	Altbeton, Dachziegel, Mauerziegel
Mineralstoffe aus Rohstoffgewinnung und –aufbereitung	Basaltstaub, Kalkstein, Quarz, Korund, Granit, Mineralstaub, Basaltglas, Asche der Bagasseverbrennung, Eisenerz, Borerz, Diatomeenerde, vulkanischer Tuff, Perlit, vulkanische Asche, Bims, Ton
Industrielle Nebenprodukte	Flugasche, Stahlschlacke, Klärschlammasche, Gummi, Hüttensand, Glas, Rostasche, Katalysatorrückstände, Titanerz

Die Recherchen ergaben, dass Mineralmehle verschiedene Wirkungen auf Betone und Mörtel hervorrufen können. Vereinfacht dargestellt, ergeben sich folgende Effekte:

- Verbesserung der Verarbeitbarkeit
- Beeinflussung der Festigkeitsentwicklung
  - Physikal. Ursache → Verringerung des Porengehaltes
  - Chem. Ursache → puzzolanische Reaktionen
- Erhöhung der Dauerhaftigkeit durch Reduzierung von unerwünschten chemischen Reaktionen (Reduzierung der Alkali - Silica – Reaktion)

In den Untersuchungen wurden die Feinstoffe zum einen als Zementsubstitut eingesetzt, d.h. die Feinstoffe wurden zur Herstellung eines Kompositzementes verwendet. Zum anderen wurden die Feinstoffe als Zusatzstoff im Beton eingesetzt. Für die Auswirkungen eines Einsatzes als Zementersatz sind in Tabelle 2 drei Beispiele dargestellt.

Tab. 2: Beispiele für die Auswirkungen des Zementersatzes auf die Festigkeit

Beispiel	Festigkeitsentwicklung	Literatur																				
<p>Bauabfälle</p> <p><b>Dachziegel- mehl</b></p> <p>Spezifische Oberfläche der Mischzemente 3513 cm<sup>2</sup>/g bis 3813 cm<sup>2</sup>/g</p>	 <table border="1"> <caption>Data for Dachziegelmehl</caption> <thead> <tr> <th>Zementersatz [%]</th> <th>relative 28 d Festigkeit [%]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>100</td></tr> <tr><td>25</td><td>118</td></tr> <tr><td>30</td><td>115</td></tr> <tr><td>35</td><td>105</td></tr> <tr><td>40</td><td>100</td></tr> </tbody> </table>	Zementersatz [%]	relative 28 d Festigkeit [%]	0	100	25	118	30	115	35	105	40	100	<p>Nuran Ay; Mevlüt Ünal: CCR 30 (2000)</p>								
Zementersatz [%]	relative 28 d Festigkeit [%]																					
0	100																					
25	118																					
30	115																					
35	105																					
40	100																					
<p>Mineralstoffe aus Rohstoff- gewinnung und -aufbereitung</p> <p><b>Quarzsand</b></p> <p>Spezifische Oberfläche 3540 cm<sup>2</sup>/g</p>	 <table border="1"> <caption>Data for Quarzsand</caption> <thead> <tr> <th>Zementersatz [%]</th> <th>relative 28 d Festigkeit [%]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>100</td></tr> <tr><td>10</td><td>90</td></tr> <tr><td>20</td><td>85</td></tr> <tr><td>30</td><td>80</td></tr> <tr><td>35</td><td>75</td></tr> <tr><td>40</td><td>70</td></tr> </tbody> </table>	Zementersatz [%]	relative 28 d Festigkeit [%]	0	100	10	90	20	85	30	80	35	75	40	70	<p>Quanbing Yang; Shuqing Zhang; Shiyuan Huang; Yaohui He: CCR 30 (2000) S. 1993–1998</p>						
Zementersatz [%]	relative 28 d Festigkeit [%]																					
0	100																					
10	90																					
20	85																					
30	80																					
35	75																					
40	70																					
<p>Industrielle Nebenprodukte</p> <p><b>Stahlschlacke</b></p> <p>Spezifische Oberfläche 4000 cm<sup>2</sup>/g bzw. 4700 cm<sup>2</sup>/g</p>	 <table border="1"> <caption>Data for Stahlschlacke 1</caption> <thead> <tr> <th>Zementersatz [%]</th> <th>relative 28 d Festigkeit [%]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>100</td></tr> <tr><td>15</td><td>85</td></tr> <tr><td>30</td><td>65</td></tr> <tr><td>45</td><td>60</td></tr> </tbody> </table> <table border="1"> <caption>Data for Stahlschlacke 2</caption> <thead> <tr> <th>Zementersatz [%]</th> <th>relative 28 d Festigkeit [%]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>100</td></tr> <tr><td>15</td><td>90</td></tr> <tr><td>30</td><td>78</td></tr> <tr><td>45</td><td>75</td></tr> </tbody> </table>	Zementersatz [%]	relative 28 d Festigkeit [%]	0	100	15	85	30	65	45	60	Zementersatz [%]	relative 28 d Festigkeit [%]	0	100	15	90	30	78	45	75	<p>Akin Altun; I. Yilmaz: CCR 32 (2002) S. 1247-1249</p>
Zementersatz [%]	relative 28 d Festigkeit [%]																					
0	100																					
15	85																					
30	65																					
45	60																					
Zementersatz [%]	relative 28 d Festigkeit [%]																					
0	100																					
15	90																					
30	78																					
45	75																					

Anhand der Festigkeitskurven ist zu erkennen, dass der Zementersatz durch Dachziegelmehl eine deutliche Festigkeitserhöhung bis zu einer Zusatzmenge von 30% zur Folge hat. Höhere Zugaben bewirken einen Rückgang der Festigkeit. Weiter zeigt sich, dass Quarzmehl nicht vollständig inert ist. Auch hier ist eine signifikante Festigkeitserhöhung bei Zementersatz zu beobachten. Die Mehle aus Stahlschlacken hingegen beeinflussen die Festigkeit nicht oder nur geringfügig, obwohl diese Mehle die höchste Feinheit von den dargestellten drei Beispielen aufwiesen.

Über die Mahlbarkeit von Rohstoffen und Abfällen, die traditionell im Grobkornbereich angewandt werden, ist in der Literatur wenig bekannt. So liegen nur für bestimmte Primärrohstoffe oder traditionelle Zumahlstoffe wie Kalkstein und Hüttensand Erfahrungen zur Feinzerkleinerung vor, während für andere Rohstoffe oder für industrielle Nebenprodukte und mineralische Bauabfälle solche Kenntnisse völlig fehlen. Insbesondere werden Daten zur Mahlbarkeit und zum Verschleißverhalten benötigt, da es dafür keine zuverlässigen theoretischen Ansätze gibt, die eine Vorhersage anhand stofflicher Parameter etc. ermöglichen.

#### 4. Untersuchungen zur Mahlbarkeit

In den technologischen Untersuchungen zur Zerkleinerung werden die oben dargestellten Defizite in bezug auf die Feinzerkleinerung von mineralischen Primär- und Sekundärrohstoffen abgebaut, indem im ersten Schritt der Kennwert Mahlbarkeit und der daraus resultierende Arbeitsindex dieser Stoffe in der Definition von Bond in einer Labormühle experimentell ermittelt wird.

Durch experimentelle Untersuchungen mit einem definierten Verfahren wird ein Kennwert ermittelt, aus dem über empirische Beziehungen, die als stoffunabhängig angenommen werden, der Mahlenergieaufwand für eine bestimmte Feinheit ermittelt wird.

##### 4.1 Auswahl der Proben

Die Proben stammen aus allen drei Gruppen nach der Herkunft:

- Bauabfälle
- Mineralstoffe aus Rohstoffgewinnung und –aufbereitung
- Industrielle Nebenprodukte

Tab. 3: Ausgewählte Materialien

Einteilung	Material
Bauabfälle	Altbeton mit Zertifikat, Altbeton, Abbruchziegel
Mineralstoffe aus der Rohstoffgewinnung und –aufbereitung	Grauwacke (von 2 Lagerstätten), Kalkstein (von 2 Lagerstätten), Kalkstein / Dolomit (von 2 Lagerstätten), Quarzsand (von 2 Lagerstätten)
Industrielle Nebenprodukte	Hüttensand

## 4.2 Mahlbarkeit und Arbeitsaufwand nach Bond

### 4.2.1 Methode zur Bestimmung der Mahlbarkeit

Der hier verwendete Mahltest wurde von F. C. Bond, einem amerikanischen Aufbereitungsingenieur in der Mitte des vorigen Jahrhunderts entwickelt. Die erste Veröffentlichung dazu, in der das Verfahren beschrieben ist und erste Angaben zur Mahlbarkeit mehrerer mineralischer Stoffe gemacht werden, stammt aus dem Jahre 1952. Der Mahlbarkeitstest ist ein Verfahren, dass eine Kreislaufmahlung in einer Kugelmühle simuliert (Klassiermahlung).

Nach Beendigung des Tests erhält man einen Kennwert für die Mahlbarkeit ( $G$  in Gramm/Umdrehung), der unter konstanten, definierten Bedingungen ermittelt wurde. Daraus lässt sich ableiten, ob ein Material leicht oder schwer mahlbar ist.

Die experimentell ermittelte Mahlbarkeit  $G$  bildet die Grundlage für die Ermittlung des spezifischen Energieverbrauchs eines Materials beim Zerkleinerungsvorgang anhand einer von Bond empirisch ermittelten Formel (Gleichung 1). Das Ergebnis, der Arbeitsindex nach Bond ( $w_i$  in kWh/t), drückt aus, wie viel Energie notwendig ist, um eine Tonne eines bestimmten Materials von theoretisch unendlicher Korngröße auf eine gewünschte Feinheit aufzumahlen. Mit Hilfe des Arbeitsindex ist es möglich, verschiedene Stoffe in Bezug auf ihr Zerkleinerungsverhalten unter bestimmten, einheitlichen Beanspruchungsbedingungen zu beurteilen.

Beim Versuch wird angestrebt, dass nach einer bestimmten Mahldauer 28,6 % des vorliegenden Mahlgutvolumens, welches konstant 700 ml beträgt, als Feingut vorliegen. Wenn dieser Wert erreicht ist, befindet sich das System im stabilen Zustand und die umlaufende Last des Kreislaufs beträgt 250 %.

Unter umlaufender Last versteht man den Quotienten der zurückgeführten Feststoffmasse zum Eingangsmassenstrom des Kreislaufs. Die Umlaufzahl hingegen gibt den Quotienten der zurückgeführten Masse zum Mühleneingang an.

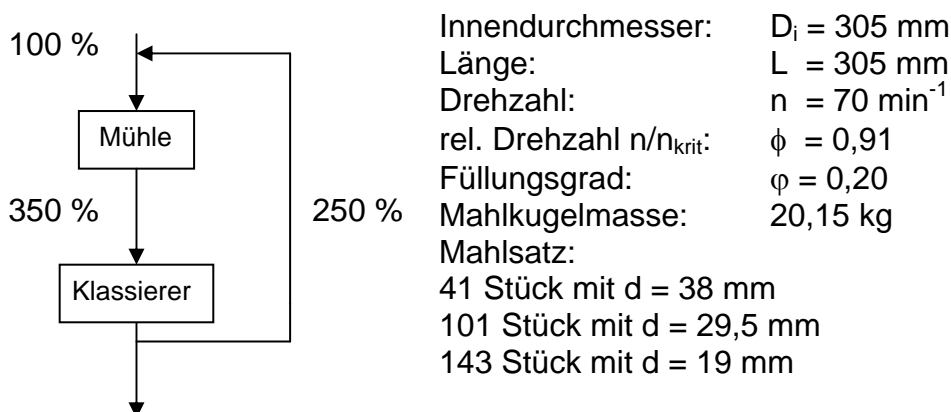


Bild 2: Mahlkreislauf und Parameter der Bond-Mühle

Der Test zur Bestimmung der Mahlbarkeit wird in einer Kugelmühle mit den angegebenen Parametern (Bild 2) trocken durchgeführt. Als Klassierer kommt eine Hand- bzw. Maschinensiebung zum Einsatz.

Für die Bestimmung der Mahlbarkeit nach Bond ist ein Zeitaufwand von ca. 5 Stunden pro Probe erforderlich.

## 4.2.2 Durchführung der Mahlbarkeitstests

Für den Versuch werden 700 cm<sup>3</sup> gerütteltes, getrocknetes Aufgabegut benötigt. Das Aufgabegut wird auf Korngrößen < 3,15 mm vorzerkleinert und hinsichtlich der Ausgangskorngrößenverteilung mittels Siebanalyse untersucht. Als Produktfeinheit für den Mahltest wird in der Regel eine Korngröße von 100 µm gewählt. Die Wahl anderer Produktkorngrößen hat die Einbeziehung von Korrekturwerten zur Folge.

Um mit der Chargenmühle einen Mahlkreislauf zu simulieren, wird wie folgt verfahren:

- Chargenmahlung über eine festgelegte Zeit bzw. eine bestimmte Anzahl von Mühlenumdrehungen
- Klassieren des Mahlgutes bei der gewünschten oberen Korngröße des Fertig-gutes  $x_P$  (100 µm) und Ermittlung der Massen von Grobgut und Feingut
- Austragen des Feingutes als Produkt
- Rückführung des Grobgutes in die Mühle und Ersetzen der ausgetragenen Feingutmenge durch die gleiche Menge frischen Aufgabeguts.

Der Versuch wird so lange wiederholt (meist 5- bis 8-mal), bis sich die Mahlbarkeitskennziffer  $G$ , welche den Quotienten aus der produzierten Masse an Fertigprodukt und der Anzahl der Mühlenumdrehungen darstellt, über 3 Zyklen hinweg nicht ändert. Damit ist der Gleichmahlzustand erreicht. Das produzierte Mahlgut sollte dann etwa 28,6 % der Ausgangsmasse betragen.

Das Feingut der letzten 3 Zyklen wird vereint, homogenisiert und einer Korngrößenanalyse mittels Luftstrahlsiebung unterzogen.

Als Messwerte für den Arbeitsindex werden aus den Korngrößenverteilungen des Aufgabegutes  $A$  und des Produktes  $P$  die Korngrößen  $x$  bei 80 % Durchgang, die Mahlbarkeitskennziffer  $G$  des Gleichmahlzustandes sowie die obere Korngröße des Fertigproduktes benötigt. Mit den Bondschen Mühlenparametern ergibt sich dann Gleichung 1 [3, 4, 5, 6, 7]:

$$w_i = \frac{48,95}{x_{\max,P}^{0,23} \cdot G^{0,82} \left( \frac{10}{\sqrt{x_{80,P}}} - \frac{10}{\sqrt{x_{80,A}}} \right)} \quad \text{mit}$$

$w_i$	[kWh / t]	Arbeitsindex nach Bond
$x_{\max,P}$	[µm]	obere Korngröße des Fertigproduktes (in diesem Fall bei 100 µm Absiebung)
$G$	[g / U]	Mahlbarkeit
$x_{80,P}$	[µm]	$D_{80}$ - Wert des Mahlproduktes
$x_{80,A}$	[µm]	$D_{80}$ - Wert des Aufgabegutes

### 4.2.3 Ergebnisse

Die Arbeitsindices der insgesamt 12 untersuchten Materialien sind im Bild 3 dargestellt. Sie bewegen sich zwischen 9,8 kWh/t und 25,3 kWh/t. Am oberen Ende liegen Quarzsand, Hüttensand sowie Altbeton. Die untere Grenze wird durch Kalkstein und Dolomit markiert.

Anhand der Reihenfolge der Arbeitsindices kann festgestellt werden, dass Materialien mit hohem Quarzgehalt schlechter mahlbar sind. Der Quarzgehalt könnte somit als Leitgröße für die Mahlbarkeit angesehen werden.

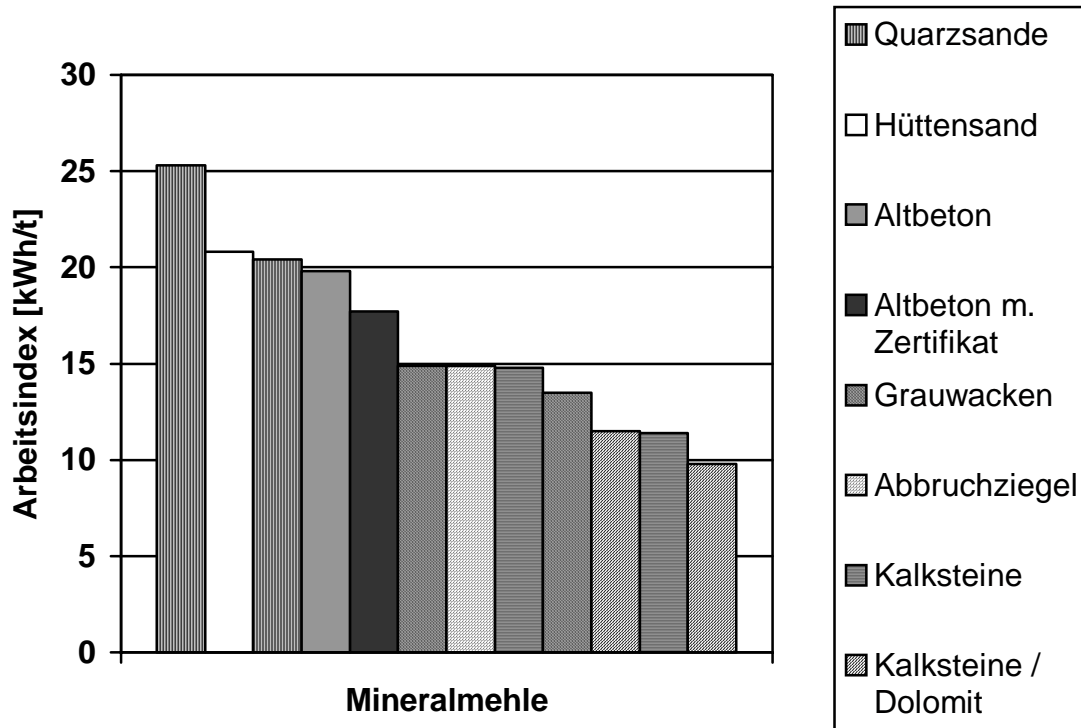


Bild 3: Arbeitsindex der ausgewählten Mineralmehle

Die Mineralmehle können nach ihrem Arbeitsindex in drei Gruppen eingeteilt werden. Eine der Grenzen dieser Einteilung orientiert sich dabei an Zementklinker, der bei ca. 15 kWh/t liegt [Tab. 5].

Tab. 4: Einteilung nach Arbeitsindex

Arbeitsindex [kWh/t]	Mineralmehle
bis 12	Kalksteine / Dolomit, Kalkstein
12 – 15	Kalkstein, Grauwacken, Abbruchziegel
über 15	Altbeton mit Zertifikat, Altbeton, Hüttensand, Quarzsande

Die Ursache der unterschiedlichen Werte für gleiche Materialien liegt in der Geologie der Materialien begründet, da sie aus verschiedenen Lagerstätten stammen.

Zur Beurteilung der Mahlbarkeit des untersuchten Recyclingmaterials gibt die folgende Tabelle eine Zusammenstellung von Größenordnungen des Arbeitsindex für unterschiedliche Roh- und Baustoffe:

Tab. 5: Arbeitsindex aus der Literatur für unterschiedliche Roh- und Baustoffe [3, 8, 9]

Stoff	Arbeitsindex nach Bond [kWh / t]
Schmirgel (körniger Korund)	64,1
Sandstein	28,9
Basalt	18,9...22,5
Koks	16,7...22,8
Ziegelstein	17,1
Granit	15,9...16,8
Schiefer	15,7
Eisenerz	14,2...17,1
Zementklinker	14,8...15,0
Quarz	14,1...15,0
Phosphatdünger	14,4
Hochofenschlacke	11,3...17,4
Zinkerz	13,7
Kalkstein	12,8...14,0
Kohle	11,4...14,3
Bleierz	12,6
Feldspat	11,9...12,9
Dolomit	12,4
Zement-Rohmaterial	11,6
Chromerz	10,6
Bauxit	9,7...10,4
Pyriterz	9,8
Kalisalze	8,9
Glas	3,4...13,6
Gipsstein	7,8...9,0
Gips	7,8
Baryt	5,2
Untersuchungen an der Bauhaus-Universität Weimar, Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung [10, 11]	
Hüttensand	15,5...25,5
Zementklinker	15,0
Altbeton	11,6...15,1

## 5. Erreichter Stand und Ausblick

In den technologischen Untersuchungen zur Zerkleinerung wurde im ersten Schritt der Kennwert Mahlbarkeit sowie der daraus resultierende Arbeitsindex dieser Stoffe in der Definition von Bond in einer Labormühle experimentell ermittelt. Um die Übertragbarkeit der Laborergebnisse auf den technischen Maßstab zu überprüfen, werden im gegenwärtig bearbeiteten zweiten Schritt Mahlungen in der vorhandenen, kontinuierlich arbeitenden Kreislaufmahlanlage durchgeführt. In diesem Maßstab werden zusätzlich so genannte Mahlkurven ermittelt, um die Abhängigkeit des Mahlenergieaufwandes von der Feinheit des Mahlproduktes zu überprüfen. Aus diesen Mahlkurven können für unterschiedliche Stoffe vergleichende Aussagen zum Zerkleinerungsverhalten, d.h. zur ihrer Mahlbarkeit in Abhängigkeit von der erreichten Dispersität, getroffen werden.

An den erzeugten Mineralmehlen wird die Korngrößenzusammensetzung bestimmt. Die Auswirkungen der Mineralmehle auf die hydraulische Erhärtung werden in mörteltechnischen Untersuchungen überprüft. Die Mahlungen dienen gleichzeitig dazu, die für die baustofftechnischen Untersuchungen benötigten Mengen an hochfeinem RC-Mineralmehl herzustellen.

Im nächsten Schritt soll in betontechnischen Grundlagenuntersuchungen festgestellt werden, ob sich RC-Mineralmehle und andere Mineralmehle aus Natur- oder Brechanden als Zusatzstoff für SVB eignen. Schwerpunktmäßig sollen die Fragen geklärt werden, ob mit diesen Mineralmehlen eine ausreichende Verarbeitbarkeit erreicht werden kann und ob eine ausreichende Dauerhaftigkeit gewährleistet ist. Als Ergebnis sollen Kriterien aufgestellt werden, welche Bedingungen diese hochfeinen Mineralmehle erfüllen müssen, um als Ausgangsstoff für SVB in Frage zu kommen. Diese betreffen unter anderem die Mahlfeinheit, den Wasseranspruch, Qualitätsschwankungen sowie Wechselwirkungen mit Zusatzmitteln. Für RC-Mineralmehle müssen vor allem Qualitätsschwankungen sowie hydrationsbeeinflussende Faktoren (Alkalien, Sulfate) überprüft werden. Es wird angestrebt, allgemeine Regeln zur Projektierung eines dauerhaften SVB mit Mineralmehlen aufzustellen.

Um die Ergebnisse der Untersuchungen praktisch nutzen zu können, wird die Mineralmehlherstellung und die Einbindung in den Prozess der Betonherstellung großtechnisch erprobt. Dafür wird ein Konzept zur großtechnischen Erprobung entwickelt. Hierin wird die Qualität der erzeugten Betone ermittelt. Die Ergebnisse der Erprobungsversuche bilden zusammen mit den experimentellen Ergebnissen die Grundlage für die wirtschaftliche Bewertung.

Aus Sicht der Aufbereitungstechnik werden die Basisdaten zur Mahlbarkeit von Abfällen als Voraussetzung für die rohstoffliche Verwertung im Rahmen der Forschungsarbeit erweitert. Zur Zeit sind in der Literatur hierzu noch wenige Ergebnisse bekannt.

Des Weiteren erfolgt eine Überprüfung der Abhängigkeit der erreichten Korngrößen von dem Energieeinsatz. Es ist die Frage zu klären, in welchem Verhältnis der benötigte Energieeinsatz zur erreichten Korngröße und den damit verbundenen Effekten im Selbstverdichtenden Beton stehen.

## Literaturverzeichnis

- [1] *Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau*: 3. Monitoring-Bericht Bauabfälle. 2003
- [2] *Friebert, M.*: Bild. Bauhaus-Universität Weimar
- [3] *Schubert, H.*: Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe. 4. Aufl. Leipzig, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. 1989
- [4] *Scheibe, W.; Bernhardt, C.; Winkler, E.*: Untersuchungen zur Bestimmung der Mahlbarkeit und der Größe von Rohmühlen. Aufbereitungstechnik Nr. 11. 1986
- [5] *Hentzschel, W.*: Technologie der Bindebaustoffe, Aufbereitungsprozesse und Aufbereitungssysteme. Berlin, VEB Verlag für Bauwesen. 1981
- [6] *Bond, F.*: The Third Theorie of Comminution. Mining Engineering. May 1952, 484-494
- [7] *Zisselmar, R.*: Die Mahlbarkeitsprüfung von Stoffen unterschiedlicher physikalischer Eigenschaften als Grundlage für die Dimensionierung von Mahlanlagen. Zement-Kalk-Gips. 34. Jahrgang, Nr. 4, 1981
- [8] *Höffl, K.*: Zerkleinerungs- und Klassiermaschinen. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. 1987
- [9] *Brey, A.*: Mahlbarkeit von Feststoffen. Praktikum "Mechanische Verfahrenstechnik". Bauhaus-Universität Weimar. 1988
- [10] *Heimann, D.*: Untersuchungen zum Mahlverhalten von Altbeton. Diplomarbeit. Bauhaus-Universität Weimar. 2000
- [11] *Wienke, L.*: Modellierung der Kreislaufmahlung mit der Kugelmahl-Sichtanlage. Diplomarbeit. Bauhaus-Universität Weimar. 2000

## Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. habil. Anette Müller, Dipl.-Ing. Gabi Seifert  
Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung  
Bauhaus-Universität Weimar  
Coudraystrasse 7, 99421 Weimar  
e-mail: [anette-m.mueller@bauing.uni-weimar.de](mailto:anette-m.mueller@bauing.uni-weimar.de) oder  
[gabi.seifert@bauing.uni-weimar.de](mailto:gabi.seifert@bauing.uni-weimar.de)  
Tel.: 03643/5846-06 oder 00