

## “Vergleichende Untersuchungen zum Aufschluss von Altbeton mittels Leistungsschallimpulsen“

### 1 Einleitung

Nach der neuesten Erhebung der Arbeitsgemeinschaft KWTB wurden im Jahr 2000 von insgesamt 61,4 Millionen Tonnen produzierten RC-Baustoffen nur 3,1 % als Betonzuschlag eingesetzt (Bild 1).

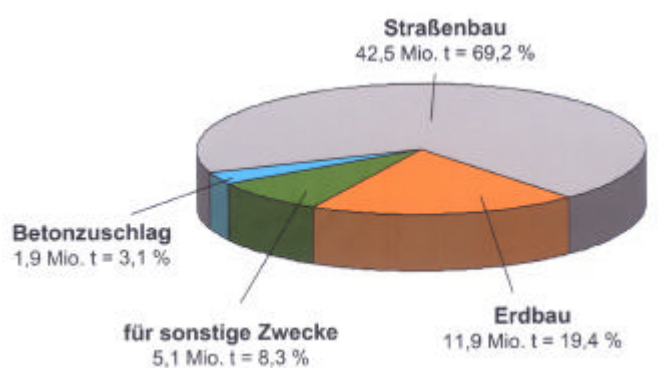


Bild 1: RC-Baustoff-Verwendung 2000 – Gesamt 61,4 Mio. t /KWTB 2003/

Demzufolge sind Forschungen zu Aufbereitungs- und Verwertungsverfahren, die rezyklierte Mineralstoffe auf höchstem Verwertungslevel herstellen können, von großer Bedeutung. Im Falle einer zukünftigen Änderung der politischen Rahmenbedingungen, wie beispielsweise strengere Grenzwerte zur Umweltverträglichkeit von RC-Baustoffen wird ein Down-Cycling problematischer. Die Forschung an Verwertungsverfahren, die im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes sind, muss also vorangetrieben werden.

Die Behandlung von Altbeton mittels Leistungsschallimpulsen ist ein solches ausbaufähiges Verfahren, mit dem es derzeit im Batchbetrieb gelingt das Betongefüge fast vollständig in seine Ausgangsstoffe zu zerlegen.

Es wurde bereits zweimal /MüLi01/, /MüLi03/ auf der Recycling-Tagung der Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung über dieses Thema referiert. Deshalb wird an dieser Stelle auf eine Prinzip- und Verfahrensdarstellung verzichtet. Unter Gliederungspunkt 2.1 wird eine kurze Zusammenfassung der bisher wichtigsten Ergebnisse gegeben.

In diesem Beitrag werden weiterführende Untersuchungen zum Einfluss der Betonparameter auf die Zerkleinerungswirkung der Leistungsschallimpulse vorgestellt., auch unter dem Gesichtspunkt der Veränderungen des Zementsteinsortiments und der Entwicklung hochfester Betone.

Im Ausblick sollen Ergebnisse zu alternativen Einsatzgebieten der Schallimpulszerkleinerung sowie geplante Projekte zur Sprache kommen.

## 2 Aufschluss von Altbeton mittels Leistungsschallimpulsen

### 2.1 Aktueller Stand der Untersuchungen

Im Folgenden wird eine kurze Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse aus den letzten zwei Vorträgen gegeben.

Bild 1 gibt eine Übersicht über die relevanten Einflussgrößen auf die Schallimpulszerkleinerung, welche innerhalb verschiedener Versuchsreihen untersucht wurden.

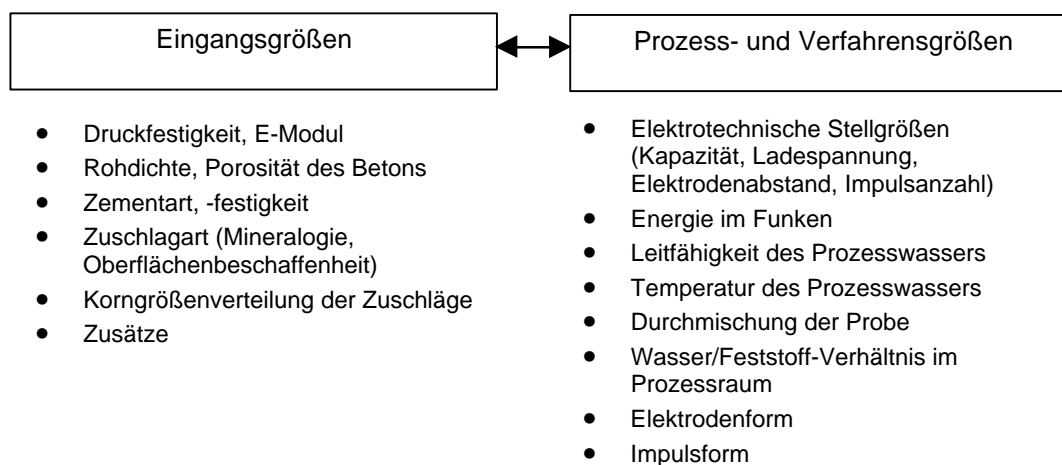


Bild 1: Einflussgrößen auf die Schallimpulszerkleinerung

In einer ersten Versuchsreihe wurde zunächst anhand der Beurteilung der Korngrößenverteilung und des Aufschlussgrades der *Einfluss des Energieeintrags auf das Zerkleinerungsprodukt* ermittelt. Die Sieblinie des Zerkleinerungsproduktes kann über den Energieeintrag gesteuert werden. Dabei ist der Energieeintrag signifikant von den Stellwerten Ladespannung und Impulsanzahl abhängig. Aus den Ergebnissen für Zerkleinerung und Aufschluss konnte für die Schallimpulszerkleinerung eines Normalbetons C20/25 ein *optimaler Arbeitsbereich* von 49 – 80 J/g abgeleitet werden. Bei einem Energieeintrag von 80 J/g (obere Grenze des untersuchten Energiebereichs) erreicht der Anteil an vollständig aufgeschlossenen Zuschlägen seinen höchsten Wert mit ca. 50 bis 70%.

Die zweite große Versuchsreihe diente zur Ermittlung des *Einflusses der Betoneigenschaften und der Prozessgrößen auf das Zerkleinerungsprodukt*. Zum einen wurde der Einfluss der Betondruckfestigkeit und der Proben-Durchmischung auf das Zerkleinerungsprodukt untersucht. Zum anderen war der Einfluss des verwendeten Zementes im Beton auf die Leitfähigkeit des Prozesswassers und die Zerkleinerungswirkung Gegenstand der Untersuchungen.

Bei der Zerkleinerung variiert Betonfestigkeiten (C8/10 bis C55/67) war zu beobachten, dass sich Betone der mittleren Festigkeitsklassen aufgrund ihrer hohen Zähigkeit am schwierigsten zerkleinern lassen (Bild 2-rechts). Hochfeste Betone dagegen sind wegen des geringen w/z-Wertes spröder und lassen sich deshalb ebenso wie niedrigfestere Betone leichter zerkleinern.

Die Ergebnisse zum Einfluss der Durchmischung der Probe während der Behandlung können wie folgt zusammengefasst werden:

In den Bildern 2 und 3 sind der Aufschlussgrad der Fraktion 2-16 mm und der mittlere Korndurchmesser der Korngrößenverteilung in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit dargestellt. Hierbei ist zu unterscheiden zwischen einer Probenbehandlung ohne Umwälzung (Bild 2) und mit Umwälzung (Bild 3). Umwälzung bedeutet, dass die Probenbehandlung nach einer bestimmten Anzahl von Schallimpulsen unterbrochen wurde, die Probe und das Prozesswasser entnommen und erneut zugeführt wird. Dies erfolgte während der Behandlung einer Probe zweimal.

Bei einer Behandlung ohne Umwälzung fällt die starke Schwankung der Ergebnisse sowohl für den Aufschlussgrad als auch für den mittleren Korndurchmesser auf. Der Aufschlussgrad liegt für alle Druckfestigkeiten, mit Ausnahme des Betons mit der geringsten Druckfestigkeit, zwischen 30 und 40 % (Bild 2-links). Bei einer Behandlung mit Umwälzung sind die Schwankungen deutlich reduziert, so dass Abhängigkeiten erkannt werden können (Bild 3).

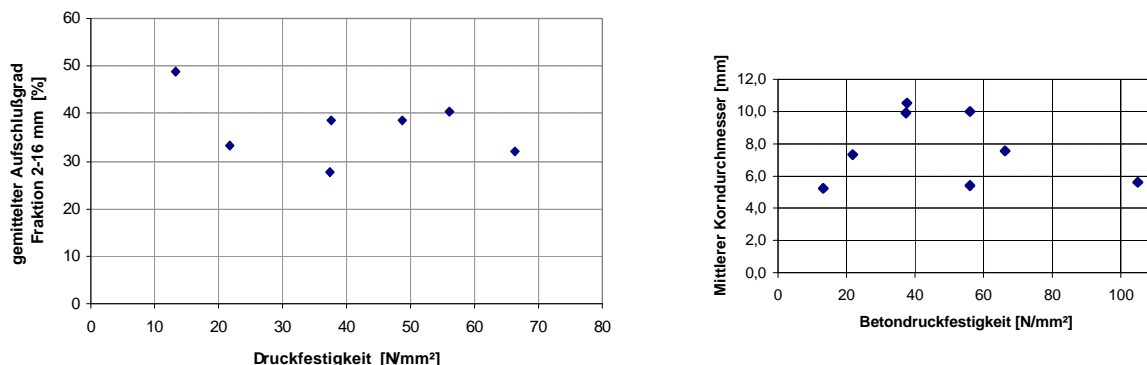


Bild 2: Aufschlussgrad der Fraktion 2-16 mm (links) und Mittelwerte der Korngrößenverteilung (rechts) nach der Schallimpulszerkleinerung von Normalbetonen unterschiedlicher Druckfestigkeiten (Behandlung ohne Umwälzung)

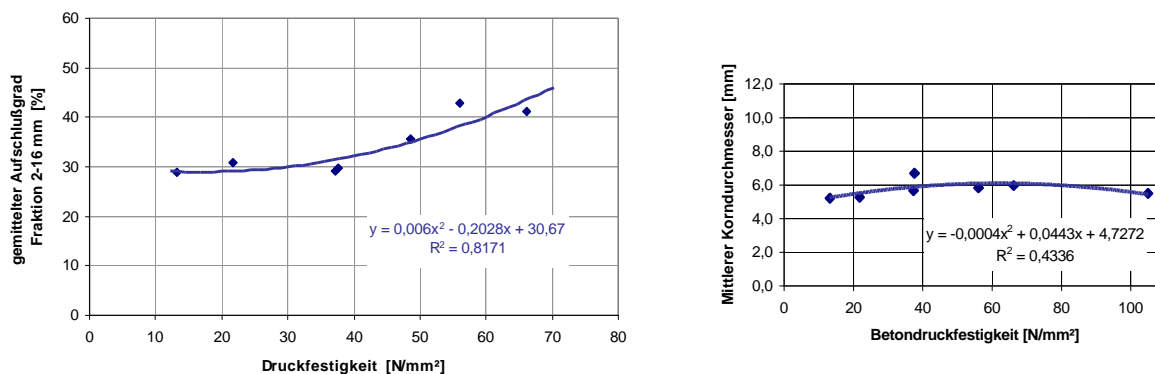


Bild 3: Aufschlussgrad der Fraktion 2-16 mm (links) und Mittelwerte der Korngrößenverteilung (rechts) nach der Schallimpulszerkleinerung von Normalbetonen unterschiedlicher Druckfestigkeiten (Behandlung mit Umwälzung)

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine Umwälzung der Probe zu einem gleichmäßigeren Zerkleinerungs- und Aufschlussergebnis führt.

Im Rahmen einer Studienarbeit /Räß02/ wurden die Qualitäten der Zerkleinerungsprodukte der Schallimpulszerkleinerung und konventionellen mechanischen Zerkleinerungsverfahren vergleichend beurteilt. Untersucht wurde ein realer Abrissbeton der Festigkeitsklasse C20/25.

Die Sieblinie des nach der Schallimpulszerkleinerung entstandenen Sekundärzuschlags befindet sich im günstigen Sieblinienbereich AB16. Die Zerkleiner-

rungsprodukte der konventionellen Zerkleinerung mittels Backen- und Prallbrecher sind dagegen wesentlich gröber und liegen außerhalb des günstigen Bereichs.

Beim Vergleich der Fraktionsaufschlussgrade wird der Vorteil der Schallimpulszerkleinerung sehr gut deutlich – der Aufschluss der Sekundärzuschläge nach der elektrohydraulischen Zerkleinerung bewegt sich zwischen 40 % in den feineren Fraktionen und 70 % in den gröberen Fraktionen. Im Gegensatz zu den konventionellen Zerkleinerungstechniken, bei denen der Aufschlussgrad von maximal 30 % mit zunehmender Korngröße noch abnimmt, steigt der Aufschlussgrad für das Produkt der elektrohydraulischen Zerkleinerung stetig an.

Die Tatsache, dass die Leitfähigkeit des Prozesswassers während der Behandlung mit Schallimpulsen von Beton teilweise stark ansteigt und somit die Effektivität herabsetzt, wurde in einer weiteren Studienarbeit /Mül02/ genauer untersucht. Fragestellung war: Wie ändert sich die Leitfähigkeit des Prozesswassers für Betone mit unterschiedlichen Zementen und wie wirkt sich diese Änderung auf das Zerkleinerungsprodukt aus?

Für Portlandzementbetone und Zementbetone mit inerten Zuschlagstoffen kann die Leitfähigkeit des Prozesswassers als Maß für die Effektivität des Zerkleinerungsvorgangs herangezogen werden. Hohe Leitfähigkeiten ziehen niedrige Zerkleinerungsverhältnisse und schlechter aufgeschlossene Zuschläge nach sich.

## 2.2 Weiterführende Untersuchungen zum Einfluss der Betonparameter auf die Wirkung der Leistungsschallimpulse

Mit den nachfolgend beschriebenen Versuchen sollte der Frage

*Haben die Parameter des Betons, welche die Ausbildung der Grenzschicht zwischen Zuschlag und Zementstein nachweislich beeinflussen, Einfluss auf die Zerkleinerungseffektivität?*

nachgegangen werden.

Für diese Untersuchungen wurden verschiedenste Modellbetone der Festigkeitsklasse C25/45 (Rezepturen und Eigenschaften siehe Tabellen 2 und 3) hergestellt und nach ausreichender Wasser- bzw. Luftlagerung mit definierter Belastung zerkleinert.

Variiert wurden:

### **Zementart**

- CEM I 42,5 R = Modellbeton Nr. 3
- CEM II / A-L 42,5 R = Modellbeton Nr. 4
- CEM III / A 42,5 = Modellbeton Nr. 5

### **Zementfestigkeitsklasse**

- CEM I 32,5 R = Modellbeton Nr. 1
- CEM I 42,5 R = Modellbeton Nr. 3
- CEM I 52,5 R = Modellbeton Nr. 2

### **Zuschlagart**

- Rheinkies = Modellbeton Nr. 8=1
- Dolomit = Modellbeton Nr. 9

### **Beschaffenheit der Zuschlagoberfläche**

- Rheinkies ungebrochen = Modellbeton Nr. 6=1
- Rheinkies gebrochen = Modellbeton Nr. 7

### **Sieblinie bzw. Größtkorn des Zuschlags**

- Rheinkies AB 4 = Modellbeton Nr. 10
- Rheinkies AB 8 = Modellbeton Nr. 11
- Rheinkies AB 16 = Modellbeton Nr. 12 =1
- Rheinkies AB 32 = Modellbeton Nr. 12

### **Zusätze**

- Flugasche SFA = Modellbeton Nr. 14
- Microsilica = Modellbeton Nr. 15
- Kalksteinmehl = Modellbeton Nr. 16
- Quarzmehl = Modellbeton Nr. 17

Bei der Herstellung wurde darauf geachtet, dass ein w/z-Wert 0,5 bis 0,7 eingehalten wurde. Die Frischbetonkonsistenz lag immer im Regelbereich KR, d.h. Ausbreitmaß = 42-48 cm. Anschließend wurden die Probekörper 7 Tage unter Wasser gelagert und danach bis zur Druckfestigkeitsprüfung am 28. Tag an der Luft gehärtet. Die Schallimpulszerkleinerung der Proben wurde allerdings erst nach 1,5 Jahren begonnen.

Pro Modellbeton wurde insgesamt 1 Zylinder 150x300 zerkleinert, wobei dieser in vier Teile gesägt wurde und in vier Teilversuchen behandelt wurde. Alle Betonscheiben wurden mittels indirekter Schallimpulszerkleinerung vorzerkleinert bei ca. 4 kJ.

Die Aufschlusszerkleinerung aller Modellbetone erfolgte mit der Einstellung:

- Kapazität des Kondensators C=12 µF, Ladespannung U<sub>0</sub>=20 kV, Elektrodenabstand s=15 mm und Impulsanzahl n=50; die eingebrachte Energie W<sub>tv</sub> 24 J/g = konstant

Der Einfluss der o.g. Betonparameter wurde anhand des charakteristischen Korngrößenverhältnis  $r_m$  aus der Korngrößenverteilung und dem Fraktionsaufschlussgrad  $\mu_{AG,i}$  aus der Schwimm-Sink-Analyse ermittelt.

Das Korngrößenverhältnis  $r_m$  gibt das Verhältnis der mittleren Partikelgrößen an und berechnet sich nach folgender Formel:

$$r_m = \frac{x_{m,Ausgangssieblinie,Beton}}{x_{m,Zerkleinerungsprodukt}} \quad (\text{Gl. 1})$$

wobei:  $x_{m,Ausgangszuschlag,Beton}$  mittlerer Korndurchmesser der Sieblinie des Ausgangszuschlags im Beton  
 $x_{m,Zerkleinerungsprodukt}$  mittlerer Korndurchmesser der Sieblinie des Ausgangszuschlags im Beton

Der Fraktionsaufschlussgrad  $\mu_{AG,i}$  ergibt sich entsprechend (Gl. 2) aus der Dichteverteilung (Bild 5). Aus  $\mu_{AG,i}$  und den Fraktionsmassen der Korngrößenverteilung lässt sich entsprechend (Gl. 3) der gewichtete mittlere

Aufschlussgrad der Fraktion 2/16 mm berechnen, welcher zur Auswertung herangezogen wurde.

Für den Aufschlussgrad werden drei Zustände unterschieden (Bild 4):

- a) kein Aufschluss
- b) teilweiser Aufschluss
- c) vollständiger Aufschluss

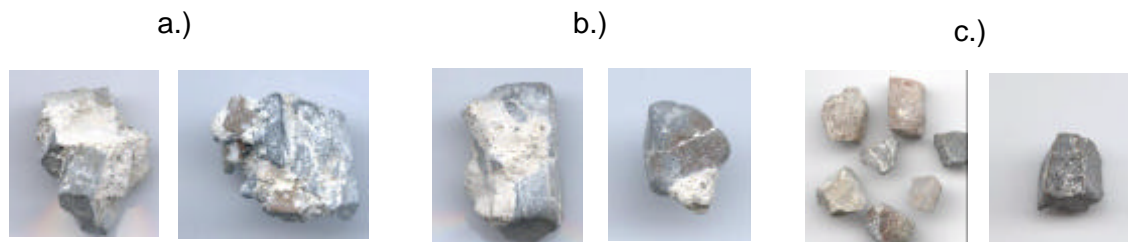


Bild 4: Darstellung der Aufschlusszustände des Betons

Diese Zustände werden in bestimmte Dichtestufen eingeteilt, die in der folgenden Tabelle 1 dargestellt sind. Besonderes Augenmerk wird auf die Fraktionen 2/4, 4/8 und 8/16 mm gelegt. Diese werden auch zur Untersuchung des Aufschlussgrades herangezogen. Die Fraktion 0/2 mm wird nicht betrachtet.

Tabelle 1: Dichteklassen von Beton und Zuordnung zu den Aufschlussgradklassen

| Dichtebereich [g/cm <sup>3</sup> ] |  |
|------------------------------------|--|
| < 1,9                              | reiner Zementstein   |
| 1,9 – 2,3                          | Zementstein mit Anteilen von feinstkörnigem Zuschlag (verwachsene Sandteile)           |
| 2,3 – 2,5                          | grobe Zuschlagstoffe (2–16 mm) mit 0 bis 50 % anhaftendem Zementstein und Sandanteilen |
| 2,5 – 2,8                          | weitestgehend reine Zuschlagstoffe (Kies, Splitt) mit bis zu 10% Anhaftung             |

In Bild 5 sind die einzelnen Fraktionen als Verteilungssumme über der Dichte aufgetragen. Diese erhält man indem man die einzelnen Fraktionen einer Dichtentrennung in einer Schwereflüssigkeit (Natriumpolywolframat) unterzogen hat. Anzumerken ist, dass in der nachfolgenden Auswertung die Dichtestufe 2,5 – 2,8 g/cm<sup>3</sup> als nahezu aufgeschlossen angenommen wurde. Als gemittelter Aufschlussgrad (gewichteter Mittelwert der Fraktionen 2/4, 4/8 und 8/16 mm) wird also der prozentuale Anteil der Partikel im Dichtebereich 2,5 – 2,8 g/cm<sup>3</sup> unter Beachtung der Masseanteile der jeweiligen Fraktion angegeben. Es werden Zementsteinanhaftungen bis max. 10 M.-% an den Zuschlägen toleriert.

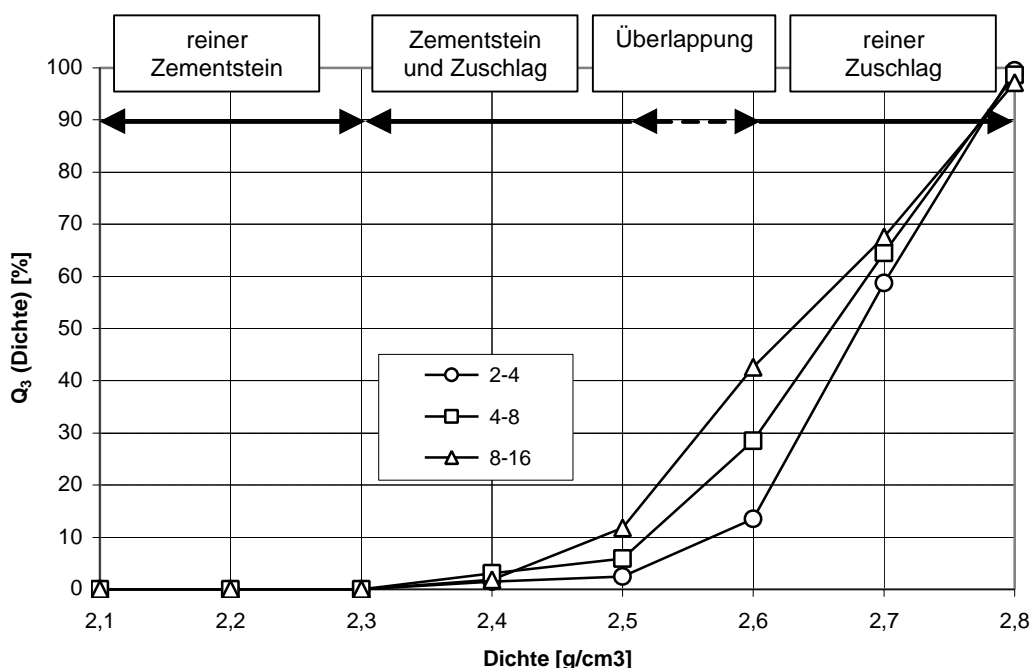


Bild 5: Darstellung der Dichteverteilung der Fraktionen 2/4 mm, 4/8 mm und 8/16 mm für Modellbeton 1

Berechnung des Fraktionsaufschlussgrades  $\mu_{AG,i}$  /Schr00/:

$$\mu_{AG,i} = \frac{m_{A,i}}{m_{Gesamt}} \quad (Gl.2)$$

wobei:  $m_{A,i}$  Masse der aufgeschlossenen Partikel  
 $m_{Gesamt}$  Gesamtmasse der Kornklasse = Summe aus Masse der aufgeschlossenen Partikel und Masse der verwachsenen und teilaufgeschlossenen Partikel

Berechnung des mittleren Aufschlussgrades der Fraktion 2-16 mm  $\bar{\mu}_{AG,2/16\text{ mm}}$ :

$$\bar{\mu}_{AG,2/16\text{ mm}} = \frac{\sum_{i=2/4}^{8/16} (m_i \cdot \mu_{AG,i})}{\sum_{i=2/4}^{8/16} m_i} \quad (Gl.3)$$

wobei:  $\mu_{AG,i}$  Fraktionsaufschlussgrad  
 $m_i$  Masse der Fraktion

Die o.g. Kennwerte wurden für die Zerkleinerungsprodukte aller Modellbetone ermittelt und wie in den folgenden Diagrammen gezeigt ausgewertet. Zusätzlich ist in den Diagrammen auf der Sekundärachse die gemessene Leitfähigkeit des Prozesswassers angegeben.

Tabelle 2: Zusammensetzung der Modellbetone

| Modellbeton<br>Nr. | Zuschlag                    |                             |                             |                              |                                 | Zementart und Festigkeit<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | Wasser<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | Zusätze<br>[kg/m <sup>3</sup> ] |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|---------------------------------|--|--------------------------------|---------------------------------|
|                    | 0/2<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | 2/4<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | 4/8<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | 8/16<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | 16/31,5<br>[kg/m <sup>3</sup> ] |  |                                |                                 |
| 1                  | 572,7                       | 268,5                       | 366,9                       | 581,7                        | -                               | 347,2 (CEMI 32,5 R , Nr. 210)                    | 187,5                          | -                               |
| 2                  | 592,1                       | 277,6                       | 379,3                       | 601,4                        | -                               | 275,7 (CEMI 52,5 R-ft)                           | 187,5                          | -                               |
| 3                  | 583,52                      | 273,52                      | 373,82                      | 592,64                       | -                               | 307,38 (CEMI 42,5 R , Nr. 187)                   | 187,5                          | -                               |
| 4                  | 583,52                      | 273,52                      | 373,8                       | 592,6                        | -                               | 307,38 (CEMII/A-L 42,5 R)                        | 187,5                          | -                               |
| 5                  | 580,7                       | 272,22                      | 372,04                      | 589,8                        | -                               | 307,38 (CEMIII/A 42,5 R)                         | 187,5                          | -                               |
| 6                  | 572,7                       | 268,5                       | 366,9                       | 581,7                        | -                               | 347,2 (CEMI 32,5 R , Nr. 210)                    | 187,5                          | -                               |
| 7                  | 572,7                       | 268,5                       | 366,9                       | 581,7                        | -                               | 347,2 (CEMI 32,5 R , Nr. 210)                    | 187,5                          | -                               |
| 8                  | 572,7                       | 268,5                       | 366,9                       | 581,7                        | -                               | 347,2 (CEMI 32,5 R , Nr. 210)                    | 187,5                          | -                               |
| 9                  | 609,7                       | 285,8                       | 390,6                       | 619,3                        | -                               | 347,2 (CEMI 32,5 R , Nr. 210)                    | 187,5                          | -                               |
| 10                 | 1181,72                     | 555,5                       | -                           | -                            | -                               | 370,37 (CEMI 32,5 R , Nr. 210)                   | 200                            | -                               |
| 11                 | 807,8                       | 364,8                       | 564,6                       | -                            | -                               | 370,37(CEMI 32,5 R , Nr. 210)                    | 200                            | -                               |
| 12                 | 572,7                       | 268,5                       | 366,9                       | 581,7                        | -                               | 347,2 (CEMI 32,5 R , Nr. 210)                    | 187,5                          | -                               |
| 13                 | 475,12                      | 177,0                       | 279,5                       | 391,3                        | 540,3                           | 314,8 (CEMI 32,5 R , Nr. 210)                    | 170                            | -                               |
| 14                 | 530,18                      | 248,5                       | 339,6                       | 538,5                        | -                               | 347,2 (CEMI 32,5 R , Nr. 210)                    | 206,24                         | 86,8 SFA                        |
| 15                 | 559,5                       | 262,3                       | 358,4                       | 568,2                        | -                               | 333,3 (CEMI 32,5 R , Nr. 210)                    | 201,39                         | 13,9 SF + Fließmittel           |
| 16                 | 544,6                       | 255,3                       | 348,9                       | 553,1                        | -                               | 347,2 (CEMI 32,5 R , Nr. 210)                    | 187,5                          | 86,8 Kalksteinmehl              |
| 17                 | 545,2                       | 255,5                       | 349,2                       | 553,7                        | -                               | 347,2 (CEMI 32,5 R , Nr. 210)                    | 187,5                          | 86,8 Quarzmehl                  |

Referenz

Tabelle 3: Betontechnische Kennwerte der Modellbetone

| Modellbeton Nr. | w/z-Wert | Ausbreitmaß [cm] | Luftporengehalt [%] | Frischbetonrohddichte [g/cm <sup>3</sup> ] | Festbetonrohddichte [g/cm <sup>3</sup> ] | Festbetonreindichte [g/cm <sup>3</sup> ] | berechnete Porosität [%] | 28-Tage-Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ] | E-Modul [kN/mm <sup>2</sup> ] |
|-----------------|----------|------------------|---------------------|--|--|--|--------------------------|--|-------------------------------|
| 1               | 0,54     | 47,5             | 1,3                 | 2,355                                      | 2,36                                     | 2,6229                                   | 10,02                    | 41,56  | 32,79                         |
| 2               | 0,68     | 45               | 1,3                 | 2,347                                      | 2,33                                     | 2,6071                                   | 10,63                    | 36,76  | 33,36                         |
| 3               | 0,61     | 48               | 1,7                 | 2,327                                      | 2,34                                     | 2,6331                                   | 11,13                    | 39,01  | 31,95                         |
| 4               | 0,61     | 44,5             | 1,4                 | 2,348                                      | 2,34                                     | 2,6560                                   | 11,90                    | 35,04  | 32,50                         |
| 5               | 0,61     | 45               | 1,55                | 2,332                                      | 2,34                                     | 2,6430                                   | 11,46                    | 41,20  | 31,40                         |
| 6               | 0,54     | 47,5             | 1,3                 | 2,355                                      | 2,36                                     | 2,6229                                   | 10,02                    | 41,56  | 32,79                         |
| 7               | 0,54     | 48,5             | 1,15                | 2,335                                      | 2,31                                     | 2,6469                                   | 12,73                    | 29,38  | 27,02                         |
| 8               | 0,54     | 47,5             | 1,3                 | 2,355                                      | 2,36                                     | 2,6229                                   | 10,02                    | 41,56  | 32,79                         |
| 9               | 0,54     | 45               | 1,3                 | 2,261                                      | 2,13                                     | 2,8089                                   | 24,17                    | 16,67  | 9,19                          |
| 10              | 0,54     | 45               | 7,0                 | 2,155                                      | 2,19                                     | 2,6139                                   | 16,22                    | 28,20  | 25,40                         |
| 11              | 0,56     | 44               | 3,5                 | 2,296                                      | 2,27                                     | 2,6403                                   | 14,02                    | 33,32  | 31,10                         |
| 12              | 0,54     | 47,5             | 1,3                 | 2,355                                      | 2,36                                     | 2,6229                                   | 10,02                    | 41,56  | 32,79                         |
| 13              | 0,54     | 48,5             | 0,8                 | 2,410                                      | 2,39                                     | 2,6274                                   | 9,04                     | 39,49  | 33,0                          |
| 14              | 0,59     | 44               | 1,7                 | 2,357                                      | 2,34                                     | 2,6264                                   | 10,90                    | 51,35  | 35,0                          |
| 15              | 0,54     | 42               | 3,5                 | 2,313                                      | 2,29                                     | 2,6166                                   | 12,48                    | 37,97  | 33,7                          |
| 16              | 0,54     | 45               | 1,9                 | 2,375                                      | 2,33                                     | 2,6335                                   | 11,52                    | 41,12  | 33,4                          |
| 17              | 0,54     | 46               | 1,9                 | 2,348                                      | 2,31                                     | 2,6400                                   | 12,50                    | 41,05  | 33,4                          |

Referenz 

Ausreißer 

**Einfluss der Zementfestigkeitsklasse auf die Zerkleinerungseffektivität**

Für die untersuchten Zementfestigkeitsklassen 35,5 R und 52,5 R konnte eine signifikante Steigerung des Korngrößenverhältnisses  $r_m$  um 17 % festgestellt werden (Bild 6).

Der Aufschlussgrad zeigt einen ähnlichen Verlauf (Steigerung um 20 %) (Bild 7). Auch hier zeigte sich, dass der Beton mit CEM I 52,5 R signifikant besser aufgeschlossen werden konnte.

Zemente höherer Festigkeit sind feiner und bewirken somit eine dichtere, festere und somit sprödere Zementsteinmatrix im Beton, was den Aufschluss dieser Betone begünstigt.

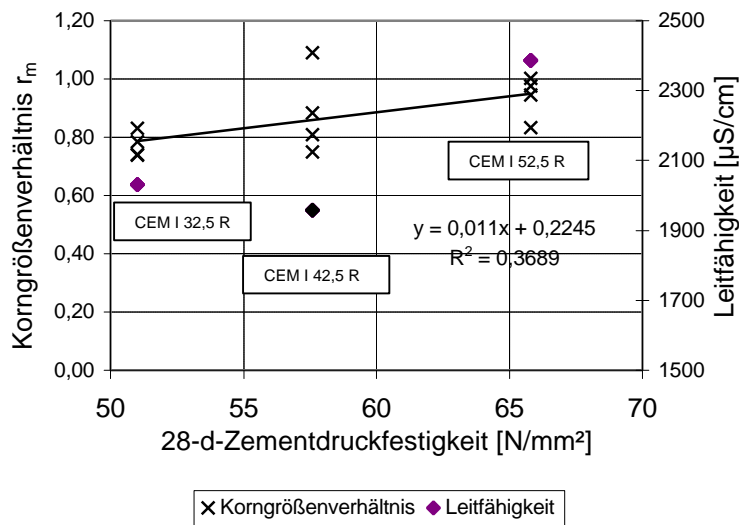


Bild 6: Einfluss der Zementfestigkeit auf das Korngrößenverhältnis  $r_m$  und die Leitfähigkeit des Prozesswassers in Abhängigkeit von der Zementdruckfestigkeit

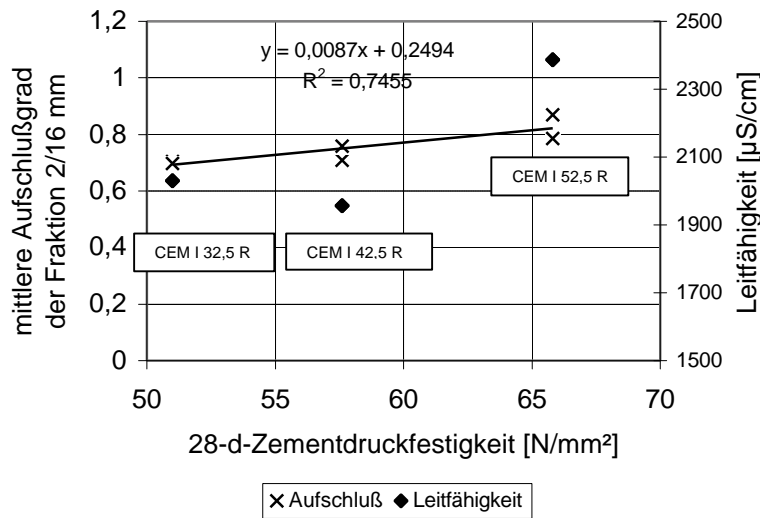


Bild 7: Einfluss der Zementfestigkeit auf den Aufschlussgrad  $\mu_{AG,2/16\text{ mm}}$  (vollständig freigelegte Partikel und Partikel mit geringen Zementsteinanhaftungen ( $\rho=2,5\text{-}2,8\text{ g}/\text{cm}^3$ )) und die Leitfähigkeit des Prozesswassers in Abhängigkeit von der Zementdruckfestigkeit

### Einfluss der Zementart auf die Zerkleinerungseffektivität

Die entstandenen Korngrößenverteilungen nach der Zerkleinerung der Betone mit den genannten Zementarten waren im Mittel nahezu identisch, obwohl die Streuung der Einzelwerte mit 11,9 % bis 22,6 % hoch ist (Bild 8).

Unterschiede ergaben sich beim Aufschlussgrad (Bild 9). Der Fraktionsaufschlussgrad betrug für den Beton mit Hochofenzement CEM III 67 %, für den Beton mit dem Kompositzement CEM II 87 %. Der Beton mit dem CEM I wurde zu ca. 74 % aufgeschlossen und liegt damit zwischen den beiden anderen Betonen.

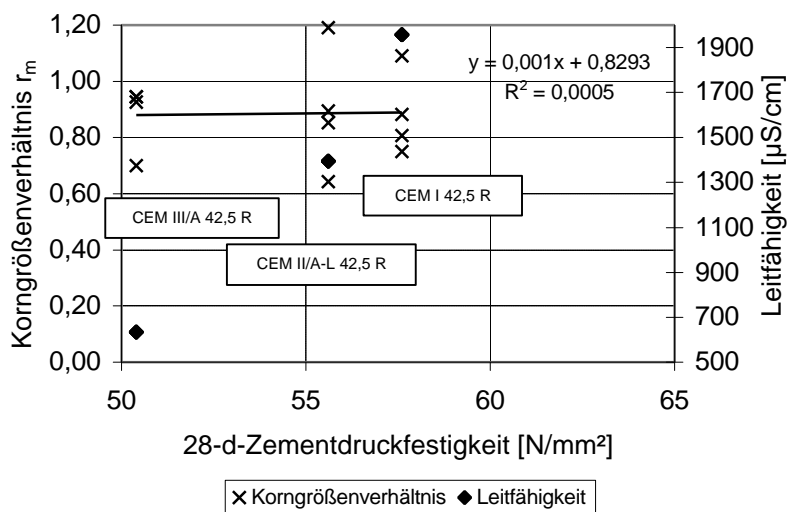


Bild 8: Einfluss der Zementfestigkeit auf das Korngrößenverhältnis  $r_m$  und die Leitfähigkeit des Prozesswassers in Abhängigkeit von der Zementdruckfestigkeit

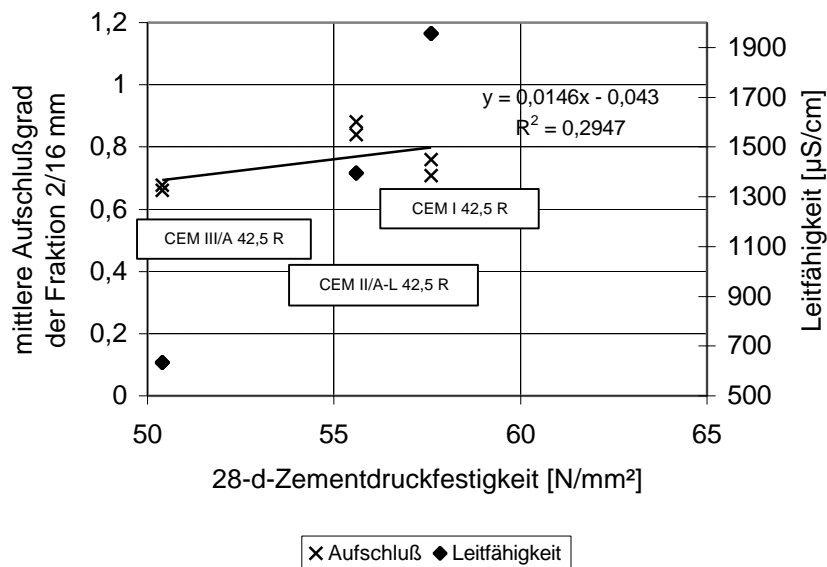


Bild 9: Einfluss der Zementart auf den Aufschlussgrad  $\mu_{AG,2/16 \text{ mm}}$  (vollständig freigelegte Partikel und Partikel mit geringen Zementsteinanhaftungen ( $\rho=2,5\text{-}2,8 \text{ g}/\text{cm}^3$ )) und die Leitfähigkeit des Prozesswassers in Abhängigkeit von der Zementdruckfestigkeit

Die Unterschiede zwischen den Betonen mit CEM II und CEM I sowie CEM II und CEM III sind signifikant. Die Streuung der Einzelaufschlussgrade ist mit max. 3,6 % gering.

Die Leitfähigkeit des Prozesswassers spielt hier eine wichtige Rolle, wie in Bild 9 dargestellt. Beim Einsatz von latent-hydraulischen bzw. puzzolanischen Zusatzstoffen (CEM III - bzw. CEM II - Zemente) wird der  $\text{Ca(OH)}_2$  - Gehalt im Beton deutlich verringert.

### Einfluss der Zuschlagoberfläche auf die Zerkleinerungseffektivität

Im Korngrößenverhältnis und auch im Aufschlussgrad gibt es zwischen dem Modellbeton mit ungebrochenen und dem mit gebrochenen Zuschlägen keinen signifikanten Unterschied.

Die Beschaffenheit der Zuschlagoberfläche spielt bei der Schallimpulszerkleinerung keine Rolle.

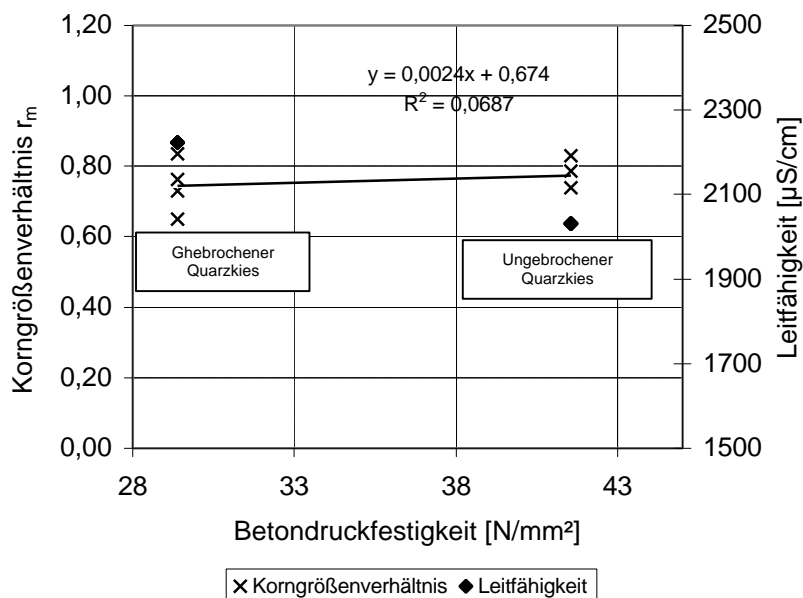


Bild 10: Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit der Zuschläge auf das Korngrößenverhältnis  $r_m$  und die Leitfähigkeit des Prozesswassers in Abhängigkeit von der Betondruckfestigkeit

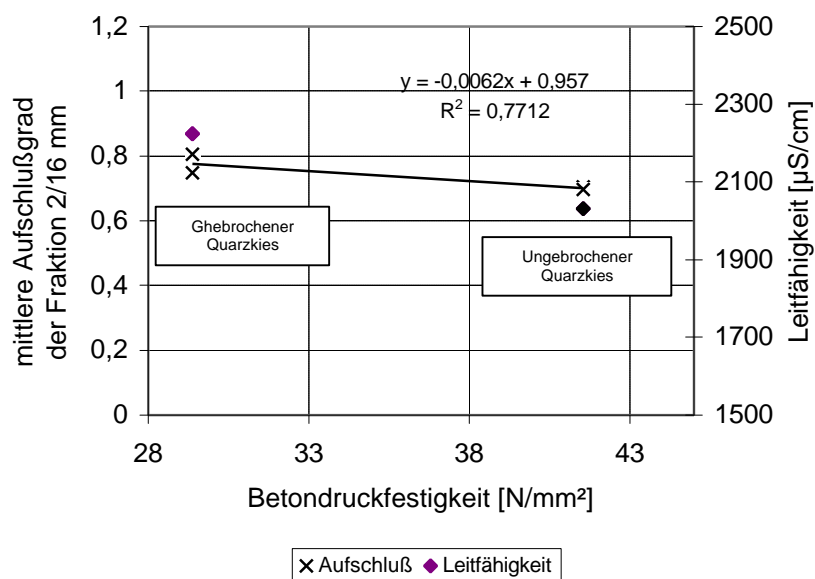


Bild 11: Einfluss der Zuschlagoberfläche auf den Aufschlußgrad  $\mu_{AG,2/16\text{ mm}}$  (vollständig freigelegte Partikel und Partikel mit geringen Zementsteinanhaftungen ( $\rho=2,5-2,8\text{ g/cm}^3$ )) und die Leitfähigkeit des Prozesswassers in Abhängigkeit von der Betondruckfestigkeit

### Einfluss der Zuschlagart auf die Zerkleinerungseffektivität

Es wurden Versuche an Modellbetonen, die zum einen Quarzzuschläge und zum anderen Dolomitzuschläge enthielten, durchgeführt. Diese Versuche sind allerdings als Ausreißer anzusehen, da der Beton mit Dolomitzuschlag nicht die gewünschte Festigkeit erreichte. Der Beton mit Dolomitzuschlag wurde wesentlich stärker zerkleinert, was auf die wesentlich geringere Festigkeit zurückzuführen ist. Der mittlere Aufschlußgrad beider Betone ist in etwa gleich. Hier werden sich Nachversuche anschließen.

### Einfluss der Sieblinie/Größtkorn des Zuschlags auf die Zerkleinerungseffektivität

Betone mit groben Zuschlägen werden prinzipiell stärker zerkleinert (Bild 12).

Größere Partikel können besser aus der Zementsteinmatrix herausgelöst werden (Bild 13). Es ergab sich außerdem ein signifikant höherer Aufschlußgrad (ca. 20 % besser) für Betone mit groben Sieblinien bzw. hohem Größtkorn.

Diese Beobachtung deckt sich mit den theoretischen Ergebnissen zum Schalldurchgang in Beton von /Rie03/ und /Schu00/.

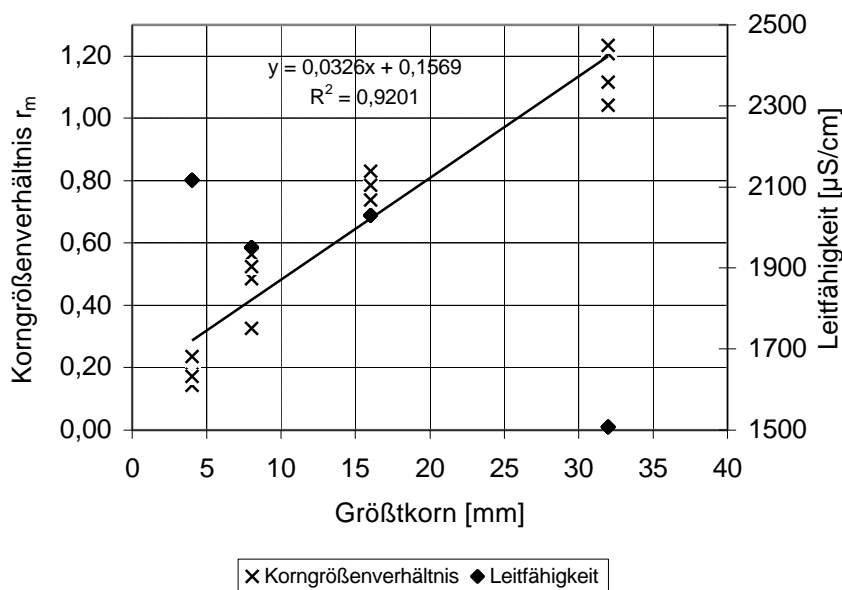


Bild 12: Einfluss der Sieblinie des Zuschlags auf das Korngrößenverhältnis  $r_m$  und die Leitfähigkeit des Prozesswassers in Abhängigkeit vom Größtkorn

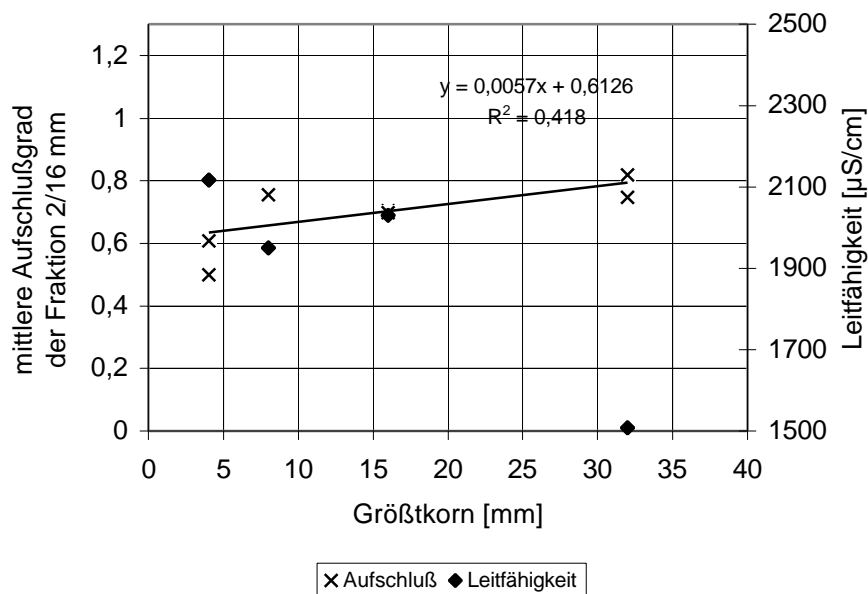


Bild 13: Einfluss des Größtkorns der Sieblinie des Zuschlags auf den Aufschlußgrad  $\mu_{AG,2/16 \text{ mm}}$  (vollständig freigelegte Partikel und Partikel mit geringen Zementsteinanhaftungen ( $\rho=2,5-2,8 \text{ g}/\text{cm}^3$ )) und die Leitfähigkeit des Prozesswassers in Abhängigkeit vom Größtkorn

### Einfluss von Zusätzen auf die Zerkleinerungseffektivität

Auf die Zerkleinerung hat die Zugabe von Betonzusätzen keinen nennenswerten Einfluss. Lediglich der Beton mit Mikrosilica konnte geringfügig stärker zerkleinert werden.

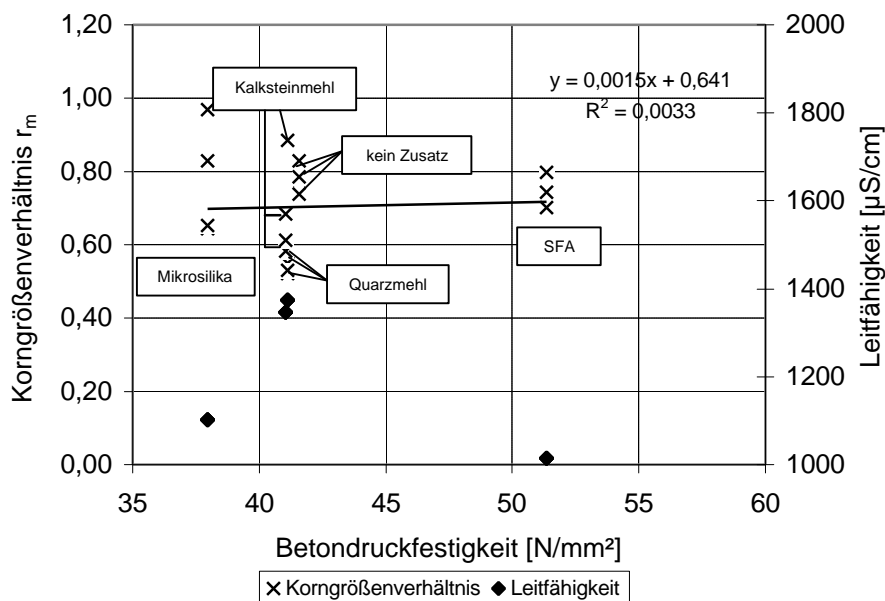


Bild 14: Einfluss der Zusätze auf das Korngrößenverhältnisse  $r_m$  und die Leitfähigkeit des Prozesswassers in Abhängigkeit von der Betondruckfestigkeit

Aufgrund des Verfestigungseffekts des Mikrosilika in der Kontaktzone konnten die Zuschläge aus dem mikrosilikahaltigem Beton mit einem Aufschlussgrad von 72 % am besten herausgelöst werden. Es fällt aber auf, dass die Aufschlussgrade für die Betone mit Kalkstein- und Quarzmehl mit 77 % und 65 % ebenfalls sehr hoch sind (ähnlich dem Beton ohne Zusatz). Der Beton mit Steinkohlenflugasche wurde zu 58 % aufgeschlossen.

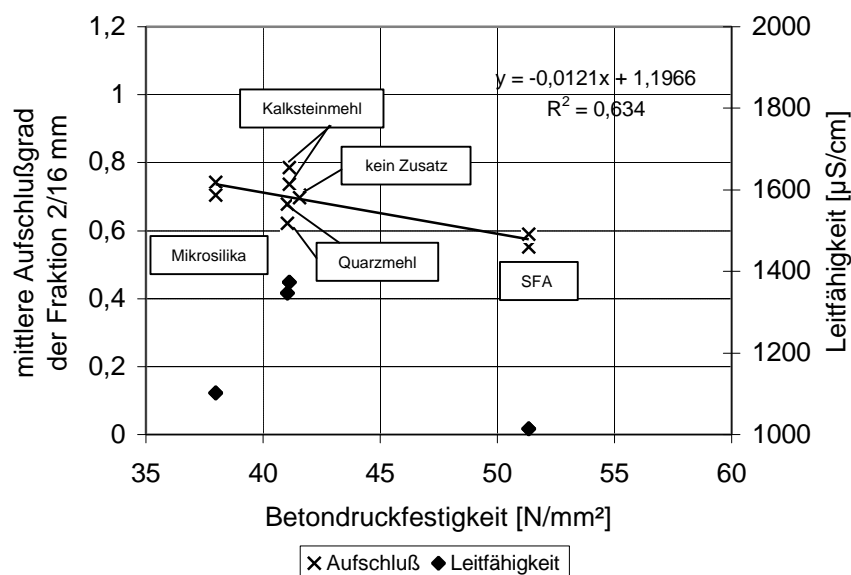


Bild 15: Einfluss der Zusätze auf den Aufschlussgrad  $\mu_{AG,2/16\text{ mm}}$  (vollständig freigelegte Partikel und Partikel mit geringen Zementsteinanhaftungen ( $\rho=2,5\text{-}2,8\text{ g/cm}^3$ )) und die Leitfähigkeit des Prozesswassers in Abhängigkeit von der Betondruckfestigkeit

### 2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Parameter des Betons haben teilweise Einfluss auf die Schallausbreitung im Beton und damit auf die Effektivität der Leistungsschallimpulszerkleinerung. Für die Parameter Zementfestigkeit, Zementart, Korngrößenverteilung/Größtkorn und Betonzusätze konnte ein signifikanter Einfluss nachgewiesen werden. Die Beschaffenheit der Zuschlagoberfläche spielt für die Wirkung der Schallimpulse keine Rolle.

Ein Anstieg der Zementfestigkeit bewirkt eine Verbesserung der Zerkleinerung und des Aufschlusses. Die Zementart ist insofern wichtig, da sie die Leitfähigkeit des Prozesswassers entscheidend beeinflusst. Diesem Effekt kann über geeignete Maßnahmen (z.B. CO<sub>2</sub>-Einleitung) entgegengewirkt werden. In Bezug auf das Größtkorn des Zuschlags sind feinkörnige Betone schwieriger zu zerkleinern und aufzuschließen als grobkörnige. Bei den Betonzusätzen war der Beton mit Steinkohlenflugasche deutlich schwieriger aufzuschließen, während seine Zerkleinerbarkeit nicht von der des Betons mit Mikrosilika oder Kalksteinmehl abwich. Nach den Ergebnissen der Schallimpulszerkleinerung wäre also ein feinkörniger Beton hergestellt mit einem Hochofenzement niedriger Festigkeitsklasse die ungünstigste Variante für Zerkleinerung und Aufschluss.

Die Ergebnisse bestätigen die Erkenntnisse aus theoretischen Untersuchungen zur Schallausbreitung im heterogenen Material Beton. Die aus Untersuchungen bekannten Einflussfaktoren auf die Ausbildung der Kontaktzone zwischen Zuschlag und Zementstein können für die Erklärung der vorgestellten Ergebnisse herangezogen werden.

### 2.4 Ausblick

Es ist geplant, die Forschungen fortzusetzen und einer praxistauglichen Anwendung zuzuführen. In Zusammenarbeit mit der Universität Magdeburg und drei mittelständischen Unternehmen aus Thüringen und Sachsen soll ein labortauglicher Prototyp entwickelt werden. Nach Erfolg versprechenden Versuchen zum Aufschluss von Asphalt werden derzeit innerhalb einer Diplomarbeit weitere Untersuchungen dazu angestellt /Mül04/.

### Literatur

- /KWTB2003/ Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau (KWTB): 3. Monitoring-Bericht: Bauabfälle. Berlin, 31. Oktober 2003
- /MüLi01/ Müller, A.; Linß, E.; Wollenberg, G.; Scheibe, H.-P.: Schallimpulszerkleinerung – ein neues Verfahren zur selektiven Zerkleinerung von Beton. Tagungsbeitrag und Vortrag zur Tagung Recycling 2001, Weimar
- /MüLi03/ Müller, A.; Linß, E.; Wollenberg, G.; Scheibe, H.-P.: Elektrohydraulische Zerkleinerung von Altbeton – neue Ergebnisse und Perspektiven. Tagungsbeitrag und Vortrag zur Tagung Recycling 2003, Weimar

- /Räß02/ Räß, S.: Vergleich zwischen den Zerkleinerungsprodukte des Verfahrens der Schallimpulszerkleinerung und konventionellen Zerkleinerungsverfahren für Altbeton. Studienarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, 2002
- /Schr00/ Schreier, M.: Aufschlusszerkleinerung eines Partikelverbundstoffes mit Sprödbruchverhalten, Dissertation, 2000
- /Rie03/ Riedel, W.: Beton unter dynamischen Lasten: Meso- und makromechanische Modelle und ihre Parameter. EMI-Bericht 6/00, Dissertation, Institut Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, Freiburg, 2003
- /Schu00/ Schubert, F.: Ausbreitungsverhalten von Ultraschallimpulsen in Beton und Schlussfolgerungen für die zerstörungsfreie Prüfung. Dissertation, Fakultät Maschinentechnik, Technische Universität Dresden, 2000
- /Mül02/ Müller, M.: Untersuchungen zum Einfluss des Zementes auf die Betonzerkleinerung mittels Schallimpulsen. Studienarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, 2002
- /Mül04/ Müller, M.: Untersuchungen zur Schallimpulszerkleinerung von Asphalt. Studienarbeit an der Professur ABW, Studienarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, 2004
- /Zan00/ Zange, R.: Anwendungsbezogenes Prozessmodell der Wandlung elektrischer Energie in Energie des Leistungsschallimpulses. Dissertation O-v-G-Universität Magdeburg, 2000

### **Verfasser**

Prof. Dr.-Ing. habil. Anette Müller; Dipl.-Ing. E. Linß  
Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung  
Bauhaus-Universität Weimar  
Coudraystraße 7  
99423 Weimar  
E-Mail: anette-m.mueller@bauing.uni-weimar.de oder  
elske.linsz@bauing.uni-weimar.de  
Tel.: 03643/5846-06 oder -98

Prof. Dr.-Ing. G. Wollenberg; Dr.-Ing. H.-P. Scheibe  
Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und EMV  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
Postfach 4120  
39016 Magdeburg  
E-Mail: guenter.wollenberg@e-technik.uni-magdeburg.de oder  
Heinz-Peter.Scheibe@e-technik.uni-magdeburg.de  
Tel.: 0391/67-18636 oder -11086