

Weiss A.; Müller A.; Ludwig H.-M.

Aufschluss von Verbundbaustoffen durch mikrowellen-induziertes Grenzflächenversagen

Ausgangssituation

Beim Recycling von Bauabfällen gehen mit zunehmender Komplexität des Ausgangsmaterials die Verwertungsquoten zurück. Schwierige Ausgangsstoffe wie Verbundbaustoffe, die aus mehreren Komponenten bestehen, erschweren das Recycling. Sie finden sich im Bauschutt und in den Baustellenabfällen wieder und senken die Materialausbeute.

Die Verbesserung des Ressourcen- und Energieeffizienzpotentials, das durch Verbundbaustoffe in der Nutzungsphase erreicht werden kann, führt zu Verschlechterungen in der anschließenden Verwertungsphase. Um diesen Widerspruch aufzulösen, müssen bei der Entwicklung und Anwendung von Verbundbaustoffen zukünftig die Möglichkeiten der Trennung der Komponenten von vorn herein berücksichtigt werden. Die für ein solches „Design for Recycling“ benötigten Methoden und Werkzeuge stehen für Baustoffe noch nicht zur Verfügung und sind Gegenstand dieses Projektes.

Das für die Dauer von drei Jahren geförderte Projekt „Grenzflächen“ wird von einem Forschungsverbund aus sechs Partnern mit Kompetenzen auf dem Gebiet der Mikrowellentechnik, der Aufbereitungstechnik und der Baustoffentwicklung sowie -anwendung bearbeitet. Koordiniert wird das Vorhaben von der Professur Werkstoffe des Bauens an der Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Horst-Michael Ludwig. Ziel des Forschungsvorhabens ist es, Verbundbaustoffe in Zukunft effizienter zu recyceln. Dazu sollen aus mehreren Komponenten bestehende, mittels mineralischer Kleber zusammengefügte Verbundbaustoffe so vorbereitet werden, dass sie bei ihrem Rückbau oder bei der anschließenden Aufbereitung leicht getrennt werden können. Dafür werden dem Kleber mikrowellensensibler Bestandteile, so dass die Verbundbaustoffe bei einer anschließenden Behandlung mit Mikrowellen in entsprechenden Anlagen oder auch vor Ort getrennt werden können. So kann das bei Verbundbaustoffen bis heute überwiegend praktizierte Downcycling überwunden und eine nachhaltige Kreislaufführung auch dieser Materialien erreicht werden. Parallel zu dem Einsatz auf dem Recyclingsektor könnte das zu entwickelnde Verfahren auch bei der Sanierung von Bauwerken genutzt werden.

Probleme beim Recycling von Verbundbaustoffen

Als aktuelles Beispiel für die Auswirkungen von Verbundbaustoffen auf das Recycling können Wärmedämmverbundsysteme, die ca. 1957 erstmalig zum Einsatz kamen und sich zunehmend im Abbruchmaterial finden, genannt werden. Sie bestehen aus der eigentlichen Dämmschicht sowie zusätzlichen Ausgleichs-, Armierungs- und Deckschichten. Klebschichten und Elemente zur Befestigung wie Dübel oder Tragschienen sind weitere Komponenten. Eine Analyse einiger Systeme ergab, dass diese zum Teil aus bis zu 10 Einzelementen bestehen (Abb. 1).

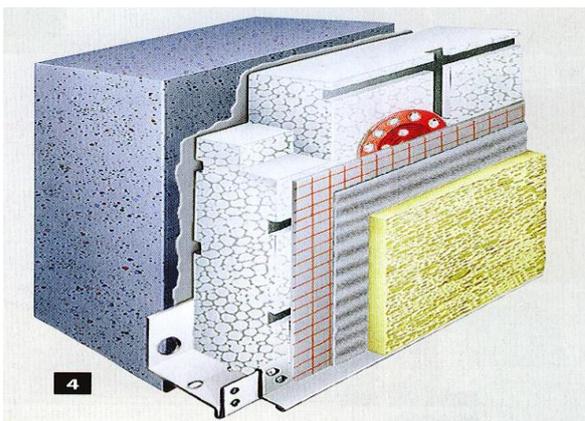


Abb. 1: Beispiel für den Aufbau eines Wärmedämmverbundsystems (entnommen aus [2])

Die Frage, wie solche Systeme zu rezyklieren sind, wurde bisher kaum gestellt und folglich auch nicht beantwortet. Aus einer einfachen Betrachtung der Zusammensetzung der Systeme ergibt sich aber bereits, dass eine Verwertung ohne Trennung nicht möglich ist. Systeme mit künstlichen Mineralfasern sind im Hinblick auf das Recycling differenzierter zu betrachten. Bei einem werkstofflichen Recycling stellen die Mineralfasern Störstoffe dar, die entfernt werden müssen. Bei einem rohstofflichen Recycling können die Mineralfasern zusammen mit den anderen mineralischen Bestandteilen als eine „Materialfamilie“ betrachtet werden. Allerdings bestehen Einschränkungen, die sich aus den Anforderungen des Gesundheits- und Arbeitsschutzes ergeben.

In jüngster Zeit werden im Bausektor zunehmend multifunktionale Systeme entwickelt, die parallel mehrere Aufgaben erfüllen können. Zu diesen Systemen gehören beispielsweise Verbundbaustoffe mit Latentwärmespeichervermögen. Sie bestehen aus in Kunststoffmikrokapseln verpacktem Wachs, welches in Gipsbauplatten, Putzen, Spachtelmassen oder Spanplatten eingebracht wird.

Die Kombination von Gipsbauplatten oder Gipsputzen mit wachsgefüllten Mikrokapseln auf einer gemauerten Wand würde einen zweifachen Aufschluss erforderlich machen. Zunächst müssten die Gipsbauplatten demontiert bzw. der Gipsputz vom Mauerwerk entfernt werden, um die Rezyklierbarkeit des Mauerwerks nicht zu beeinträchtigen. Anschließend wäre eine Trennung der Mikrokapseln von dem Bindemittel Gips erforderlich. Für beide Trennprozesse stehen bisher keine Techniken zur Verfügung.

Lösungsansatz und erste Versuchsreihen

Das gezielte Grenzflächenversagen kann unter Anwendung mikrowellensensibler Zusätze realisiert werden. Diese sollten den Primärverbund nicht beeinträchtigen, die anschließende Verwertung nicht stören und keine „kritischen“ Rohstoffe darstellen. Diese Forderungen sind erfüllbar, wenn z.B. Graphit, Siliciumcarbid oder Eisenoxide eingesetzt werden. Diese Zusätze, ihre Parameter und die verschiedenen Applikationsformen sind Schwerpunkt der Untersuchungen im Projekt.

In Vorversuchen konnten erste Erfahrungen bezüglich der Mikrowellenbehandlung, der Probekörperherstellung und der Eignung verschiedener Suszeptoren gesammelt werden.

Es wurden Zementmörtelprismen mit und ohne Mikrowellensuszeptor hergestellt. Die Druckfestigkeiten der Prismen nach 90 Tagen lagen zwischen 63 und 68 MPa. Nach der Mikrowellenbehandlung lagen die suszeptorfreen Prismen unzerstört vor, während die suszeptorhaltigen Prismen zerstört waren (Abb. 3). Ebenso wurde ein mineralischer Fliesenkleber mit einem Suszeptor versetzt und damit Fliesen auf einem Ziegel verklebt. Parallel wurden Fliesen ohne modifizierten Fliesenkleber aufgebracht. Die mit dem modifizierten Fliesenkleber befestigten Fliesen konnten nach der Mikrowellenbehandlung per Hand vom Untergrund abgenommen werden.



Abb. 2: Mikrowelle Typ LK14,4 (am IAB)



Abb. 3: Zementmörtelprismen mit und ohne Mikrowellensuszeptor direkt nach der Mikrowellenbehandlung

Im Rahmen einer Studienarbeit [4] wurde der Verbund zwischen Gipskartonplatte + Fliese untersucht. Ziel war es, den Trennerfolg in Abhängigkeit von der Behandlungszeit, der Temperaturentwicklung, der Art des Suszeptors und der Applikationsform zu untersuchen (Abb.4). Hierfür wurde auf drei Suszeptoren Graphit, Eisen(III)-Oxid und Siliciumcarbid zurückgegriffen, die wiederum dem Fliesenkleber zu unterschiedlichen Prozentsätzen zugegeben wurden.



Abb. 4: Probekörper Gipskartonplatte + Fliese und Suszeptoren im Fliesenkleber

Der erfolgreiche Bruch im Materialverbund konnte am häufigsten beim Einsatz von Graphit beobachtet werden. Ab einer Dosierung von 5 Ma.-% und einer Strahlungseinwirkzeit bis zu einer Minute kam es bis auf wenige Ausnahmen regelmäßig zum Grenzflächenversagen. Bei einer geringeren Dosierung von 3 Ma.-% und 1 Ma.-% Graphit trat kein Bruch mehr auf.

Prüfkörper mit Fe_2O_3 -Suszeptor blieben ohne Grenzflächenversagen. Manuell war es nach der Mikrowellenbestrahlung - auch nach längerer Zeit - nicht möglich, den Materialverbund zu lösen.

Ein anderes Grenzflächenversagen konnte bei den Prüfkörpern mit SiC-Suszeptor beobachtet werden. Hier gab es zwar nur wenige Versagensbrüche, jedoch fielen diese sehr heftig aus. Die Fliesen wurden dabei vom Fliesenkleber abgesprengt.

Die Probenserie mit 10 Ma.-% Graphit weist das beste Bruchverhalten auf. Bei 20 Ma.-% Graphit zeigen sich weniger qualitativ gute Brüche, dafür tritt der Brucherefolg hier zuverlässiger ein.

Erste Untersuchungen von Verbundbaustoffen mit konstruktiven Aufgaben

Für die Untersuchungen von Verbundsystemen mit Tragfunktion wurden Betonwürfel als Versuchsmuster hergestellt. Die Festlegung der Betonzusammensetzung nach DIN EN 206-1 / DIN 1045-2 erfolgte wie üblich unter Zuhilfenahme der Stoffraumrechnung und unter Berücksichtigung der in den Vorschriften festgelegten Grenzwerte. Für alle hergestellten Betone gelten die gleichen Parameter, lediglich der Suszeptor und dessen Konzentration variiert.

Zement:

- CEM I 42,5 R
- 350 kg/m^3

Wasser:

- $w/z = 0,60$
- 210 kg/m^3

Gesteinskörnung:

- Sieblinie AB16
- 0/2, 2/8, 8/16 (je 33%)
- 1.740 kg/m^3

eingesetzte Suszeptoren [Konzentration 5 M.-%; 10 M.-%; 15 M.-%] :

- ohne Suszeptor (Referenz)
- Magnetit (Fe_3O_4)
- SiC
- GK ES 350 F5
- GK SC 20 O (Leitfähigkeitsgraphit)

Der Referenzbeton ohne Additive und die Betone mit abgestuften Potenzialen von Magnetit, Siliciumcarbidge und 5% Graphit Typ ES 350 F5 hatten eine Konsistenz von weich (F3) und sehr weich (F4). Alle anderen Betone mit Graphit waren plastisch (F2) oder steif (F1) (Abb. 5). Der Leitfähigkeitsgraphit GK SC 20 O konnte nicht mit 10%iger Konzentration eingesetzt werden, da der Beton sehr steif wurde und somit nicht mehr verarbeitbar war.

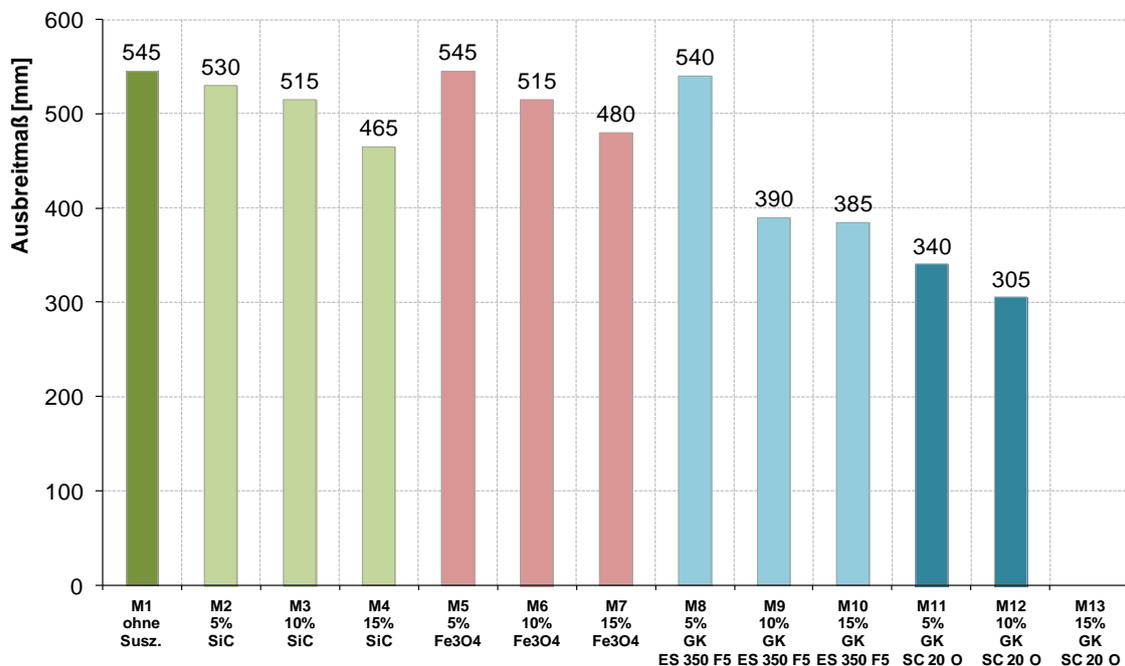


Abb. 5: Ausbreitmaße der hergestellten Betone ohne Suszeptor und mit unterschiedlichen Suszeptoren und Konzentrationen

Die 28d- Druckfestigkeiten (Abb. 6) liegen im Bereich C30/37, C 35/45 und sogar C40/50.

Siliciumcarbidge (SiC), ein sehr harter keramischer Werkstoff, steigert mit zunehmender Konzentration die Druckfestigkeit des Betons. Ebenso wirkt Magnetit (Fe_3O_4) festigkeitssteigernd.

Mit zunehmender Konzentration von Graphit GK ES 350 F5 mindert sich zwar die Festigkeit, erreicht aber selbst bei 15%iger Konzentration eine Festigkeitsklasse von C30/37.

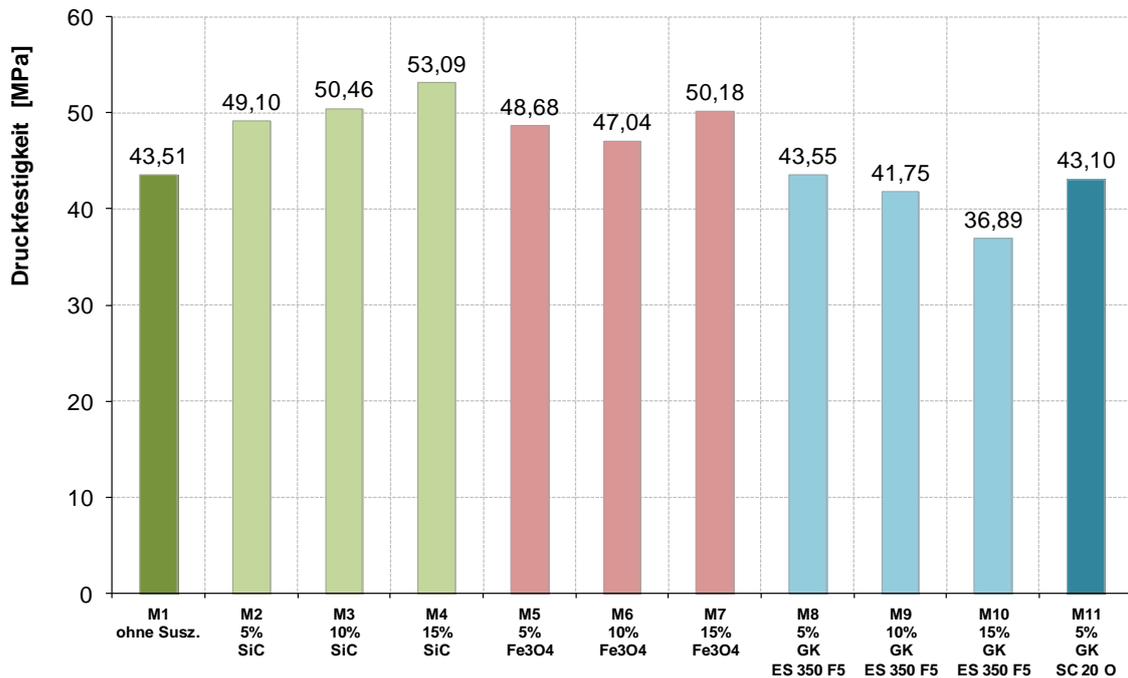


Abb. 6: 28d-Druckfestigen der hergestellten Betone ohne Suszeptor und mit unterschiedlichen Suszeptoren und Konzentrationen

Die Mikrowellenbehandlung der Betonwürfel wurde nach mindestens 28 Tagen (Alter des Betons) durchgeführt.



Abb. 7: Betonwürfel 15x15cm im Glasvlies

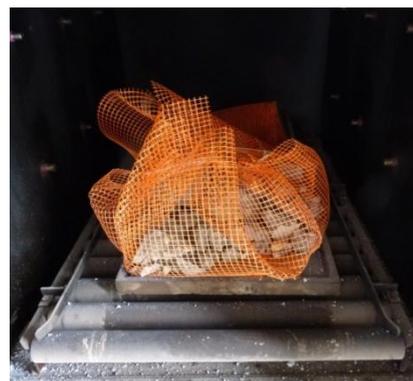


Abb. 8: Betonwürfel nach der Mikrowellenbehandlung [Foto: S. Liebezeit]

Unmittelbar nach der Mikrowellenbehandlung und erfolgreicher Trennung (hörbarer Bruch) wurden die Oberflächentemperaturen Betonbruchstücke mittels Infrarot-Thermometer gemessen und liegen zwischen 130 °C und 180 °C.

Die Behandlungszeit bis zum Bruch der Betonwürfel in der Mikrowelle lag zwischen 09:07 min und 11:21 min. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Behandlungszeit und Oberflächentemperatur ist nicht erkennbar (Abb. 9). Der Beton mit 5% GK SC 20 O mit der kürzesten Zeit von 09:07 min hatte eine Oberflächentemperatur von 170 °C. Bei der längsten Verweildauer in der Mikrowelle von 11:21 min vom Beton mit 10% SiC wurde dagegen nur eine Oberflächentemperatur von 148 °C gemessen.

Auch die Gegenüberstellung von Behandlungszeit und Suszeptorgehalt (Abb. 10) zeigt keine eindeutigen Zusammenhänge. Lediglich beim Beton mit Graphit GK ES 350 F% zeigt sich bei steigender Suszeptorkonzentration eine Verringerung der Behandlungsdauer.

Die Oberflächentemperaturen liegen nur eindeutig bei 10%igem Suszeptorgehalt nah bei einander. Bei 5% Suszeptor im Beton schwanken die Temperaturen zwischen 130 °C und 180 °C (Abb. 11).

Zusammenfassend lässt sich momentan kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Temperatur, Bruch und Suszeptorkonzentration erkennen. Grenzflächenversagen kann sowohl bei niedrigen Temperaturen und geringen Suszeptoranteilen auftreten, als auch umgekehrt.

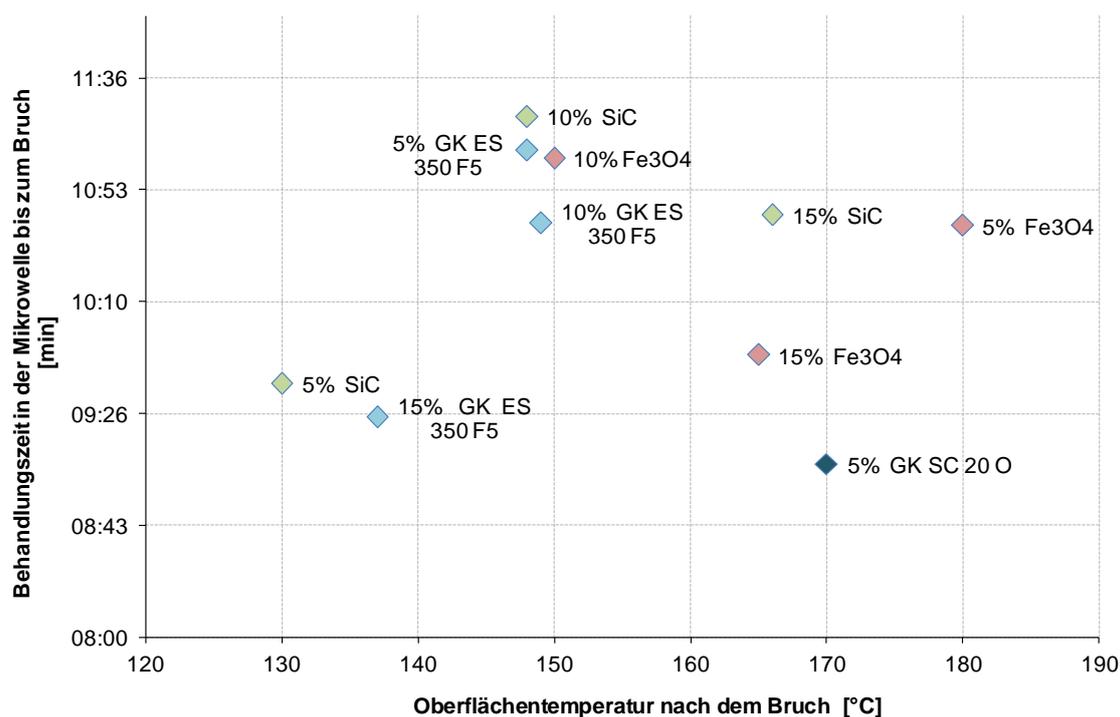


Abb. 9: Gegenüberstellung der Behandlungszeit bis zum Bruch der Betonwürfel in der Mikrowelle und der Oberflächentemperatur nach dem Bruch

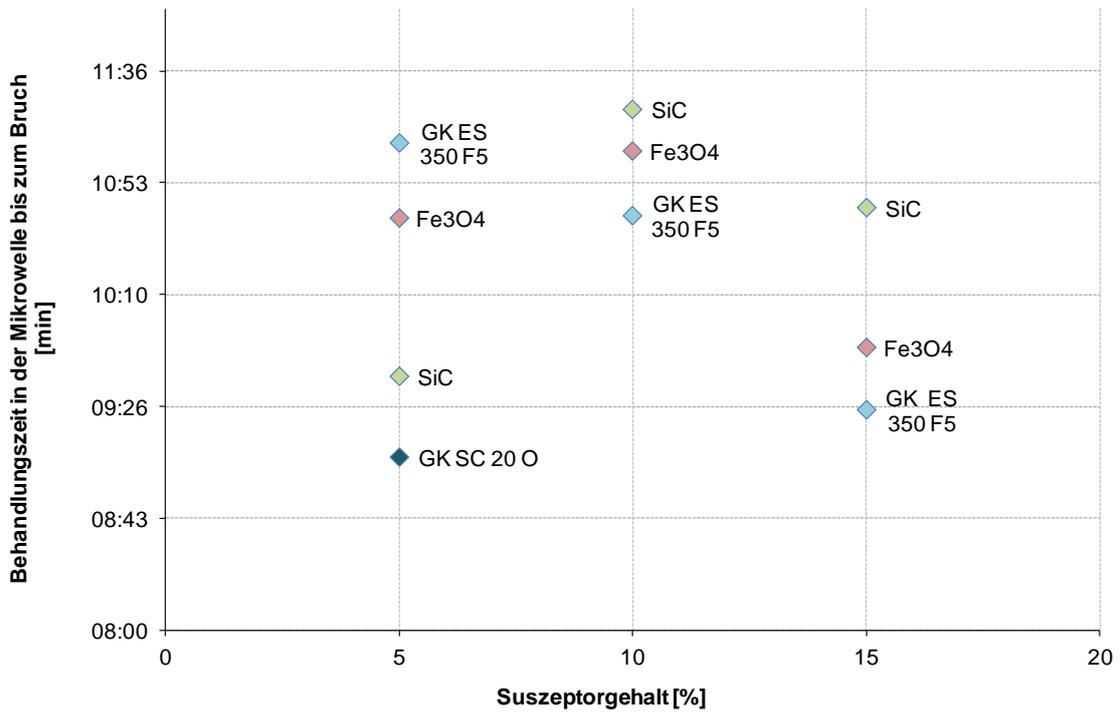


Abb. 10: Gegenüberstellung der Behandlungszeit bis zum Bruch der Betonwürfel in der Mikrowelle und dem Suszeptorgehalt

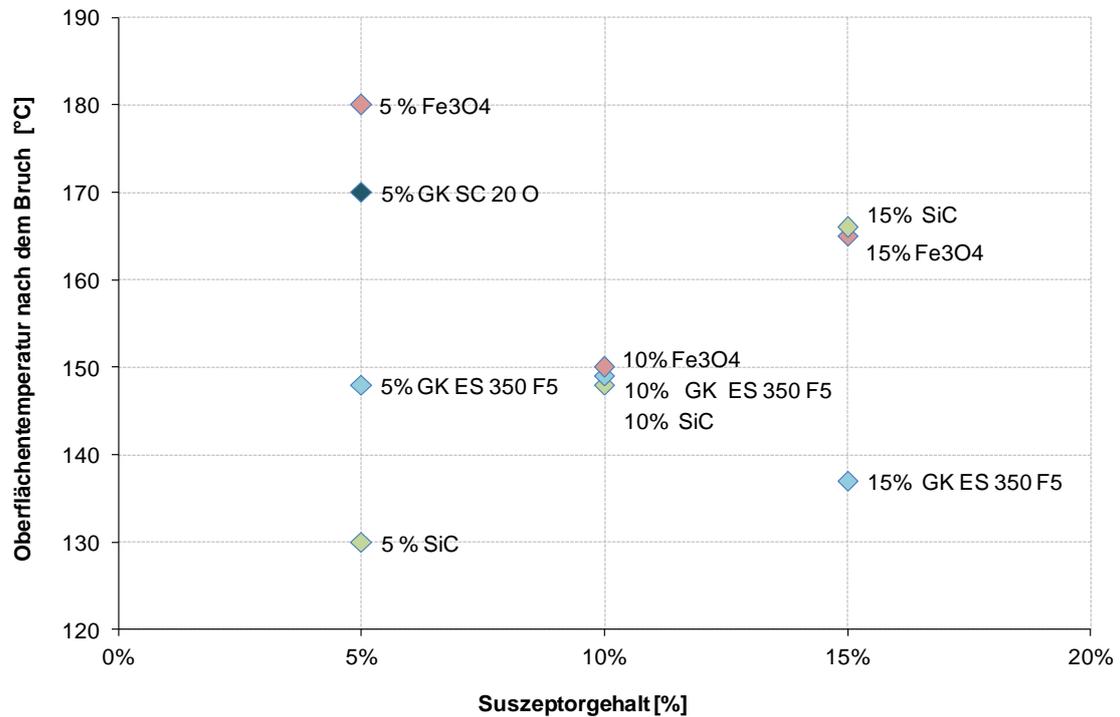


Abb. 11: Gegenüberstellung der Oberflächentemperatur nach dem Bruch und dem Suszeptorgehalt

Zur ersten Beurteilung des Zerkleinerungserfolges wurde das Zerkleinerungsgut mittels Siebanalyse in mehrere Fraktionen getrennt und die Massen durch das Auswiegen der Rückstände auf den einzelnen Prüfsieben ermittelt. Interessant waren vor allem dabei die Fraktionen 0/2, 2/8 und 8/16, um hier auch Rückschlüsse zum Aufschlussgrad (Rückgewinnung der eingesetzten Gesteinskörnung) ziehen zu können (Abb. 12 und 13).

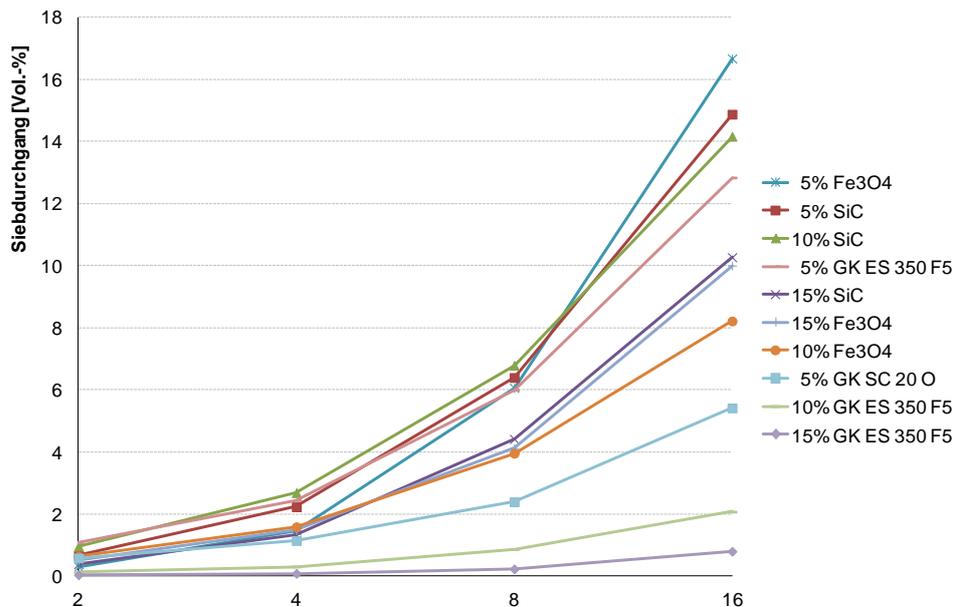


Abb. 12: Siebdurchgang des Zerkleinerungsgutes für Siebweiten 2, 4, 8 und 16 mm

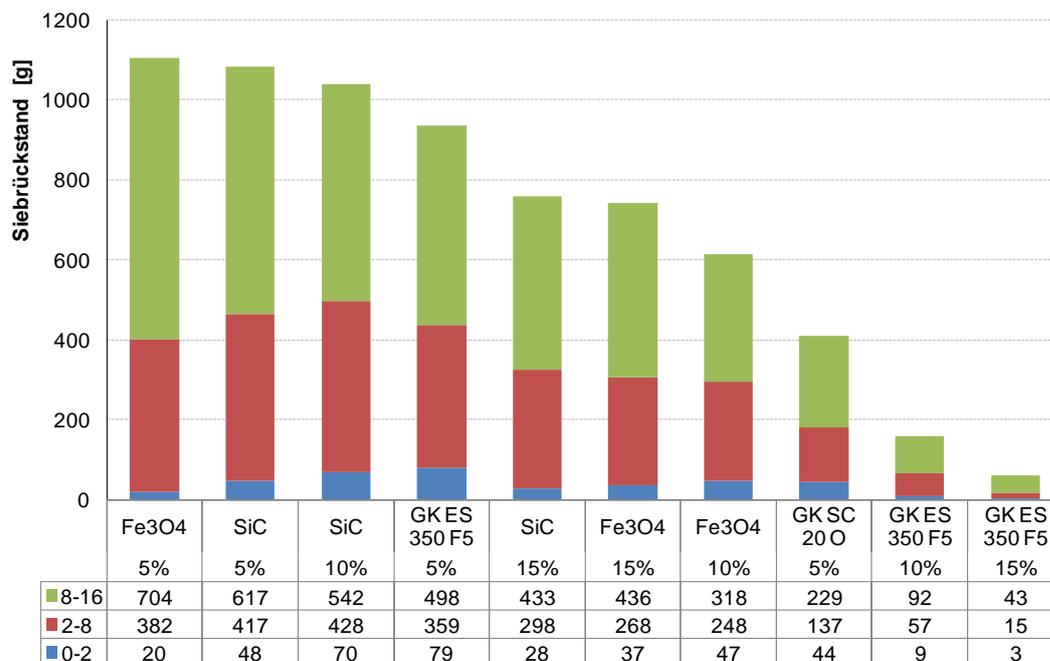


Abb. 13: Siebrückstände des Zerkleinerungsgutes der Fraktionen 0/2, 2/8 und 8/16



Abb. 14: Ansichten des Zerkleinerungsgutes der Betonwürfel nach der Mikrowellenbehandlung

Das beste Zerkleinerungsergebnis liegt beim Beton mit 5% Fe_3O_4 vor, gefolgt von den Betonen mit 5% und 10% SiC und 5% Graphit GK ES 350 F5. Den geringsten Zerkleinerungsgrad haben die Betone mit 5% Graphit GK SC 20 O und 10% bzw. 15% Graphit GK ES 350 F5. In den Bruchstücken kann man eine gute Homogenität der Gesteinskornmischung und eine gute Verteilung des Graphites im Gemisch erkennen. Die Gründe für die geringe Zerkleinerung müssen noch näher untersucht werden.

Ausblick

Die hier dargestellten vielversprechenden Ansätze werden weiter verfolgt. Insbesondere sollen weitere Untersuchungen Ergebnisse zum Aufschlussgrad und somit zum Trennerfolg liefern. Bis zum jetzigen Zeitpunkt wurden z. B. die Verwachsungen mit Zement und Gesteinskörnungen noch nicht untersucht. Diese können durch gezielte Sortierung, Dichtebestimmung etc. charakterisiert werden. In den Abbildungen 15 bis 20 sind bereits Ansätze von gelöster Gesteinskörnung optisch gut erkennbar.

Außerdem werden andere Applikationsformen für die mikrowellenabsorbierenden Additive im Beton, z.B. die Benetzung der Gesteinskörnung, am FIB untersucht und schließlich empirische Zusammenhänge zwischen der Festigkeit des Verbundes, der Art und Menge der aktiven Komponente und des Energieeintrags per Mikrowelle dargestellt.



Abb. 15: 5% Fe_3O_4
Kornklasse 8/16



Abb. 16: 5% Fe_3O_4
Kornklasse 4/8



Abb. 17: 5% SiC
Kornklasse 8/16



Abb. 18: 5% SiC
Kornklasse 4/8



Abb. 19: 5% GK ES 350 F5
Kornklasse 8/16



Abb. 20: 5% GK ES 350 F5
Kornklasse 4/8

Des Weiteren laufen parallel Untersuchungen bei den Projektpartnern, wie z.B.:

- dielektrische Messungen zur Ermittlung des Absorptionspotentials der Komponenten am Fraunhofer ICT Pfinztal
- Untersuchungen an nicht tragenden Verbundsystemen (Schichten) am IAB Weimar
- Entwicklungen zur Mikrowellentechnologie bei der Fa. MUEGGE GmbH:
 - Lässt sich eine offene Anwendung der Mikrowellenbehandlung bewerkstelligen?
 - Wie kann das erforderliche Sicherheitskonzept umgesetzt werden?
 - Wie kann eine geschlossene Anwendung mit kontinuierlichem Materialdurchsatz realisiert werden?

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau (KWTB): 1.-5. Monitoring-Bericht Bauabfälle. Berlin/ Düsseldorf/ Duisburg 2000, 2001, 2003, 2005, 2007.
- [2] Kolbe, G.J.: Etwas Wärme braucht das Haus. Außendämmsysteme im Überblick. Bauen im Bestand, Vol. 33 (2010) März, S. 20-23.
- [3] Homepage Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR): Bauwesen, Veröffentlichungen, Innovative Baustoffentwicklungen. 23.02.2010.
- [4] Laub, K.: Modellversuche zum Grenzflächenversagen unter Einsatz von Mikrowellen. Studienarbeit. Bauhaus-Universität Weimar, 2011.