

Dipl.-Ing. Liebezeit, Steffen;

Prof. Dr.-Ing. habil. Müller, Anette;

Dr.-Ing. Leydolph, Barbara;

Dr.-Ing. Palzer, Ulrich

IAB – Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH; Über der Nonnenwiese 1;
99428 Weimar

Mikrowelleninduziertes Grenzflächenversagen zur Trennung von Materialverbunden

1 Ausgangssituation

Bauwerke bestehen aus Baustoffen, die zu funktionalen Materialverbunden zusammengefügt und zusätzlich mit verschiedensten „Oberflächenbeschichtungen“ versehen sind. Im Sinne der Wiederverwertung wäre es wünschenswert, diese Verbunde entweder bereits beim Rückbau oder aber bei der anschließenden Aufbereitung in Recyclinganlagen durch geeignete Verfahren vollständig aufzuschließen und sortenrein voneinander zu trennen. So könnten die Voraussetzungen für eine stoffspezifische Verwertung bis hin zur Rückführung des Materials in das Primärprodukt geschaffen werden.

Die herkömmliche Methode, Materialverbunde aufzuschließen, stellt die mechanische Zerkleinerung dar, für die bei der Bauschutttaufbereitung Backen- und Prallbrecher verwendet werden. Ein Nachteil ist, dass keine vollständige Trennung von Verbundmaterialien erreicht wird, insbesondere wenn die Komponenten des Verbundes auf Grund vergleichbarer Materialeigenschaften (z. B. Dichte, Festigkeit) ein ähnliches Zerkleinerungsverhalten aufweisen. Ein weiterer Nachteil ist die Entstehung erheblicher Mengen an Feinkorn, für die es zurzeit kaum Einsatzgebiete gibt. Eine Alternative, um einen hohen Aufschluss möglichst ohne störende Feinfraktion zu erreichen, besteht darin, die Materialverbunde durch ein Versagen entlang der Grenzflächen gezielt zu trennen. Die Entwicklung solcher Verfahren ist aus der Klebetechnik unter dem Begriff „Debonding on Demand“ bekannt [1], [2]. Wiederlösbare Klebverbindungen sind bisher hauptsächlich für den Automobil- und Flugzeugbau oder für elektronische Bauelemente konzipiert. Für Verbundbaustoffe ist das eine bisher wenig untersuchte Fragestellung mit großem Innovationspotential. Zum einen müssen dafür Beanspruchungen gefunden werden, die exakt an der Grenzfläche wirken. Zum anderen ist ggf. eine „Präparation“ der Grenzfläche notwendig, die Beanspruchungen besonders hier wirksam werden lassen. Eine Möglichkeit das zu erreichen, stellt das Einwirken von Mikrowellen dar. Durch das Einbringen von Substanzen, die Mikrowellen absorbieren, könnte eine gezielte Schwächung des Baustoffverbundes bei Mikrowellenbeaufschlagung erreicht werden.

In einem Verbundforschungsprojekt wurde die Trennung von Baustoffverbunden durch mikrowelleninduziertes Grenzflächenversagen unter zwei Aspekten verfolgt:

- Aufschluss von Betonen durch eine Zerkleinerung entlang der Phasengrenzflächen Gesteinskörnungen – Zementstein

- Trennung von mehrschichtigen Baukonstruktionen wie Putzen oder Fliesen, die auf tragenden Baustoffen aufgebracht sind

Parallel zu den Untersuchungen hinsichtlich einer ggf. erforderlichen Präparation der Grenzflächen wurden von den beteiligten Projektpartnern zwei „Mikrowellenöfen“, sowohl als mobile als auch als stationäre Anlage entwickelt, die eine Behandlung der Verbundbaustoffe „in Plant“ (in der Recyclinganlage) oder „in Place“ (auf der Baustelle) ermöglichen. Die im Folgenden behandelte Trennung von mehrschichtigen Baukonstruktionen wird an den Beispielen von Gipsputz auf tragender Wand und Fliesen auf beliebigem Untergrund dargestellt.

2 Mikrowellen in der Aufbereitungs- und Recyclingtechnik

Mikrowellen, elektromagnetische Schwingungen im Frequenzbereich von 300 MHz bis 300 GHz, können mit Materialien in unterschiedliche Wechselwirkung treten. Wird ein Material einer Mikrowellenstrahlung ausgesetzt, kann diese absorbiert, reflektiert oder transmittiert werden, wobei sich das Verhalten mit zunehmender Temperatur verschieben kann. Materialien mit einem hohen Dielektrikum absorbieren Mikrowellen. Dabei werden die in ihnen enthaltenen Moleküle mit unsymmetrischer Struktur oder frei beweglichen Ionen in Schwingungen versetzt. Durch die auftretende Reibung kommt es zu einer Erwärmung von innen heraus. Materialien mit hoher elektrischer Leitfähigkeit, wie Metalle, reflektieren die Mikrowellen an der Oberfläche. Das Material erwärmt sich nicht. Transparente Materialien werden von Mikrowellen ohne Auswirkungen durchstrahlt.

Das Hauptanwendungsgebiet von Mikrowellen sind Anlagen zur Erwärmung, die unterschiedlichste Branchen nutzen. Die Spanne reicht von der Lebensmittelindustrie bis zum Mikrowellensintern von Keramik. Das Verhalten von Materialien im Mikrowellenfeld beschreiben deren dielektrische Konstanten. Die kennzeichnende Materialkenngröße für das Absorptionsvermögen ist die **Permittivität** ϵ (dielektrische Funktion) als komplexwertige Größe

$$\epsilon = \epsilon' + i * \epsilon''$$

bzw. bezogen auf die Feldkonstante des Vakuums ϵ_0

$$\epsilon_r = \epsilon'_r + i * \epsilon''_r = \frac{\epsilon'}{\epsilon_0} + i * \frac{\epsilon''}{\epsilon_0}$$

mit ϵ'_r – dielektrische Konstante als Maß für das Vermögen des Materials die Mikrowellenenergie beim Durchgang zu verzögern

ϵ''_r – Verlustfaktor als Maß für das Vermögen des Materials Mikrowellenenergie zu streuen

In der Literatur sind Angaben zu den dielektrischen Eigenschaften von verschiedenen Mineralen, Bestandteilen von Baustoffen und Baustoffen selbst zu finden. Die Angaben für unterschiedlich vorgelagerte Betone fasst Tabelle 1 zusammen. Aus den Unterschieden, die zwischen Beton und Zementstein einerseits sowie Wasser und Porenlösung andererseits bestehen, kann gefolgert werden, dass Zementstein und Beton nur gering auf Mikrowellen reagieren. Wenn eine Erwärmung stattfindet, wird diese durch vorhandenes freies Wasser und mehr noch durch die ionische Porenlösung verursacht.

Tabelle 1: Dielektrische Eigenschaften von Betonbestandteilen nach Buttress und Lippiatt

| Buttress [3] | ϵ_R' [-] | ϵ_R'' [-] | Lippiatt [4] | ϵ_R' [-] | ϵ_R'' [-] |
|--|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| Beton, nass | 12,1 | 1,3 | Gesteinskörnungen | 3–15 | 0,08–0,2 |
| Beton, wassergesättigt | 6,0 | 0,5 | Zementstein | 5,3–10 | 0,48 |
| Beton, ausgleichsfeucht | 4,5 | 0,05 | Wasser | 80 | 12 |
| Beton, ofengetrocknet | 4,0 | < 0,05 | | | |
| Wasser | 77 | 13 | | | |
| 0,3 M NaCl (als Nachbildung von Porenlösung) | 70 | 17 | | | |

Anschaulicher als Materialbewertungen anhand der dielektrischen Eigenschaften ist die Bewertung anhand der Temperaturentwicklung in Abhängigkeit von der Behandlungsdauer, wenn die Materialien einer bestimmten Mikrowellenenergie ausgesetzt werden. Von Haque [5][5] wird eine Klassifikation analysenreiner Oxide anhand der Aufheizgeschwindigkeit und der erreichten Maximaltemperatur vorgenommen. Zu den sehr aktiven Materialien gehören Magnetit Fe_3O_4 , Kohlenstoff und die ebenfalls in die Aufstellung aufgenommene Holzkohle. Schwierig aufzuheizen sind beispielsweise Al_2O_3 und MgO . Inaktiv verhalten sich CaO , CaCO_3 und SiO_2 . Als für Mikrowellen transparente Minerale werden u. a. die Carbonate Aragonit, Calcit und Dolomit, die Silikate Anorthit, Muskovit, Kalkfeldspat und Quarz sowie die Sulfate Baryt und Gips genannt.

Zur Bewertung der Temperaturmessungen wird in der Regel nur die Oberflächentemperatur herangezogen. Sollen Rückschlüsse auf die durch Mikrowelleneinwirkung initiierte Kerntemperatur gezogen werden, sind die Probengeometrie und die Wärmeleitfähigkeit zu berücksichtigen. So bewegen sich beispielsweise die Unterschiede zwischen der Oberflächen- und der Kerntemperatur, an einer zylindrischen Basaltprobe mit einem Durchmesser von 50 mm gemessen, zwischen dem zwei- bis dreifachen [6], [7], [9]. Diese Temperaturunterschiede, die sich über den Materialquerschnitt ausbilden, und die zusätzlich wirksamen materialspezifischen Temperaturunterschiede, die entstehen, wenn das Gestein aus Komponenten mit unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften besteht, verursachen eine inhomogene Erwärmung in deren Folge Spannungen auftreten [8].

Bei Gesteinsproben aus Basalt, Gabbro und Granit führte das bereits nach einer Behandlungsdauer von 10 Sekunden zur Rissbildung und zu Abplatzungen, deren Ausmaß im weiteren Behandlungsverlauf zunahm und nach Verweilzeiten von bis zu 10 Minuten zum Schmelzen des Basalts im Kernbereich führte [6], [9].

Das technische Potential der Mikrowellenbehandlung wird bei der Aufbereitung von mineralischen Rohstoffen vor allem in der dadurch erreichbaren Gefügeschwächung gesehen. Infolge der Vorbehandlung mittels Mikrowellen ergeben sich Vorteile für eine anschließende Zerkleinerung und den dabei zu erreichenden Aufschluss. In den Übersichtsartikeln [5], [10], [12], [13], [14] – beginnend 1984 bis heute – wird darauf wiederholt eingegangen.

Den Baustoffsektor dominieren Untersuchungen, die Mikrowellentechnologien auf Betone anzuwenden. Diese reichen von der Zementherstellung bis zum Recycling. Der Übersicht von Buttress [3] kann entnommen werden, dass die Anwendung von Mikrowellen auf Zement und Beton Gegenstand zahlreicher Untersuchungen war und ist. Die Schwerpunkte liegen dabei auf

- der Herstellung von Zementklinker in der Mikrowelle,
- der Nachbehandlung von Betonen,
- der Bestimmung des Feuchtegehalts und Mikrostrukturuntersuchungen,
- dem Bohren und Schneiden sowie der Oberflächenbearbeitung von Betonen sowie
- der Zerkleinerung von Betonen am ihrem Lebensende.

Beim Recycling können Mikrowellen eingesetzt werden, um kontaminierte Oberflächenschichten abzutragen. Ein mögliches Anwendungsgebiet ist die Behandlung von Betonen aus kerntechnischen Anlagen, deren Oberflächenschichten Radionuklide enthalten. Hier steht eine geringe Staubemission beim Abtrag im Vordergrund. Durch die Mikrowellenbehandlung bildet sich in den Poren des Betons Wasserdampf, woraus Zugspannungen in dem dichten Gefüge resultieren, die dessen Schädigung bis hin zu Abplatzungen bewirken. Von Yasunaka et al. [15] wurde in bereits 1988 durchgeführten Untersuchungen die Leistungsfähigkeit der Mikrowellentechnologie – mit $0,04 \text{ m}^3/\text{h}$ bei einer Abtragtiefe von 10 bis 20 mm – nachgewiesen. Aktuelle Untersuchungen bestätigen diesen Wert [16], [17]. Entscheidende Einflussgrößen auf die Leistungsfähigkeit dieser Technologie sind der Feuchtegehalt, die Permeabilität und die Zugfestigkeit des Betons. Bei hoher Permeabilität wird im Probeninneren kein ausreichend hoher Wasserdampfdruck aufgebaut, der die Rissbildung bewirkt. Zunehmende Sprödigkeit begünstigt den Oberflächenabtrag [18].

Die grundlegenden Möglichkeiten, Betone mittels Mikrowellen zu zerkleinern, untersuchten Akbarnezhad [19], [14] und Lippiatt [4]. Es zeigte sich, dass durch eine Mikrowellenbehandlung allein keine ausreichende Zerkleinerung erreicht wird. Eine Vorbehandlung mittels Mikrowellen erleichterte aber die anschließende mechanische Zerkleinerung [20], [21]. Das stimmt mit dem auf dem Gebiet der Zerkleinerung von Erzen nachgewiesenem Effekt überein, wo eine Mikrowellenvorbehandlung die Mahlbarkeit verbessert. Als Ursachen dafür werden thermische Spannungen infolge der inhomogenen Erwärmung und/oder Spannungen infolge des Porenwasserdrucks angegeben.

Die Vorbereitung von Stoffverbunden auf eine Trennung mittels Mikrowellenstrahlung könnte beispielsweise eine wiederlösbare Klebverbindung ermöglichen [1]. Ein Lösungsansatz, der für den Baustoffsektor bisher kaum untersucht wurde. Vor diesem Hintergrund versuchen japanische Forscher, die Oberfläche grober Gesteinskörnungen mit einer speziellen Paste, die puzzolanisches Material und Fe_2O_3 enthält, zu modifizieren. Damit werden nicht nur die Eigenschaften des Primärbetons verbessert, sondern auch die Voraussetzungen geschaffen, den Beton am Lebensende mit Hilfe von Mikrowellen effektiv zu zerkleinern. Betone mit derart vorbereiteten Gesteinskörnungen erreichten nach einer Mikrowellenbehandlung von 180 Sekunden eine Oberflächentemperatur von 405 °C wohingegen die Oberflächentemperatur von Betonen mit unbehandelten Gesteinskörnungen lediglich 280 °C betrug. Die Porosität in der Phasengrenzfläche nahm zu. Die zurückgewonnenen Gesteinskörnungen enthielten weniger als 5 % Zementpaste [22], [23].

Das Lösen von auf Betonen aufgetragenen Schichten wurde von Ahn untersucht [24], der dazu einen Zement, der Eisen(II)oxid als Suszeptor enthielt, als Trennschicht auf einen Beton auftrug und mit einer Deckschicht aus Mörtel oder auch Fliesen etc. beschichtete. Durch die Suszeptorzugabe konnte die Temperatur an der Trennschicht deutlich auf ca. 600 °C, gegenüber einer Temperatur von 100 °C ohne Suszeptorzugabe, erhöht werden. Die Scher- und die Biegefestigkeiten nahmen bereits bei 1 %iger FeO-Zugabe deutlich ab. Nach einer Behandlungsdauer von 60 Sekunden gingen die Bindungskräfte zwischen dem Beton und dem aufgetragenen Mörtel gegen Null.

3 Konzept der eigenen Untersuchungen, Materialien und Methoden

Aus der Literatur ist bekannt, dass Gipsbaustoffe und Fliesen mikrowellentransparent sind [5]. Die Möglichkeit, dass die Ausbaustoffe selbst an die Mikrowellen ankoppeln und durch die resultierende Erwärmung entfestigt werden, besteht also nicht. Vielmehr sind zusätzliche, mikrowellenaktive Additive in oder auf die Ausbaustoffe zu applizieren, um die angestrebte Trennung zu erreichen. Dafür wurden verschiedene Konzepte entwickelt:

- Für Gipsputze besteht die Option, sie durch die Zugabe von Suszeptoren als mikrowellenaktive Additive so zu verändern, dass ihr Ankoppelungsverhalten verbessert wird (Bild 1, Variante 1). So kann sich der Gipsputz selbst erwärmen und chemisch umwandeln. Dadurch wird er entfestigt und ist anschließend leicht mechanisch abzutragen.
- Die Trennung erfolgt an einer zusätzlich eingebrachten „Schaltschicht“, die sich zwischen dem Gipsputz und dem Untergrund befindet (Bild 1, Variante 2). Diese Schaltschicht muss Suszeptoren enthalten, damit die Mikrowellenabsorption und die Erwärmung genau an der Grenzfläche zwischen Putz und Untergrund eintreten. Die resultierenden thermischen Spannungen müssen die Haftkräfte übersteigen, um die Trennung zu erreichen.
- Für Fliesen bestehen drei Möglichkeiten der Applikation: Das Einbringen der Suszeptoren direkt in den Fliesenkleber oder der Auftrag zusätzlicher Schaltschichten entweder direkt auf den Untergrund, der aus verschiedenen Baustoffen bestehen kann, oder auf die Rückseite der Fliesen. Die Untersuchungen konzentrierten sich auf das Aufbringen von Schaltschichten gemäß der in Variante 3 dargestellten Anordnung.

Unabhängig vom jeweiligen Konzept dürfen die Eigenschaften der Ausbaustoffe und der Verbunde nicht signifikant verändert werden. Die Erwärmung der tragenden bzw. der den Untergrund bildenden Baustoffe selbst sollte möglichst gering sein.

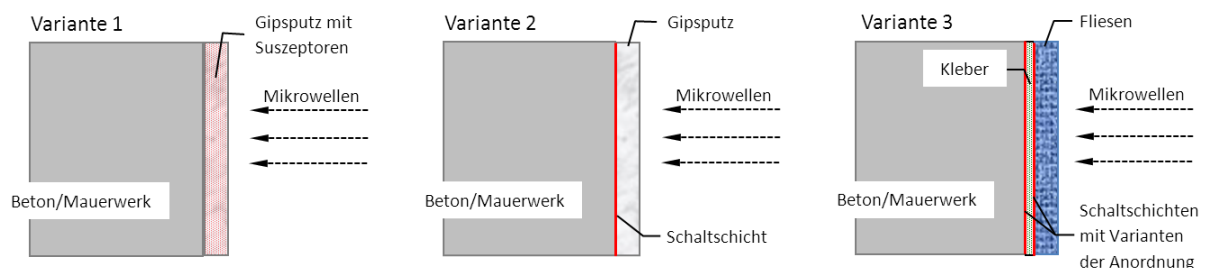


Bild 1: Modellvorstellungen zur Trennung mehrschichtiger Baukonstruktionen

Um die Realisierbarkeit der Modellvorstellungen zu überprüfen, wurden in einem mehrstufigen Programm die Reaktionen von Additiven, handelsüblichen Mörteln, Putzen sowie weiteren Aus- und

Massivbaustoffen auf eine Mikrowellenbestrahlung quantifiziert. Zunächst stand das Ankoppelverhalten aus der Literatur bekannter bzw. aus eigenen Beobachtungen vermuteter Suszeptoren, die sich als Additive für Gipsputze oder für die Schaltschicht eignen könnten, auf dem Prüfstand. Untersuchungen an handelsüblichen Fugenmörteln und Fliesenklebern sowie an unterschiedlichen Massivbaustoffen wie Betone, Ziegel, mineralisch gebundene Wandbaustoffe, Natursteine etc. schlossen sich an. Auf der Grundlage der erzielten Ergebnisse wurden Versuchsmuster aus tragenden, mit Gipsputzen oder Fliesen versehenen Baustoffen hergestellt. Die Kontaktflächen zwischen den Stoffen waren so ausgeführt, dass nach den Ergebnissen der o. g. Untersuchungen eine Trennung zu erwarten war.

Die Bewertung des Ankoppelverhaltens der untersuchten Additive und Baustoffe erfolgte indirekt anhand der Entwicklung der Oberflächentemperatur. Dazu wurden Probekörper mit identischen Abmessungen 40 mm x 40 mm x 160 mm angefertigt und in einer Labormikrowelle mit einer Leistung von 1350 W für insgesamt 20 Minuten in statischer Lagerung behandelt. Der Mikrowellenprozess wurde sowohl hinsichtlich der verwendeten Gerätetechnik als auch der Prozessdurchführung als sogenannter „IAB-Standardprozess“ normiert.

Bei den Untersuchungen der Suszeptoren bestanden die Probekörper aus Dihydrat, das nahezu mikrowellentransparent ist. Dem Baugips als Ausgangsmaterial der Dihydratprismen wurden vor der Herstellung der Prismen (Wasser-Gips-Wert von 0,6) bestimmte Mengen an Suszeptoren zugegeben. Die Prismen lagerten bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte im Labor. Hinsichtlich der Porosität und des Gesamtwassergehalts dürften die Probekörper identisch sein. Variabel sind die Suszeptorart und -menge, deren Einfluss ermittelt werden sollte. Die aus den Fliesenklebern bzw. den Baustoffen hergestellten Prismen wurden vor der Mikrowellenbehandlung bis zur Massekonstanz getrocknet.

Die Versuche zur Trennung mehrschichtiger Stoffverbände der Variante 2 (Bild 1) erfolgten an Platten (150 mm x 150 mm x 40 mm) aus Beton, Kalksandstein, Porenbeton und Ziegel. Darauf wurde die mit einem Suszeptor modifizierte Schaltschicht appliziert, auf die der Gipsputz folgte. Im Falle der Variante 3 wurde die Schaltschicht entweder direkt auf die Platten oder auf die Fliese aufgetragen. Zusätzlich kam hier eine Gipskartonplatte als Träger zum Einsatz. Generell wurden handelsübliche Fliesenkleber verwendet.

Die Temperaturmessung erfolgte diskontinuierlich mittels einer außerhalb der Prozesskammer angeordneten Infrarot-Kamera: in einem zeitlichen Abstand von 60 Sekunden in den ersten 10 Minuten und von 120 Sekunden bis zum Ende der Behandlungsdauer. Sowohl die maximale als auch die mittlere Oberflächentemperatur wurden über die Gesamtprozessdauer erfasst. Die für die exakte Temperaturmessung erforderlichen Emissionswerte der Baustoffe sind der Literatur entnommen.

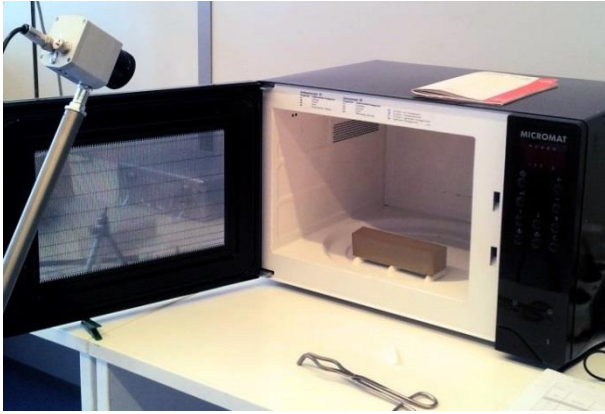


Bild 2: Versuchsaufbau mit Gipsprobekörper

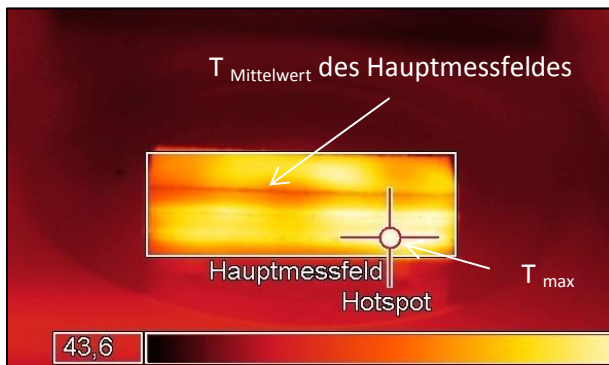


Bild 3: Gemessenes Temperaturfeld mit Markierung der Maximaltemperatur

Zusätzlich zu den Temperaturmessungen wurden der durch die Erwärmung bedingte Masseverlust der untersuchten Prüfkörper und die Rohdichten vor und nach der Behandlung ermittelt.

3 Ergebnisse zum Verhalten der Ausgangskomponenten

3.1 Suszeptoren

Bei den untersuchten Suszeptoren handelt es sich um unterschiedliche Graphite, Graphene, Eisenoxide, Siliciumcarbid und verschiedene Zusätze, von denen auf Grund ihrer Zusammensetzung oder durch Ergebnisse früherer Untersuchungen eine gute Mikrowellenabsorption erwartet wurde. Die Suszeptorzugabe betrug 5 Masse-% mit Ausnahme der Graphene, die wegen ihrer sehr geringen Schüttdichte und ihrer großen inneren Oberfläche teilweise nur in einem Prozentsatz von 0,2 Masse-% zugegeben werden konnten. Aus den Messungen der Oberflächentemperaturen, die als Maß für die Mikrowellenabsorption dienen, ist eine deutliche Differenzierung der Einflüsse der verschiedenen Zusätze abzulesen (Bild 4):

- Die mit Graphiten dotierten Proben erreichen die höchsten Temperaturen von maximal 600 °C. Besonders geeignet ist der Leitfähigkeitsgraphit mit einer mittleren Partikelgröße um 25 µm. Die Blähgraphite bleiben nahezu ohne Wirkung auf die Temperatur.
- Eine Varietät der untersuchten Graphene bewirkt ebenfalls eine Temperaturerhöhung.
- Eine deutliche Erwärmung findet auch bei den mit Magnetit versetzten Prismen statt. Hämatithaltige Prismen liegen im Bereich des Referenzmaterials ohne Suszeptorzugabe.
- Die anderen Zusätze, einschließlich des SiC, bleiben ohne Wirkung.

Der Einfluss der Zusatzmenge auf die Oberflächentemperaturen ist für den Leitfähigkeitsgraphit im Bild 5 dargestellt. Danach reicht eine Zugabemenge von 4 bis 5 Masse-% aus, um hohe Temperaturen zu erreichen. Die Steigerung auf 10 Masse-% führt zu keinem weiteren Anstieg.

Der in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur auftretende Masseverlust nimmt mit steigender Temperatur stetig zu (Bild 6). Er ist auf die Entwässerung des Dihydrats, aus dem die Probekörper bestanden, zurückzuführen. Die vollständige Entwässerung wird bei Temperaturen von 400°C bis 500 °C erreicht. Der gemessene Masseverlust entspricht in etwa dem Kristallwassergehalt des Dihydrats.

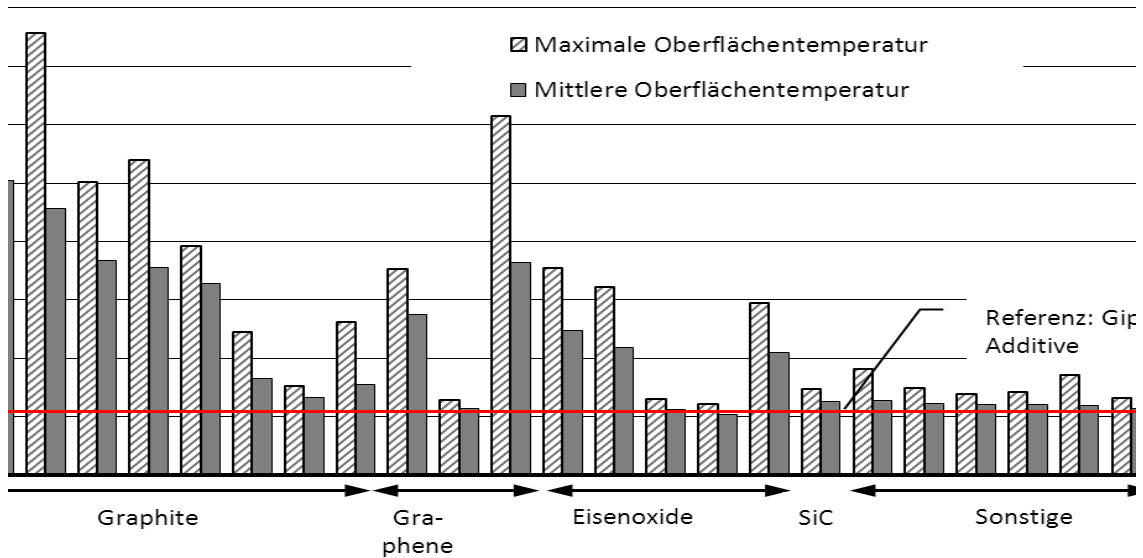


Bild 4: Übersicht über die Wirkung verschiedener Additive bei einer Dosierung von 5 Masse-%

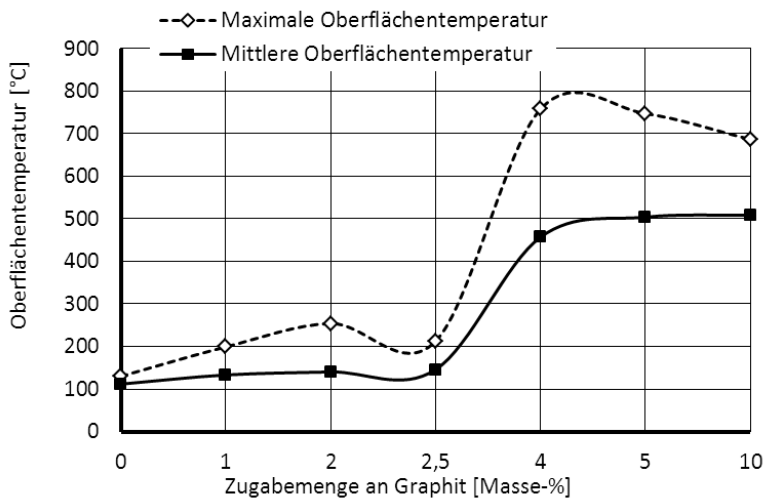


Bild 5: Abhängigkeit der Oberflächentemperatur von der Dosierung des Suszeptors

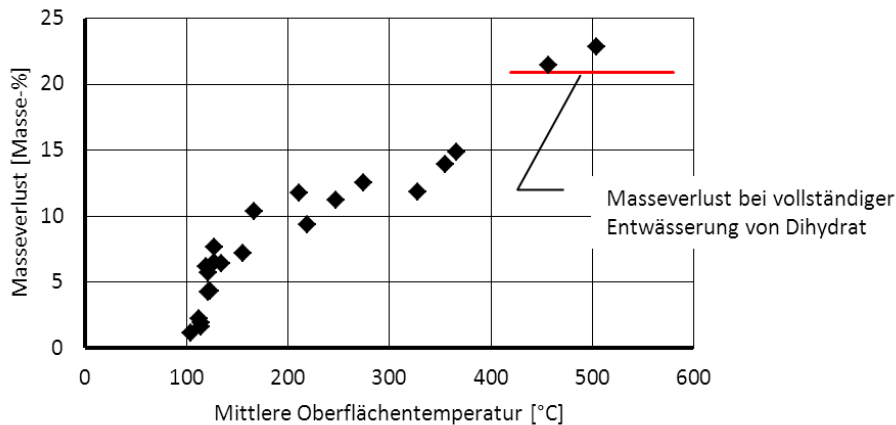


Bild 6: Abhängigkeit des Masseverlusts der mit Additiven versetzten Dihydratprobekörper von der Oberflächentemperatur

Infolge der Entwässerung kommt es zu einem Festigkeitsverlust der Probekörper bis hin zur völligen Zerstörung. Allerdings ist die erforderliche Behandlungsdauer mit bis zu 20 Minuten relativ hoch.

3.2 Wandbaustoffe und Natursteine

Bei den untersuchten Materialien gibt es erhebliche Unterschiede im Verhalten bei der Mikrowellenbehandlung. Die Hartbrandziegel, der Basalt und der Granit erwärmen sich stark, wohingegen sich Weichbrandziegel, Kalksandstein, Porenbeton, Betone, mit Ausnahme des haufwerksporigen Betons, Fliesen und Terrakotta sowie die beiden untersuchten Sandsteine nur wenig erwärmen (Bild 7). Parallel dazu sind die Differenzen zwischen der maximalen und der mittleren Oberflächentemperatur bei den sich stark erwärmenden Baustoffen deutlich höher als bei den sich wenig erwärmenden Materialien (Bild 8). Vereinfacht betrachtet können die untersuchten Baustoffe in zwei Gruppen unterteilt werden. Bei Gruppe 1 bleibt die Temperaturdifferenz unter 100 K, bei Gruppe 2 beträgt sie mehr als 100 K. Der Beton, der aus einer Gehwegplatte geschnitten wurde, nimmt eine Zwischenstellung ein.

Der Masseverlust infolge Mikrowellenbehandlung ist ebenfalls sehr unterschiedlich (Bild 9). Die Baustoffe, die gebundenes Wasser in ihrer Struktur enthalten, geben dieses bei der Erwärmung ab. Die Materialien, die bei ihrer Herstellung bzw. Genese bereits hohen Temperaturen ausgesetzt waren, verlieren kaum an Masse. Eine Grenze könnte hier bei 0,5 % gezogen werden.

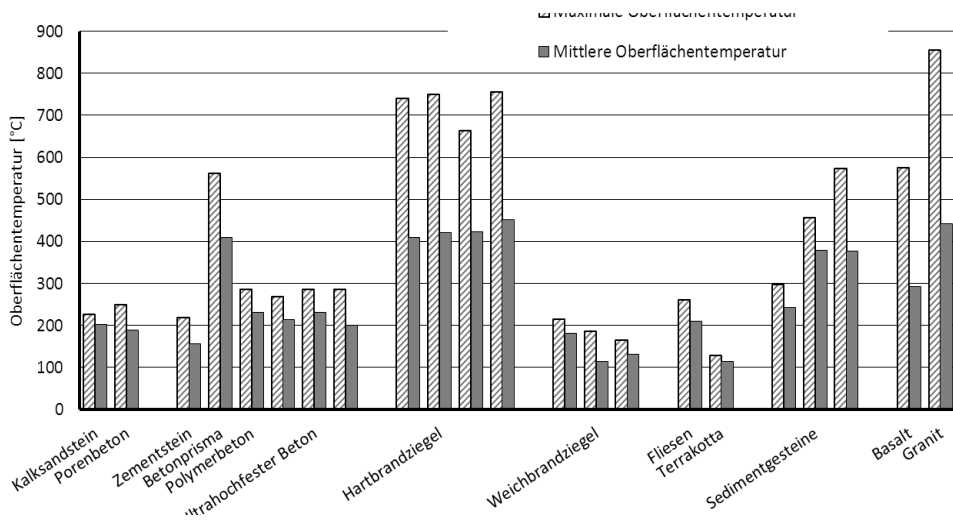


Bild 7: Übersicht zur Erwärmung verschiedener Baustoffe bei Mikrowellenbehandlung (Betonprisma aus Gehwegplatte geschnitten, Sandstein 1 – kieselig gebunden, Sandstein 2 - kalkgebunden)

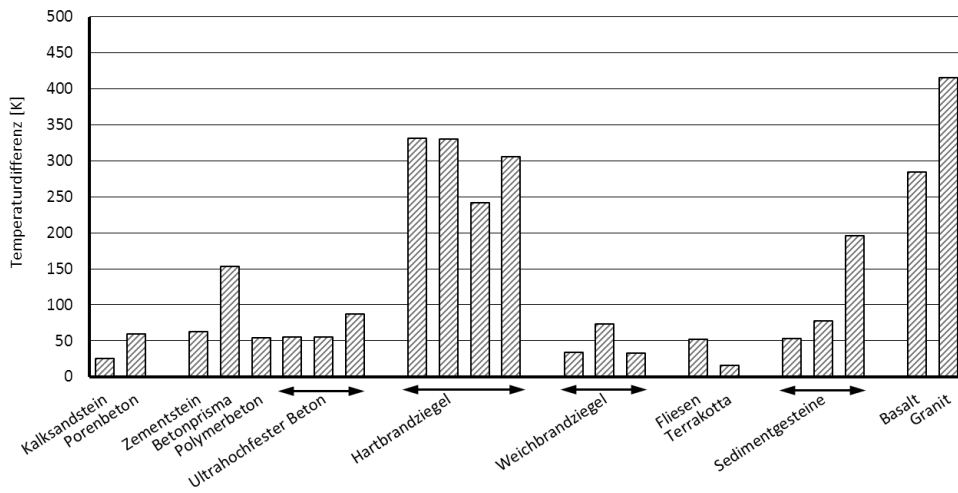


Bild 8: Differenzen zwischen der maximalen und der mittleren Oberflächentemperatur verschiedener Baustoffe bei Mikrowellenbehandlung

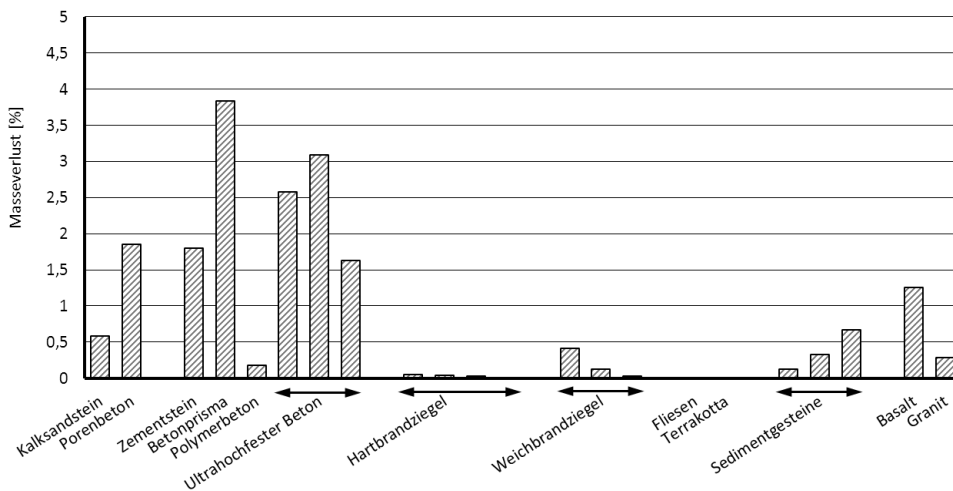


Bild 9: Masseverlust der Materialien infolge Mikrowellenbehandlung

In der Literatur werden verschiedene Arten des Versagens, die bei der Behandlung von Gesteinen oder Betonen in der Mikrowelle wirken, beschrieben [4], [5]. Einerseits kommt es zu einer inhomogenen Erwärmung zwischen Kern und Materialoberfläche und zusätzlich zwischen Bestandteilen mit unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften. Andererseits kann die Erwärmung zu Zersetzungsprozessen im Probeninneren führen, bei denen Gase – vorzugsweise Wasserdampf, aber auch Kohlendioxid – entstehen. Die Temperaturdifferenzen können als Maß für die inhomogene Erwärmung, die bei einer Mikrowellenbehandlung typischerweise auftritt [6], angesehen werden. Im Fall der Entstehung gasförmiger Zersetzungsprodukte wirken diese nur dann zerstörend, wenn ein dichtes Gefüge vorliegt, aus dem das Gas nicht entweichen kann. Beide Vorgänge verursachen Spannungen, die zu einem Versagen führen können. Bei den Hartbrandziegeln, dem Basalt und dem Granit könnte die inhomogene Erwärmung als Ursache für das Versagen angesehen werden, da bei diesen Materialien eine Rissbildung auftrat. Zusätzlich war in einigen Fällen eine vollständige Schmelzphasenbildung im Kern der Baustoffe zu beobachten, in deren Folge sich ein Hohlraum bildete. Der Kalkstein ist ein Beispiel für die Entstehung von gasförmigen Zersetzungsprodukten. Bei maximalen Oberflächentemperaturen von 570 °C können im Probeninneren durchaus Temperaturen um 700 °C vorliegen, so dass die Zersetzung von Calcit beginnt. Die beobachtete Rissbildung deutet auf diesen Schadensmechanismus hin. Der gemessene Masseverlust ist allerdings vergleichsweise gering. Weitere Beispiele sind der Zementstein und die Betone, bei denen infolge der Erwärmung ein Teil des chemisch gebundenen Wassers freigesetzt wird. Bei den sehr dichten, ultrahochfesten Betonen führt das zu einem explosiven Versagen, weil der Wasserdampf nicht entweichen kann. Dagegen bieten der Zementstein und der Beton aus der Gehwegplatte aufgrund ihrer hohen Porosität ausreichend Ausweichmöglichkeiten für den Wasserdampf.

3.3 Trennung von mehrschichtigen Baukonstruktionen

Die Entfernung von Gipsputz auf einem tragenden Untergrund ist nach den vorliegenden Ergebnissen vergleichsweise einfach möglich, wenn der Gipsputz durch die Zugabe eines Suszeptors modifiziert wird, wie in Bild 1 als Variante 1 dargestellt. Beim Einsatz der schwarzen Graphite als Additive tritt eine starke Überfärbung des weißen Putzes auf. Ob graue bis schwarze Gipsputze von den Gipsherstellern bzw. Endanwendern toleriert würden, ist fraglich.

Die zweite Variante der Abtrennung eines Gipsputzes vom Untergrund stellt das Aufbringen der Schaltschicht dar, welche die Aufgabe einer Sollbruchstelle bei der Mikrowellenbeanspruchung übernimmt. Bei dieser Variante wird die Farbe des Gipsputzes nicht verändert. Für alle untersuchten Probekörper konnte ein Trennerfolg nachgewiesen werden. Nur geringe Mengen an Gipsputz, höchstens 20 %, verblieben auf dem Untergrund und konnten durch eine nochmalige Behandlung ebenfalls abgetrennt werden. Die Behandlungsdauer für die vollständige Abtrennung betrug in Abhängigkeit vom Wandbaustoff im Mittel 100 Sekunden für den Gips-Hochlochziegel-Probekörper und 660 Sekunden für den Gips-Beton-Probekörper. Die Ursachen dieser zeitlichen Differenzen könnten neben unterschiedlichen Haftzugfestigkeiten der Verbünde auch in der differentiellen Absorption der eingestrahlten Energie durch die Wandbaustoffe selbst liegen.

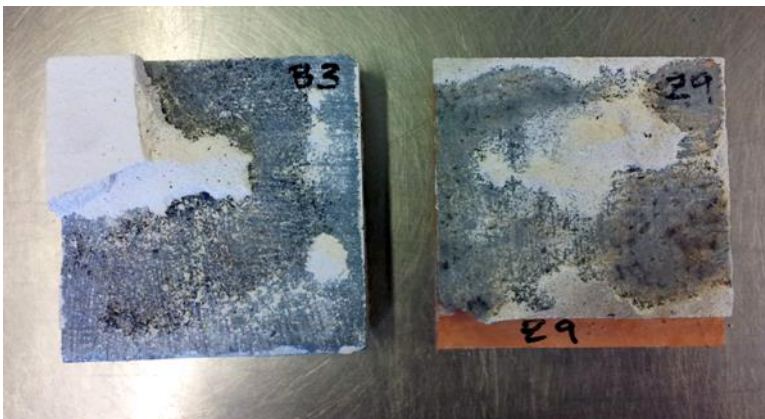


Bild 10: Probekörper mit Gipsputz vor (oben) und nach der Mikrowellenbehandlung (unten)

Bei den Untersuchungen zur Entfernung der Fliesen konnte ebenfalls ein Trennerfolg für alle untersuchten Varianten nachgewiesen werden, unabhängig davon ob sich die Schaltschicht direkt auf dem Baustoff oder auf der Fliese befand. Es wurde eine vollständige und glatte Trennung mit einem hörbaren akustischen Geräusch erzielt. Die notwendige Behandlungsdauer lag im Mittel zwischen 62 und 76 Sekunden. Von den Referenzprobekörpern ohne Suszeptorzugabe war ein Abtrennen der Fliesen nicht möglich.



Bild 11: Probekörper mit Fliesen vor (oben) und nach der Mikrowellenbehandlung (unten)

4. Zusammenfassung und Ausblick

Materialverbunde, wie sie in modernen Gebäuden auftreten, stellen eine wesentliche Grundlage für innovative Werkstoffe dar und können das Recycling von Bau- und Abbruchabfällen erschweren. In experimentellen Untersuchungen sollte deshalb überprüft werden, inwieweit eine Mikrowellenbehandlung geeignet ist, solche Verbunde zu trennen. Als Untersuchungsgegenstand wurden auf Betonen oder Wandbaustoffen aufgetragene Gipsputze sowie Fliesen gewählt. Eine zwischen den tragenden Baustoffen und den Ausbaustoffen angeordnete Schaltschicht absorbiert die Mikrowelle und wird dadurch erwärmt. In einem mehrstufigen Versuchsprogramm wurde ermittelt, dass sich bestimmte Graphite gut für die Realisierung einer derartigen Schaltschicht eignen. Bei den Untersuchungen zur Abtrennung des Putzes kamen diese Graphite zum Einsatz. Nach deren Applikation auf der Wandoberfläche erfolgte der Putzauftrag. Bei den Fliesen wurde die Schaltschicht entweder direkt auf den Untergrund oder auf die Oberfläche des Fliesenklebers appliziert. Bei allen so präparierten Versuchsmustern konnte der Ausbaustoff durch eine Mikrowellenbehandlung vom

Untergrund getrennt werden. Bei Versuchsmustern ohne Schaltschicht wurde keine Trennung erreicht.

Untersuchungen in einer „In-plant“-Demonstratoranlage bestätigten die Laborergebnisse in vollem Umfang. Der Gipsputz löste sich in groben Bruchstücken von den Wandbaustoffen, die selbst unbeschädigt blieben, ab. Die Fliesen verloren ebenfalls die Haftung zum Untergrund und wurden nur noch vom Fugenmörtel in ihrer Position gehalten. Die Fliesenuntergründe blieben unbeschädigt. Als nächste Forschungsaufgaben stehen die Entwicklungen weiterer Rezepturen für die Schaltschicht und der Aufbau eines „In-place“-Demonstrators, der sich für den direkten Einsatz in Gebäuden eignet, im Mittelpunkt der Entwicklung.

Das Projekt wird im Rahmen der BMBF-Maßnahme „r³“ – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien gefördert. Projektpartner sind die Bauhaus-Universität Weimar, das F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Weimar, das Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT Pfinztal, die Baunit GmbH, Bad Hindelang, die AMG GRAPHITE/Graphit Kropfmühl GmbH, Hauzenberg und die MUEGGE GmbH, Reichelsheim.

Weitere Informationen zum Projekt unter www.r3-innovation.de/de/16095.

5. Literatur

- [1] Debonding on Demand. Bericht zum Verbundvorhaben. Förderkennzeichen PB 2090. Teltow 2009.
- [2] Leijonmarck, S.: Electrically Induced Adhesive Debonding. Licentiate Thesis. Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm 2010.
- [3] Buttress, A. J.; Jones, A.; Sam Kingman, S. W.: Microwave processing of cement and concrete materials – towards an industrial reality? Cement and Concrete Research Vol. 68 (2015), pp.112–123.
- [4] Lippiat, N.: Investigation of fracture porosity as the basis for developing a concrete recycling process using microwave heating. Thesis, Université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse. 2013.
- [5] Haque, K. E.: Microwave energy for mineral treatment processes —a brief review. Int. J. Miner. Process. Vol. 57 (1999), pp. 1–24.
- [6] Peinsitt, T.; Kuchar, F.; Hartlieb, P.; Moser, P.; Kargl, H.; Restner, U.; Sifferlinger, N. A.: Microwave heating of dry and water saturated basalt, granite and sandstone. Int. J. of Mining and Mineral Engineering, Vol.2 (2010), No.1, pp.18–29.
- [7] Hartlieb, P.; Leindl, M.; Kuchar, F.; Antretter, T.; Moser, P.: Damage of basalt induced by microwave irradiation. Minerals Engineering, Vol. 31 (2012) pp. 82–89.
- [8] Meisels, R.; Toifl, M.; Hartlieb, P.; Kuchar, F.; Antretter, T.: Microwave propagation and absorption and its thermo-mechanical consequences in heterogeneous rocks. International Journal of Mineral Processing 135 (2015), pp. 40–51.

- [9] Jerby, E.; Meir, Y.; Faran, M.: Basalt Melting by Localized-Microwave Thermal-Runaway Instability. 14th International Conference on Microwave and High Frequency Heating, AMPERE-2013. Nottingham, UK, September 2013.
- [10] Chen, T. T.; Dutrizac, J. E.; Haque, K. E.; Wyslouzil, W.; Kashyap, S.: Relative transparency of minerals to microwave radiation, *Canadian Metallurgical Quarterly*, 23(3), (1984), pp. 349–351.
- [11] Kingmann, S. W.; Rowson, N. A.: Microwave treatment of minerals – a review. *Minerals Engineering*, Vol. 11 (1998), No. 11, pp. 1081–1087.
- [12] Kingman, S. W.; Vorster, W.; Rowson, N. A.: The influence of mineralogy on microwave assisted grinding. *Minerals Engineering*, Vol. 13 (2000), No. 3, pp. 313–327.
- [13] Kingman, S. W.: Recent developments in microwave processing of minerals. *International Materials Review*. February 2006.
- [14] Kingman, S. W.; Jackson, K.; Bradshaw, S. M.; Rowson, N. A.; Greenwood, R.: An investigation into the influence of microwave treatment on mineral ore comminution. *Powder Technology* 146 (2004), pp. 176–184.
- [15] Yasunaka, H. et al: Microwave irradiation technology for contaminated concrete surface. *Demolition and Reuse of Concrete and Masonry*, Chapman & Hall, London, 1988, S. 280–289.
- [16] Gerlach, I. et al.: Removal of gypsum plaster by use of microwave. *Proceedings of the International Conference “Sustainable Concrete Construction”* held at the University of Dundee, 9.–14. Sept. 2002.
- [17] Melcher, A.; Umminger, M.; Kayser, T.; Link, G.; Haist, M.; Müller, H. S.; Jelonnek, J.: Microwave-Assisted Ablation of Contaminated Concrete Surfaces – Modeling, Simulation and Experiments. 14th Seminar Computer Modeling in Microwave Engineering & Applications, Bayreuth, Germany, March 5–6, 2012.
- [18] Buttress, A. J.; Jones, D. A.; Dodds, C.; Dimitrakis, G.; Campbell, C. J.; Dawson, A.; Kingman, S.W.: Understanding the scabbling of concrete using microwave energy. *Cement and Concrete Research* Vol. 75 (2015), pp. 75–90.
- [19] Akbarnezhad, A.: Microwave Assisted Production of Aggregates from Demolition Debris. Thesis submitted for the Degree of Doctor of Philosophy. Department of Civil Engineering National University of Singapore. 2010.
- [20] Akbarnezhad, A.; Ong, K. C. G.; Zhang, M. H.; Tam, C. T.; Foo, T. W. J.: Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials* Vol. 25 (2011), pp. 3469–3479.

- [21] Bru, K.; Touzé, S.; Bourgeois, F.; Lippiatt, N.; Ménard, Y.: Assessment of microwave-assisted recycling process for the recovery of high-quality aggregates from concrete waste. *International Journal of Mineral Processing* Vol. 126 (2014), pp. 90–98.
- [22] Noguchi, T.; Kitagaki, R.; Nagai, H.; Tsujino, M.: Completely recyclable concrete of aggregate-recovery type by using microwave heating technology. 2nd International RILEM Conference on Progress of Recycling in the Built Environment. RILEM Publications SARL 2011, pp. 333–343.
- [23] Choi, H.; Lim, M.; Choi, H.; Kitagaki, R.; Noguchi, T.: Using Microwave Heating to Completely Recycle Concrete. *Journal of Environmental Protection*, 2014, No. 5, pp. 583–596.
- [24] Jaecheol A.: Microwave dielectric heating to disassemble a modified cementitious joint. *Materials and Structures* Vol. 46 (2013), pp. 2077–2090.
- [25] Pejman Nekoovaght Motlagh: An investigation on the influence of microwave energy on basic mechanical properties of hard rocks. Master Thesis. Concordia University Montreal, 2009.
- [26] Meisels, R.; Toifl, M.; Hartlieb, P.; Kuchar, F.; Antretter, T.: Microwave propagation and absorption and its thermo-mechanical consequences in heterogeneous rocks. *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 135 (2015), pp. 40–51.