

## Verwertungspotential von elektrodynamisch aufbereitetem Altbeton

Sebastian Dittrich, Volker Thome, Severin Seifert und Anna-Lena Höhn

1.	Prinzip der Elektrodynamischen Fragmentierung.....	632
2.	Elektrodynamische Fragmentierung von Altbeton.....	633
3.	Frischbetonherstellung aus recyceltem Altbeton.....	634
4.	Herstellung von Porenbeton aus recyceltem Altbeton.....	635
5.	Verwendung von recyceltem Altbeton zur Herstellung von Zement.....	636
6.	Ausblicke.....	637
7.	Literatur.....	638

Beton ist nach Wasser das gewichtsmäßig am meisten verwendete Produkt weltweit. Allein in Deutschland wurden im Jahr 2013 knapp 45,6 Millionen Kubikmeter Transportbeton produziert (BTB, 2014). Hinzu kommen Fertigbetonteile und Ortbeton. Da sich Beton auf Grund flexibler Formgebungsmöglichkeiten seit Jahren steigender Beliebtheit im Gebäudebau erfreut, steigt auch die Menge an Abrissmaterial stetig an. 2010 fielen in Deutschland 53,1 Millionen Tonnen Altbeton an [8]. Ein Recycling dieser Materialströme ist schon aus ökologischer Sicht sinnvoll, um den Platzbedarf für Bauschuttdeponien zu minimieren. Stand der Technik sind mechanische Aufbereitungsverfahren wie Brechen und Mahlen. Der entstehende Schotter wird zum großen Teil im Unterbau von Straßen eingesetzt, ein kleinerer Teil wird als sekundäre Gesteinskörnung bei der Herstellung von Beton genutzt [5]. Zuletzt wurden in Deutschland 800.000 t/a recycelte Gesteinskörnung verwertet. Üblicherweise wird eine Kombination aus recycelter und natürlicher Gesteinskörnung eingesetzt. Daraus ergibt sich eine jährliche Menge von 1,2 Millionen Kubikmeter Recyclingbeton. Ein echtes Recycling, also der Wiedereinsatz von Altbeton in der Frischbetonherstellung erfolgt somit nur sehr untergeordnet. Deshalb findet aktuell mehr Down- als Recycling statt. Ein effizientes Recycling liegt vor, wenn die einzelnen Bestandteile des Verbundwerks Beton selektiv aufgetrennt und somit separat bzw. entsprechend ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften einer Wiederverwendung zugeführt werden können.

Den Aspekt der selektiven Auftrennung verfolgt die Technologie der elektrodynamischen Fragmentierung. Dadurch ist es möglich einzelne Komponenten von Verbundmaterialien wie Altbeton nach der Fragmentierung sortenrein abzutrennen. Dadurch entstehen neue Ansatzmöglichkeiten für das Recycling von Altbeton.

## 1. Prinzip der Elektrodynamischen Fragmentierung

Das Funktionsprinzip der elektrodynamischen Fragmentierung beruht auf der physikalischen Grundlage, dass der Widerstand eines Materials gegen Spannungsdurchschlag keine Konstante ist. Nach Bluhm et al. [2] bestimmt die Anstiegszeit der Spannung bis zur Impulsabgabe, vereinfacht gesagt die Pulsdauer den Wert der Durchschlagsfestigkeit (Bild 1). Für eine Pulsdauer  $< 500$  ns ist diese für Wasser größer als für die meisten

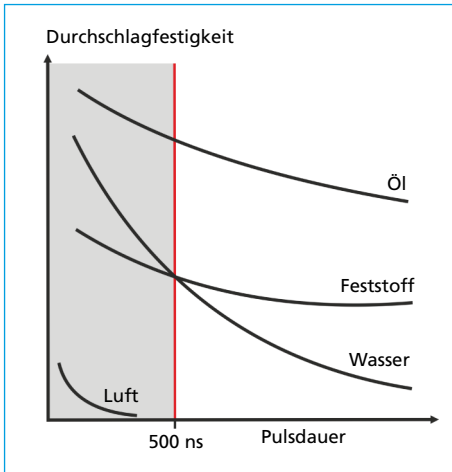


Bild 1: Elektrische Durchschlagsfestigkeit von verschiedenen Materialien in Abhängigkeit von der Pulsdauer der Entladung

Modifiziert nach: Bluhm, H.; Frey, W.; Giese, H.; Hoppé, P.; Schultheiß, C. und Sträßner, R.: Application of pulsed HV discharges to material fragmentation and recycling. In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, Nr. 5, 2000, S. 625 – 635

Eigenschaften besitzen, sind die Phasengrenzen der einzelnen Partikel die Bereiche mit den größten Polarisationsunterschieden. Somit stellen die Phasengrenzen den Weg des geringsten Widerstandes für den Stromfluss dar.

Solange noch kein Stromfluss erfolgt baut sich an der Kathode ein Energiepotential auf, das in Form von sogenannten Funkenentladungen entlang der Phasengrenzen in das Material vordringt. Dabei wird das Material bereits vorgeschwächt. Die Funkenentladungen verästeln sich immer weiter bis einer der Äste die Gegenelektrode erreicht und es zum elektrischen Durchschlag kommt. Dabei wird die gesamte Energie des Impulses in diesem einen Ast deponiert wodurch sich ein extrem kurzlebiger Plasmakanal ausbildet. Die Ausdehnung des Plasmakanals erzeugt eine Explosion mit einer Druckwelle von 9 bis 10 GPa, wobei kurzfristig Temperaturen von  $10^4$  K erreicht werden. Die entstehende Druckwelle durchdringt das gesamte Material, wird an der Gefäßwand reflektiert und penetriert das Material ein weiteres Mal in Form einer Kompressionswelle. Dieser Ablauf findet bei jedem einzelnen abgegebenen Impuls statt, so dass eine schnelle und effektive Auftrennung des Materials erreicht wird.

Feststoffe. Wenn also ein Feststoff unter Wasser zwischen zwei Elektroden platziert wird, verläuft der elektrische Impuls bei einer Pulsdauer  $< 500$  ns von der Kathode durch den Feststoff zur Anode. Somit können hochenergetische elektrische Impulse kontrolliert durch festes Material wie z.B. Altbeton geleitet werden.

Wenn zwischen den Elektroden eine Spannung angelegt wird bildet sich in Abhängigkeit der Elektrodengeometrie ein inhomogenes elektrisches Feld aus. Dies führt zu einer Polarisierung des Materials im Gesamten als auch der Einzelkomponenten, aus welchen der Verbund besteht. Da die Ladungsträger im Festkörper nicht frei beweglich sind kommt es durch die Polarisierung zu Spannungen innerhalb des Materials. Dieses Phänomen wird als Elektrostriktion bezeichnet und begünstigt die spätere Auftrennung. Weil die einzelnen Phasen innerhalb des Verbundmaterials unterschiedliche dielektrische

Der besondere Vorteil gegenüber mechanischer Aufbereitung wie Brechen liegt in der selektiven Auftrennung, da die Trennenergie exakt entlang von Korn- bzw. Phasengrenzen aufgebracht wird (Bild 2). Dadurch finden sich nach der elektrodynamischen Fragmentierung kaum noch Anhaftungen an den einzelnen Bestandteilen, wohingegen nach dem Brechen sehr häufig Nebenbestandteile am Material anhaften.

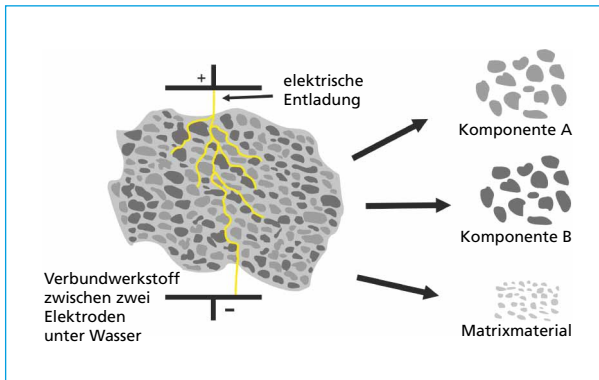


Bild 2:

Prinzip der elektrodynamischen Fragmentierung eines Verbundwerkstoffes

Da mit Hilfe der elektrodynamischen Fragmentierung Verbundmaterialien sortenrein in die einzelnen Bestandteile zerlegt werden können, erforscht die Arbeitsgruppe Betontechnologie und funktionale Baustoffe am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP den Einsatz dieser Technologie als Aufbereitungsmethode zum Recycling von verschiedenen Abfallströmen. Dabei spielt vor allem die Verwendung von recyceltem Material, für welches momentan nur sehr untergeordnet Verwertungsmöglichkeiten vorliegen, bei der Herstellung von Baustoffen eine zentrale Rolle.

## 2. Elektrodynamische Fragmentierung von Altbeton

Im Frischbeton werden je nach Angebot und Standort im Wesentlichen quarzreiche oder kalksteinreiche Zuschläge verwendet. Der verwendete Zement richtet sich je nach Einsatzgebiet und Anforderungen an das Bauteil. In dieser Studie wurden zwei Betonmischungen aus Portlandzement CEM I und Zuschlag (Quarkies und Kalksteinsplitt) untersucht. Ein Teil wurde mittels elektrodynamischer Fragmentierung aufbereitet und der andere Teil mechanisch zerkleinert, was als Vergleichsprobe diente. Bei der Anwendung der elektrodynamischen Fragmentierung auf Altbeton reichen bereits wenige Impulse aus um eine ausreichend gute selektive Auftrennung in die einzelnen Komponenten zu erhalten [7].

Für die weitere Verwendung des getrennten Materials ist eine Siebung notwendig. In unserem Fall erfolgte ein Siebschnitt bei 2 mm was letztendlich zu drei verschiedenen Fraktionen führte: Eine Grobfraction > 2 mm hauptsächlich bestehend aus Kieszuschlag und eine Feinfraction als ein Gemisch aus Zementstein und Zuschlagssand. Die dritte Fraktion wird als Filtrat aus dem sedimentierten Anteil des Prozesswassers gewonnen.

Bereits bei der Abtrennung der Grobfraction zeigt sich, dass je nach Aufbereitungsmethode eine unterschiedliche Sieblinie vorliegt. Während nach der mechanischen Aufbereitung lediglich Körner im Bereich 2 bis 8 mm vorlagen, deckte das Material nach der elektrodynamischen Fragmentierung das gesamte Spektrum von 2 bis 32 mm ab. Diese Sieblinie ist vergleichbar mit einer zur Herstellung von Frischbeton verwendeten Sieblinie.

### 3. Frischbetonherstellung aus recyceltem Altbeton

Um die Eignung der Grobfraction als Zuschlag für die Frischbetonherstellung zu untersuchen, wurden aus dem recycelten Material neue Betonproben hergestellt und auf ihre Frischbetoneigenschaften als auch auf ihre Festigkeit hin untersucht. Dabei zeigt sich, dass zur Einstellung einer vergleichbaren Viskosität zur Referenzmischung im Falle des mechanisch gebrochenen Zuschlags eine erheblich erhöhte Dosierung von Fließmittel notwendig ist. Im Falle des elektrodynamisch aufbereiteten Materials ist nur eine minimale Anpassung der Fließmittelmenge notwendig (Bild 3). Vergleicht man die Werte für die Druckfestigkeiten (Bild 4) so wird klar, dass alle Proben mit recyceltem Material gleiche oder höhere Werte als die Referenzprobe erreichen. Weitere Tests hinsichtlich der Einwirkung von Chloriden, der Karbonatisierungstiefe und der Frost-Tau-Wechselbeständigkeit von Beton bestätigen, dass durch den Einsatz von recycelten Zuschlägen im Frischbeton keinerlei Nachteile für die Frisch- und Festbetoneigenschaften entstehen. Im Falle der mechanisch aufbereiteten Zuschläge muss jedoch gesagt werden, dass der Einsatz nur bedingt sinnvoll erscheint, da zum einen der Bedarf an Fließmittel signifikant erhöht und zum anderen die Verarbeitbarkeit des Frischbetons negativ beeinflusst wird.

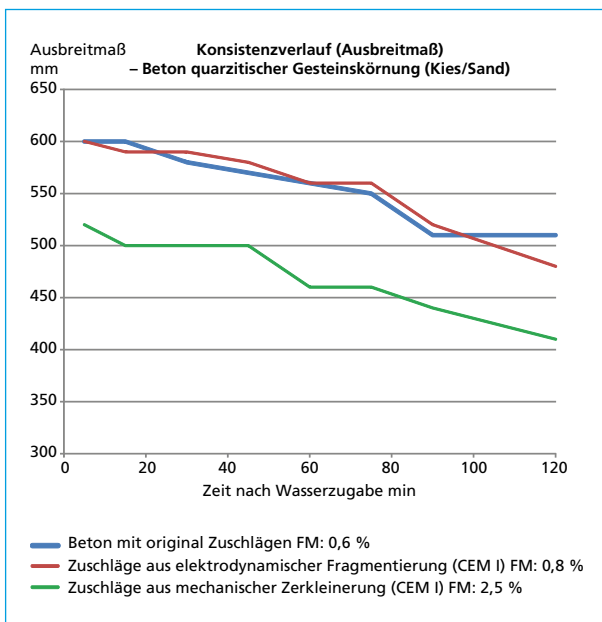


Bild 3:

Ausbreitmaß in Abhängigkeit von Fließmittel und eingesetzter Zuschlagsqualität

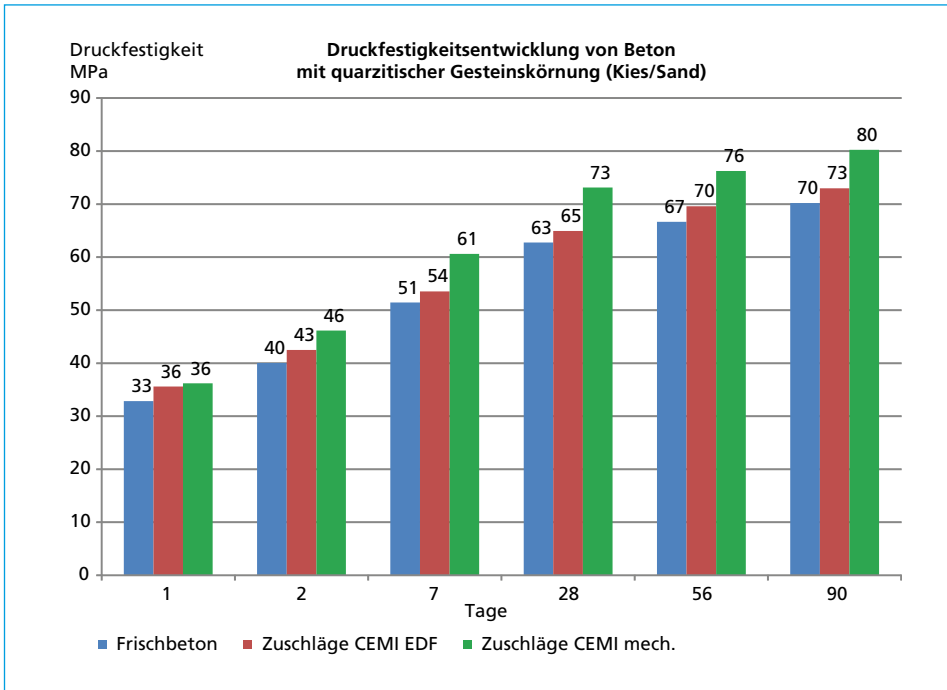


Bild 4: Druckfestigkeitswerte in Abhängigkeit von eingesetzter Zuschlagsqualität

#### 4. Herstellung von Porenbeton aus recyceltem Altbeton

Eine weitere Verwendungsmöglichkeit für die nach der elektrodynamischen Fragmentierung anfallende  $\text{SiO}_2$ -haltige Feinfraktion ( $< 2 \text{ mm}$ ) ist die Herstellung von Porenbeton. Dieser stellt ein komplexes System aus Quarzsand, Quarzmehl, Kalksteinmehl, Kalk, Anhydrit und Zement dar welches nach dem Anrühren mit Wasser unter Zugabe eines Schäumungsmittels aufgetrieben wird. Nach Erreichen der sogenannten

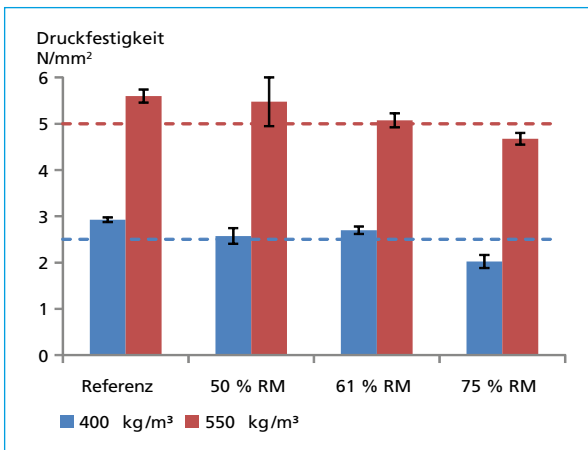


Bild 5:

Druckfestigkeiten von Porenbeton in Abhängigkeit der zugegebenen Menge an recyceltem Zuschlagmaterial, gestrichelte Linien repräsentieren die jeweils gültige Festigkeitsklasse

Grünstandsfestigkeit wird der Grünling autoklaviert, um die endgültige Festigkeit zu erreichen. Das Recyclingmaterial kann genutzt werden um einen Teil des üblicherweise verwendeten Quarzsandes zu ersetzen. Es wurden zwei unterschiedliche Chargen von Porenbeton mit handelsüblichen Rohdichten von  $400 \text{ kg/m}^3$  und  $550 \text{ kg/m}^3$  hergestellt. Nach dem Autoklavieren der Grünlinge wurde die Druckfestigkeit der Steine gemessen. Dabei existieren in Abhängigkeit der Rohdichte mehrere Festigkeitsklassen, welche eine bestimmte mittlere Druckfestigkeit vorschreiben, damit ein Stein als tragender Baustoff eingesetzt werden darf. Es zeigt sich, dass in beiden Rohdichteklassen ein Einsatz von bis zu 61 Ma.-% an recyceltem Material verwendet werden kann, um diese Regelwerte einzuhalten (Bild 5). Bei höheren Dosierungen verringern sich die Werte für die Druckfestigkeiten.

Dies hat mit der Ausbildung kristalliner Phasen in unterschiedlichen Mengenverhältnissen während des Autoklavierprozesses zu tun. Dabei wird mit steigender Menge an recyceltem Quarzsandmaterial das Verhältnis kristalliner Phasen von Tobermorit ( $5\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) und Anhydrit zu Hydroxylellestadit ( $\text{Ca}_{10}(\text{SiO}_4)_3(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_2$ ) verschoben. Größere Ausbildungen von Hydroxylellestadit-Nestern (Bild 6) wirken sich negativ auf die Festigkeiten im Endprodukt Porenbeton aus [4].

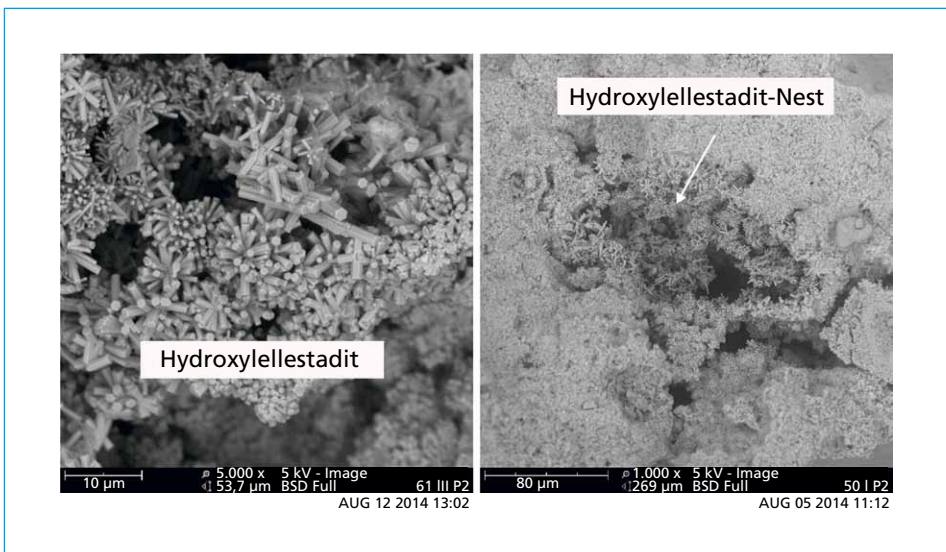


Bild 6: Hydroxylellestadit (links) auf einem Porensteg im erhärteten Porenbeton (rechts)

## 5. Verwendung von recyceltem Altbeton zur Herstellung von Zement

Das Prozesswasserfiltrat besteht im Wesentlichen aus einer wässrigen Suspension, welches feine Calcium-Silikate aus zerkleinertem Zementstein enthält. Es wurde in dem Projekt untersucht, inwieweit das Filtrat für die Herstellung von neuem Zement verwendet werden kann. Nachdem die Kornfeinheit der Fraktion entsprechend den

Anforderungen an die Zementherstellung angepasst wurde, erfolgte eine chemische Analyse. Auf Grundlage dieser Analyse wurde mit den in der Zementherstellung üblichen Verfahren Kalkstandard, Silikat- und Tonerdemodul berechnet. Diese geben über das Verhältnis einzelner Oxide die chemische Zusammensetzung des Zements vor und müssen entsprechend eingestellt werden. Auf diese Art und Weise konnte eine optimierte Rohmehlzusammensetzung gefunden werden. Anschließend wurde aus dem Rohmehl ein Klinker gebrannt, wobei Brenndauer und Temperatur an die industrielle Zementherstellung angepasst wurden. Nach dem Brennprozess wurden die Klinkerkörner wiederum chemisch/mineralogisch untersucht. Die Elementanalyse unter dem Elektronenmikroskop (Bild 7) zeigt, dass die Phasenzusammensetzung eines technischen Portlandzementes nachgestellt werden konnte. Dieser Prozess ist ebenso auf die Feinfraktion anwendbar. Auf diese Weise kann gezeigt werden, dass aus Altbeton wieder qualitativ hochwertiger Zement hergestellt werden kann.



Bild 7:

REM-Aufnahme mit EDX Elementmapping des aus Filtrat gebrannten Klinkers

## 6. Ausblicke

Durch die elektrodynamische Fragmentierung kann Altbeton derart selektiv aufgetrennt werden, dass es möglich ist den Zuschlag ohne weitere Behandlung direkt bei der Frischbetonherstellung wieder einzusetzen. Die Fraktionen kleiner als zwei Millimeter können zum einen bei der Herstellung von Porenbeton oder zur Produktion von neuem Zement verwendet werden. Damit konnte erstmals ein vollständiges Recyclingpotential für Altbeton nachgewiesen werden. Um die vollständige Verwertung von Altbeton im industriellen Maßstab wirtschaftlich verwirklichen zu können sind jedoch noch weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten nötig. Dies gilt vor allem für das Verfahren der elektrodynamischen Fragmentierung. Zum einen muss die Anlage so gestaltet werden, dass ein kontinuierlicher Durchsatz in industriell interessanten Volumenströmen möglich ist. Dies wäre ab einem Durchsatz von zwanzig Tonnen Material pro Stunde gegeben. Zusätzlich müssten Peripheriegeräte an die eigentliche Fragmentierungseinheit angeschlossen werden um beispielsweise die Prozesswasseraufbereitung und die Sortierung des aufgetrennten Materials zu ermöglichen.

## Erklärung

Sämtliche Ergebnisse entstammen dem Forschungsprojekt *Eldynton* gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) mit der Fördernummer 033R076C.

## 7. Literatur

- [1] Basten, M.: Mineralische Bauabfälle Monitoring 2010 – Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2010. Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V., 2013
- [2] Bluhm, H.; Frey, W.; Giese, H.; Hoppé, P.; Schultheiß, C. und Sträßner, R.: Application of pulsed HV discharges to material fragmentation and recycling. In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, Nr. 5, 2000, S. 625 – 635
- [3] BTB Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie. Jahresbericht 2013/2014
- [4] Höhn A. L., Verwendung von aufbereitetem Altbeton zur Porenbetonherstellung. Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP: Masterarbeit, 2014
- [5] Müller, A.: Baustoffrecycling, Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Vol. 62, Issue 11-12, 2011, S. 224-230
- [6] Seifert, S.; Thome, V.; Karlstetter, C.: Recycling of waste concrete using the Electro-dynamical Fragmentation. In: Tagungsband der Tagung Bauchemie der GDCh-Fachgruppe Bauchemie, Band 46, 2013
- [7] Thome, V.: Cementing Emission – Recycling waste concrete with lightning bolts. AWE International, Juni 2013, S. 18 – 25
- [8] Weingärtner A.: Mehr Quantität als Qualität, entsorga-magazin, 7-8/2014, pp.13-15



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar

Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): **Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 2**  
– Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –  
ISBN 978-3-944310-21-3 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky  
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2015  
Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky,  
Dr.-Ing. Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc.  
Erfassung und Layout: Ginette Teske, Sandra Peters, Janin Burbott,  
Claudia Naumann-Deppe, Anne Kuhlo

Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.