

Reduktion der Wasseraufnahme rezyklierter Brechsande durch mikrobielle Kalkausfällung

Brigitte Nagy¹, Vincent Essler¹, Andrea Kustermann¹

¹ Hochschule für angewandte Wissenschaften München, Institut für Material- und Bauforschung, Deutschland, brigitte.nagy@hm.edu

Abstract. Die Wiederverwertung rezyklierter Gesteinskörnung in R-Beton schont natürliche Ressourcen und trägt zur Verbesserung der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen bei. Da jedoch vor allem rezyklierte Brechsande, bedingt durch die Porosität, eine gegenüber natürlichem Sand erhöhte Wasseraufnahme aufweisen, ist die Verwendung nur begrenzt möglich. Rezyklierte Brechsande von Typ 1 und Typ 2 (gemäß DIN 1045-2) dienen als Grundlage dieser Untersuchung. Ziel ist es, die Wasseraufnahme dieser Brechsande mittels Biozementierung, einer neuartigen Methode der mikrobiell induzierten Calciumcarbonat-Präzipitation (MICP), zu reduzieren. Für die MICP werden Bakterien eingesetzt, die aufgrund ihrer Ureaseaktivität in der Lage sind, aus Harnstoff und einer Calciumquelle Kalkausfällungen zu produzieren. Dadurch wird eine Kalkschicht auf der Oberfläche des rezyklierten Brechsands gebildet und ein Porenverschluss bewirkt. Im Rahmen der Methodenentwicklung werden zwei verschiedene Calciumquellen im MICP-Prozess verwendet und deren Effekt auf die Reduktion der Wasseraufnahme untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass sich durch die MICP-Behandlung die Wasseraufnahme des Typ 1 um bis zu 41 % und des Typ 2 um bis zu 48 % senken lässt, verglichen mit der jeweiligen Wasseraufnahme des unbehandelten Brechsands.

Keywords: rezyklierte Gesteinskörnung, Brechsand, Wasseraufnahme, MICP

Einleitung

Die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung im R-Beton fördert die Kreislaufwirtschaft im Bauwesen und trägt zur Schonung natürlicher Ressourcen bei. Rezyklierte

Gesteinskörnungen, vor allem rezyklierte Brechsande, besitzen jedoch eine höhere Wasseraufnahme verglichen mit natürlicher Gesteinskörnung und dürfen daher nur begrenzt eingesetzt werden. Derzeit ist nach DIN 1045-2 der Ersatz der natürlichen Gesteinskörnung durch grobe rezyklierte Gesteinskörnungen vom Typ 1 bis zu 45 Vol.-% und vom Typ 2 bis zu 35 Vol.-% für R-Betone zulässig. Nur im Fall des Typ 1 darf dabei auch feine rezyklierte Gesteinskörnung, d. h. Brechsand mit ≤ 20 Vol.-% Anteil der groben Kornfraktion, enthalten sein.

Um die Wasseraufnahme rezyklierter Brechsande zu reduzieren, wird in dieser Studie eine neuartige Methode der mikrobiell induzierten Calciumcarbonat-Präzipitation (MICP) untersucht. Dabei werden Bakterien eingesetzt, die aufgrund ihres Stoffwechsels in der Lage sind, aus Harnstoff und einer Calciumquelle Kalkausfällungen zu produzieren. Ziel ist es, eine Kalkschicht auf der Oberfläche des rezyklierten Brechsands zu bilden und einen Porenverschluss zu bewirken (García-González et al., 2017). Durch eine derartige Reduktion der Wasseraufnahme des rezyklierten Brechsands verbessert sich auch die Verarbeitbarkeit des daraus hergestellten Mörtels oder Betons (Belie et al., 2017; Grabiec et al., 2012).

Methoden

In dieser Studie wurde jeweils die Sandfraktion (0–4 mm) rezyklierter Gesteinskörnungen von Typ 1 und Typ 2 verwendet. Der Typ 1 Brechsand besteht dabei überwiegend aus reinem Betonbruch, wohingegen der Typ 2 Brechsand einen hohen Anteil (ca. 30 %) an Ziegelmaterial enthält (vgl. Abbildung 1, links).

Für die MICP wurde eine verdünnte Bakterienkultur aus *S. pasteurii* verwendet. Die Kultivierung wurde im Labor für Biotechnologie der Fakultät für Wirtschaftsingenieurwesen der HM durchgeführt und als Flüssigkultur bereitgestellt. Die sog. Zementierungslösung, aus der die Bakterien das Calciumcarbonat bilden, besteht aus Harnstoff (Urea) und einer Calciumquelle. Um den Einfluss verschiedener Calciumquellen im MICP-Prozess zu untersuchen, wurden Calciumchlorid (CaCl_2) und Calciumacetat (CaAce) für die Fällung des Calciumcarbonats eingesetzt. Im Rahmen der Methodenentwicklung wurden vorab die jeweils optimalen Stoffmengenkonzentrationen der Calciumquellen ermittelt und anhand der Calciumcarbonat-Ausbeute bewertet. Anschließend wurde die Kristallmodifikation des gefällten Calciumcarbonats mittels Röntgenbeugung (XRD) bestimmt.

Für die MICP-Behandlung des Brechsands wurde ein Verfahren auf Basis des Prüfverfahrens zur Bestimmung der Wasseraufnahme nach DIN EN 1097-6 entwickelt. Dabei wird die rezyklierte Gesteinskörnung in einem Büchnertrichter abwechselnd in Bakterienkultur und der Zementierungslösung durchspült und die Flüssigkeiten mittels Vakuumpumpe abgepumpt (vgl. Abbildung 1, rechts). Die jeweiligen Eintauch- und

Abpumpzeiten betragen fünf Minuten, wobei bis zu drei Behandlungszyklen durchgeführt wurden. Die MICP-Behandlung wurde bei einer Raumtemperatur von ca. 20°C durchgeführt. Anschließend wurde der behandelte rezyklierte Brechsand bei 110°C auf Massenkonzanz getrocknet.

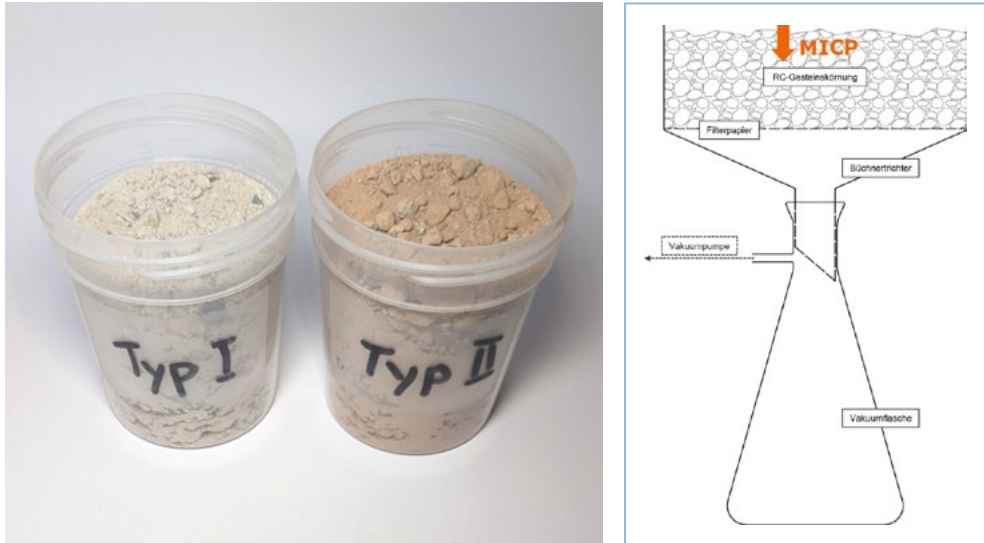


Abbildung 1: Sandfraktion rezyklierter Gesteinskörnung Typ 1 und 2 (links) und schematische Darstellung des Versuchsaufbaus der MICP-Behandlung (rechts)

Die Verarbeitbarkeit sowie die mechanischen Eigenschaften wurden anschließend anhand von Mörtelproben (hergestellt nach DIN EN 196-1) geprüft. Zum Vergleich wurden Mörtelproben jeweils aus unbehandelter und MICP-behandelter rezyklierter Gesteinskörnung hergestellt.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Röntgenbeugung zeigen, dass die Verwendung von Calciumchlorid in der MICP zu einem 100 %-Anteil an Calcit des gefällten Calciumcarbonats führt, wohingegen mit Calciumacetat eine Mischung aus ca. 70 % Vaterit und 30 % Calcit entsteht. Aus der Ausbeute an Calciumcarbonat geht hervor, dass die ermittelten Stoffmengenkonzentrationen beider Calciumquellen für die MICP-Behandlung geeignet sind.

Die Wasseraufnahme wurde nach DIN EN 1097-6 jeweils vor (unbehandelter Brechsand Typ 1 und Typ 2) und nach der MICP-Behandlung mit Verwendung der entsprechenden Calciumquelle in Massenprozent bestimmt. Es zeigt sich, dass unbehandelter Typ-2-Brechsand mit 16,6 M.-% eine höhere Wasseraufnahme aufweist als der

Typ-1-Brechsand mit 12,7 M.-% (vgl. Abbildung 2). Die Ergebnisse der Wasseraufnahme nach der MICP-Behandlung zeigen eine Reduktion der ursprünglichen Wasseraufnahme der rezyklierten Brechsande sowohl bei Typ 1 als auch bei Typ 2. Dabei bewirkt die Verwendung von Calciumacetat in der MICP bei Typ 1 eine Reduktion der Wasseraufnahme von ca. 41 %. Wohingegen die Wasseraufnahme des Typ 2 mit CaCl_2 in der MICP um ca. die Hälfte reduziert werden kann.

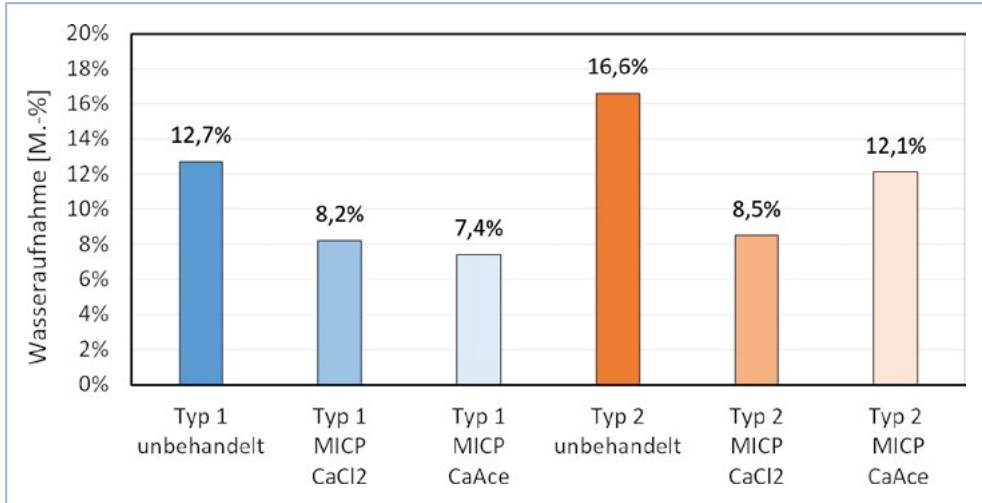


Abbildung 2: Ergebnisse der Wasseraufnahme (M.-%) unbehalteter und MICP-behandelter rezyklierter Gesteinskörnung Typ 1 und Typ 2 mit je CaCl_2 und Calciumacetat (CaAce) in der Zementierungslösung (n=2)

Die Untersuchungen zu Frischmörteleigenschaften zeigen eine leichte Verbesserung in der Verarbeitbarkeit der Mörtel mit MICP-behandelter rezyklierter Gesteinskörnung verglichen zu Mörtel mit unbehandeltem Brechsand. Obwohl nach der MICP-Behandlung weniger Saugwasser zum Vornässen des Brechsands für die Mörtelherstellung nötig ist, kann eine leichte Erhöhung (von 180 mm auf 190 mm) im Ausbreitmaß des Mörtels mit MICP-behandeltem Typ-1-Brechsand beobachtet werden. Die Ergebnisse der mechanischen Eigenschaften zeigen jedoch kaum einen Einfluss der MICP-Behandlung. Lediglich die Ergebnisse der Biegezugfestigkeit der Mörtelproben mit Typ-1-Brechsand zeigen eine geringe Steigerung von $4,48 \text{ N/mm}^2$ auf $4,65 \text{ N/mm}^2$ mit CaCl_2 und $4,81 \text{ N/mm}^2$ mit CaAce in der MICP-Behandlung. Abbildung 3 zeigt den Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Wasseraufnahme des Typ-1-Brechsands und der Biegezugfestigkeit der Mörtelproben mit Typ-1-Brechsand. Daraus geht hervor, dass je niedriger die Wasseraufnahme nach der MICP-Behandlung des Brechsands ist, desto höher ist die Biegezugfestigkeit der daraus hergestellten Mörtelproben.

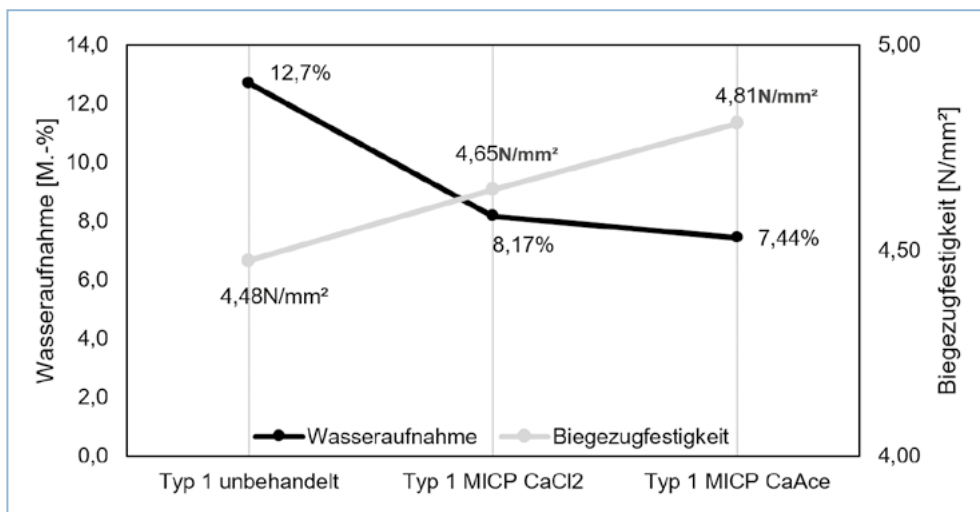


Abbildung 3: Zusammenhang zwischen der Wasseraufnahme (n=2) des Brechsands Typ 1 und den Ergebnissen der Biegezugfestigkeit (n=6) der Mörtelproben

Diskussion

Die Untersuchungen des ausgefällten Calciumcarbonats decken sich mit Erkenntnissen aus der Literatur. Gorospe et al. (2013) stellen fest, dass in der MICP mit Calciumchlorid kleinere Kristalle gebildet werden als mit Calciumacetat und dass die Bildung von Vaterit überwiegend auf die Verwendung von Calciumacetat zurückzuführen ist.

Beide Calciumquellen in der MICP-Behandlung resultieren in einer Reduktion der Wasseraufnahme des rezyklierten Brechsands. Dabei konnte mit Calciumchlorid im Fall des Typ-2-Brechsands eine Reduktion von bis zu 48 % festgestellt werden. Ähnliche Ergebnisse konnten García-González et al. (2017) beobachten. Sie geben an, dass die MICP-Behandlung bei kleiner Partikelgröße und höherem Keramikgehalt aufgrund des Verhältnisses der Oberfläche zum Volumen sowie der Rauheit der rezyklierten Gesteinskörnung besonders effektiv sei. Im Fall des Typ-1-Brechsands hingegen scheint die Verwendung von Calciumacetat besonders effektiv.

Die MICP-Behandlung zeigt sowohl bei Typ 1 als auch bei Typ 2 kaum Einfluss auf die Festigkeitsentwicklung der Mörtelproben. Lediglich im Fall des Typ-1-Brechsands lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Reduktion der Wasseraufnahme und der Erhöhung der Biegezugfestigkeit feststellen. Dies könnte mit der Materialzusammensetzung des Brechsands zusammenhängen. Da der Typ-1-Brechsand im Gegensatz zum Typ 2 überwiegend aus Betonbruch, d.h. altem Zementstein, besteht, könnte möglicherweise eine bessere Verzahnung in der Kontaktzone (ITZ – Interfacial Transition Zone) entstanden sein. Es ist nicht auszuschließen, dass das mittels MICP gefäll-

te Calciumcarbonat auf der Oberfläche der rezyklierten Gesteinskörnung des Typ 1 besser haftet, als es bei Typ-2-Brechsand der Fall ist. Wu et al. (2018) konnten anhand von REM-Aufnahmen eine erhöhte Dichte der ITZ zwischen der biobehandelten rezyklierten Gesteinskörnung, die aus Betonbruch stammt, und dem neu gebildeten Zementstein nachweisen.

Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse der untersuchten rezyklierten Brechsande zeigen, dass die MICP-Behandlungsmethode ein vielversprechender Ansatz zur Reduktion der Wasseraufnahme ist. Die ursprüngliche Wasseraufnahme des Typ 1 kann um bis zu 41 % und bei Typ 2 um bis zu 48 % reduziert werden. Dabei sind beide untersuchten Calciumquellen (Calciumchlorid und Calciumacetat) für die MICP geeignet. Ebenso kann eine verbesserte Verarbeitbarkeit des Mörtels mit MICP-behandelter rezyklierter Gesteinskörnung festgestellt werden. Es sind jedoch weiterführende Untersuchungen nötig, um den Einfluss der MICP-Behandlung auf die mechanischen Kennwerte des Mörtels zu prüfen. Bei Mörtelproben mit Typ-1-Brechsand kann eine geringe Erhöhung der Biegezugfestigkeit festgestellt werden. Nähere Untersuchungen mittels REM sollen Aufschluss über die neu gebildete ITZ zwischen MICP-behandelter rezyklierter Gesteinskörnung und Zementstein geben.

Referenzen

- Belie, N. de, Wang, J., García-González, J., Rodríguez-Robles, D., Vandevyvere, B., Boon, N., Schoon, J., & Juan Valdés, A. (2017). Improving the quality of various types of recycled aggregates by biodeposition. In *Durability of Building Materials and Components XIV DBMC, RILEM Pro, 107* (pp. 1–8). <http://hdl.handle.net/1854/LU-8557581> (abgerufen am 01.12.2025)
- DIN 1045-2:2023-08, *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton*. Berlin: DIN Media.
- DIN EN 196-1:2016-11, *Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit; Deutsche Fassung EN 196-1:2016*. Berlin: DIN Media.
- DIN EN 1097-6:2022-05, *Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme; Deutsche Fassung EN 1097-6:2022*. Berlin: DIN Media.
- García-González, J., Rodríguez-Robles, D., Wang, J., de Belie, N., Morán-del Pozo, J., Guerra-Romero, I., & Juan-Valdés, A. (2017). Quality improvement of mixed and ceramic recycled aggregates by biodeposition of calcium carbonate. *Construction and Building Materials, 154*, 1015–1023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.039>
- Gorospe, C. M., Han, S.-H., Kim, S.-G., Park, J.-Y., Kang, C.-H., Jeong, J.-H., & So, J.-S. (2013). Effects of different calcium salts on calcium carbonate crystal formation by *Sporosarcina pasteurii* KCTC 3558. *Biotechnology and Bioprocess Engineering 18*(5), 903–908. <https://doi.org/10.1007/s12257-013-0030-0>
- Grabiec, A. M., Klama, J., Zawal, D., & Krupa, D. (2012). Modification of recycled concrete aggregate by calcium carbonate biodeposition. *Construction and Building Materials, 34*, 145–150. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.027>
- Wu, C.-R., Zhu, Y., Zhang, X., & Kou, S. (2018). Improving the properties of recycled concrete aggregate with bio-deposition approach. *Cement and Concrete Composites, 94*, 248–254.