

Potenzial der CO₂-Speicherung in Baustoffen als Grundlage für eine nachhaltige Entwicklung des Bauwesens

Jakob Quirgst, BSc¹, Alfred Weninger-Vycudil¹, Nina Sam¹, Markus Vill¹

¹ Hochschule Campus Wien, Forschungszentrum Bauen und Gestalten, jakob.quirgst@hcw.ac.at

Abstract. Angesichts steigender CO₂-Emissionen und des Anteils des Bausektors wurde das Potenzial der beschleunigten Karbonatisierung in Baustoffen untersucht. Dabei kamen sowohl Kalkhydrat als auch Betonproben in einem CO₂-Reaktor unter kontrollierten Bedingungen zum Einsatz. Im Fokus standen CO₂-Aufnahme und Karbonatisierungsverläufe beider Materialien. Die Ergebnisse zeigen, dass Kalkhydrat aufgrund seines hohen Hydroxidanteils eine deutlich höhere CO₂-Bindung erzielt als Beton. Pro Kilogramm Bindemittel wurden beim Kalkhydrat rund 220 g CO₂ gebunden, während Beton im Vergleich geringere Werte von etwa 55 g CO₂ pro kg Zement und 92 g CO₂ pro kg Klinker erreichte.

Keywords: beschleunigte Karbonatisierung, CO₂-Speicherung, nachhaltige Baumaterialien

Einleitung

Der Klimawandel gehört zu den drängendsten Herausforderungen unserer Zeit, wobei das Treibhausgas CO₂ maßgeblich zur Erderwärmung beiträgt. Im Zuge der Bemühungen, die globalen CO₂-Emissionen zu reduzieren, rückt der Bausektor aufgrund seines erheblichen Anteils an den Gesamtemissionen in den Fokus. Da prozessbedingte Emissionen nicht vollständig vermeidbar sind, gewinnen die Speicherung und die Nutzung von CO₂ in Baustoffen zunehmend an Bedeutung. Die Einbindung karbonatisierter Materialien in eine Kreislaufwirtschaft bietet das Potenzial, sowohl Ressourceneffizienz als auch Klimaschutz voranzutreiben.

Die Karbonatisierung ist ein natürlicher chemischer Prozess, bei dem CO₂ in Gegenwart von Wasser mit alkalischen Komponenten mineralischer Baustoffe, wie Calciumhydroxid, reagiert und dabei stabile Karbonate bildet. Da dieser Prozess unter natürlichen atmosphärischen Bedingungen recht langsam verläuft, wird die Geschwindigkeit dieser Reaktion durch gezielte Anpassung der CO₂-Konzentration sowie der Steuerung von Umgebungsparametern wie Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Druck optimiert. Dieser Ansatz wird als „beschleunigte Karbonatisierung“ oder „Zwangskarbonatisierung“ bezeichnet. Für die Versuche wird der von der Hochschule Campus Wien entwickelte CO₂-Reaktor verwendet, der auf dem Prinzip der Karbonatisierung basiert. Bei der direkten Karbonatisierung handelt es sich um einen chemischen Prozess, bei dem CO₂ in Anwesenheit von Wasser direkt mit den mineralischen Feststoffen reagiert, die reaktive Bestandteile enthalten. Im Gegensatz zur indirekten Karbonatisierung, bei der die mineralischen Bestandteile zunächst in Lösung überführt und anschließend mit CO₂ versetzt werden, erfolgt die Bindung des CO₂ bei der direkten Karbonatisierung ohne vorherige Auflösung der Feststoffe. CO₂ diffundiert dabei zusammen mit Wasser bis an die reaktive Oberfläche oder in das Porensystem des Materials, wo es direkt chemisch gebunden wird, wie in Abbildung 1 zu erkennen ist.

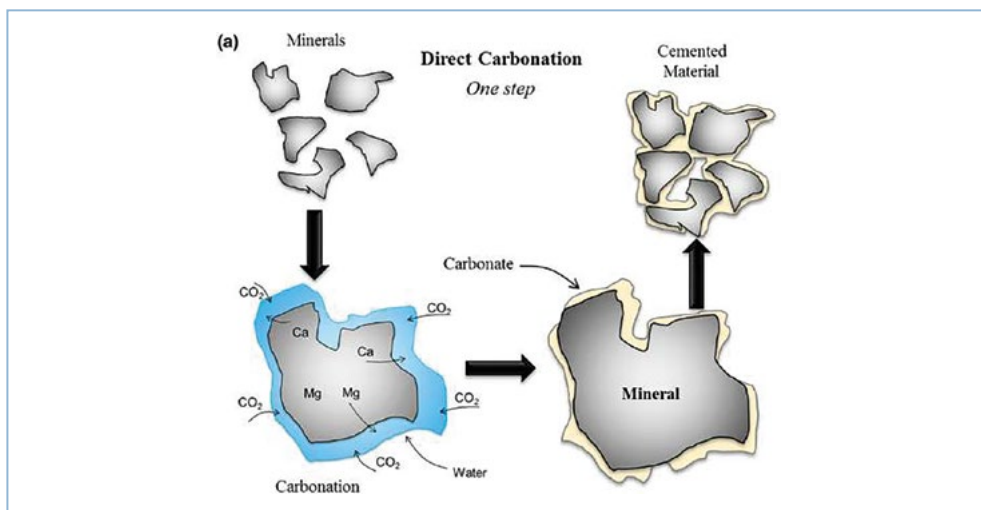


Abbildung 1: Prinzip der direkten Karbonatisierung (Reddy et al., 2019)

Versuchsaufbau und Zielsetzung

Der Reaktor der Hochschule Campus Wien erlaubt CO₂-Beschickung von Proben bis 30 kg bei variabler Temperatur und CO₂-Konzentration. Die Messtechnik besteht aus einer Waage, einem Messdatenerfasser sowie CO₂- und Temperatursensoren. Das auf-

genommene CO₂ wird dabei durch die gemessene Masseveränderung der CO₂-Flasche erfasst. Die Karbonatisierungskammer besteht aus einem gasdichten Edelstahlbehälter, der von oben mit Probematerial befüllt und mit einer Acrylglasplatte verschraubt wird. Durch ein Rostgitter kann das Probematerial gleichmäßig verteilt und mit CO₂ durchströmt werden. Der eingestellte CO₂-Gehalt wird während des Versuchs in der Regel konstant gehalten. In Abbildung 2 ist schematisch die Funktionsweise des CO₂-Reaktors der Hochschule Campus Wien dargestellt.

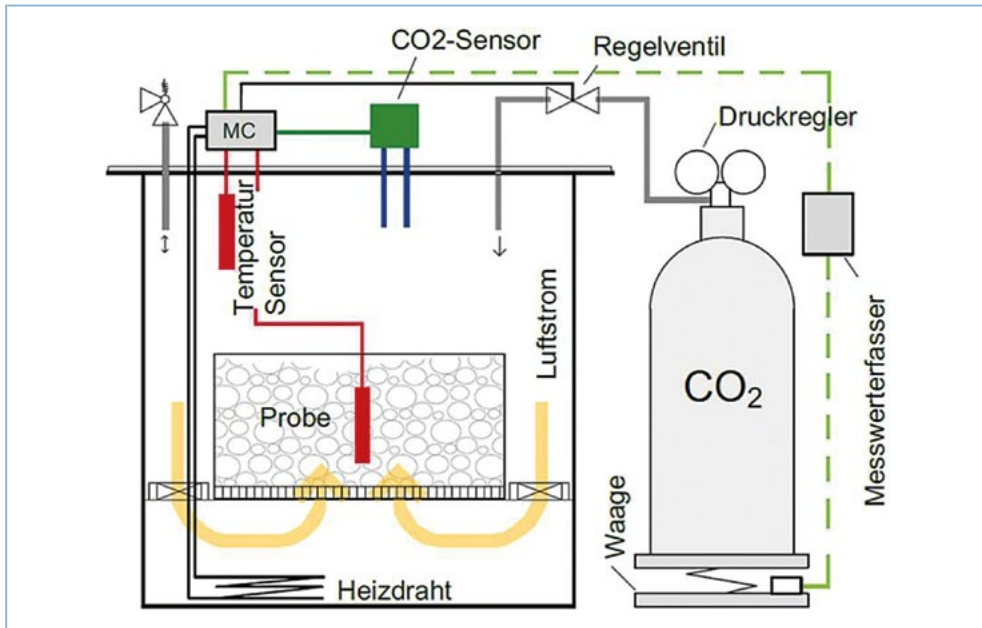


Abbildung 2: Funktionsweise CO₂-Reaktor Hochschule Campus Wien (Pfleger et al., 2023)

Derzeit werden verschiedene Baustoffe auf ihr Potenzial zur Speicherung von CO₂ untersucht, wobei nicht nur relevant ist, wie die größte Menge an CO₂ im Baustoff gespeichert werden kann, sondern auch welche Auswirkungen der Zwangskarbonatisierung auf die Materialeigenschaften entscheidend sind. Die momentan an der HCW laufenden Untersuchungen konzentrieren sich vor allem auf Baustoffe, wie Abbruchmaterialien aus Beton, Straßenbeton, Kalkhydrat oder Hochofenschlacke.

Methoden

Als Kalibrieransatz wurde reines Kalkhydrat verwendet, da dieses aufgrund seines hohen Hydroxidanteils eine sehr rasche Karbonatisierungsreaktion ermöglicht. Zur Herstellung wurde Weißkalkhydrat (CL 90-S) verwendet, wobei das Mischungsverhältnis von Bindemittel zu Wasser mit 1:1 festgelegt wurde. Insgesamt wurden 2 kg

des Kalkhydrats angemischt und in eine Form mit den Maßen 38 cm × 15 cm eingefüllt. Der Anteil an Kalzium- und Magnesiumoxid beträgt beim Kalkhydrat laut Herstellerangaben 94 %. Ein Problem zeigte sich jedoch bei der Erhärtung in der Reaktoratmosphäre: Die dabei entstehende Reaktionsfeuchtigkeit ließ die relative Luftfeuchtigkeit innerhalb des Reaktionsraums auf Werte über der Taupunkttemperatur ansteigen. Infolgedessen bildete sich an der Probenoberfläche ein Wasserfilm, der die Diffusion von CO₂ behinderte und die Karbonatisierung deutlich verzögerte. Zur Lösung dieses Problems wurde der Einsatz eines Trocknungsmittels getestet, wodurch die Luftfeuchtigkeit gezielt unterhalb des Taupunkts gehalten und eine konstante CO₂-Durchströmung und vollständige Reaktionsfähigkeit der Probe sichergestellt werden konnte.

Für die CO₂-Speicheruntersuchungen an Betonproben wurden Betonwürfel mit einer Kantenlänge von 15 cm und einem W/B-Wert von 0,5 aus CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N hergestellt. Der Klinkeranteil dieses Zementtyps liegt gemäß ÖNORM EN 197-1 im Bereich von 50–64 %. In den hergestellten Betonwürfeln betrug der Zementgehalt rund 18,0 M.-%. Daher beträgt der Klinkeranteil im Betonwürfel 9,0–11,5 M.-%. Für die weiteren Betrachtungen wird von einem Klinkeranteil von 60 % ausgegangen. Daraus ergibt sich für einen Würfel mit 7,65 kg Masse ein Zementanteil von 1,38 kg und ein Klinkeranteil von 0,83 kg.

Die zuvor beschriebenen Versuche wurden bei 20 % CO₂ und 25 °C über 100 Stunden bei atmosphärischem Druck durchgeführt.

Ergebnisse

In der nachfolgenden Abbildung 3 sind die Ergebnisse der Karbonatisierungsversuche dargestellt. Auf der x-Achse ist die Zeit in Stunden, auf der y-Achse die aufgenommene CO₂-Menge in Gramm angegeben. Die Darstellung umfasst die CO₂-Aufnahme beim Beton pro kg Zement und pro kg Klinker sowie die Aufnahme pro kg Bindemittel beim Kalkhydrat.

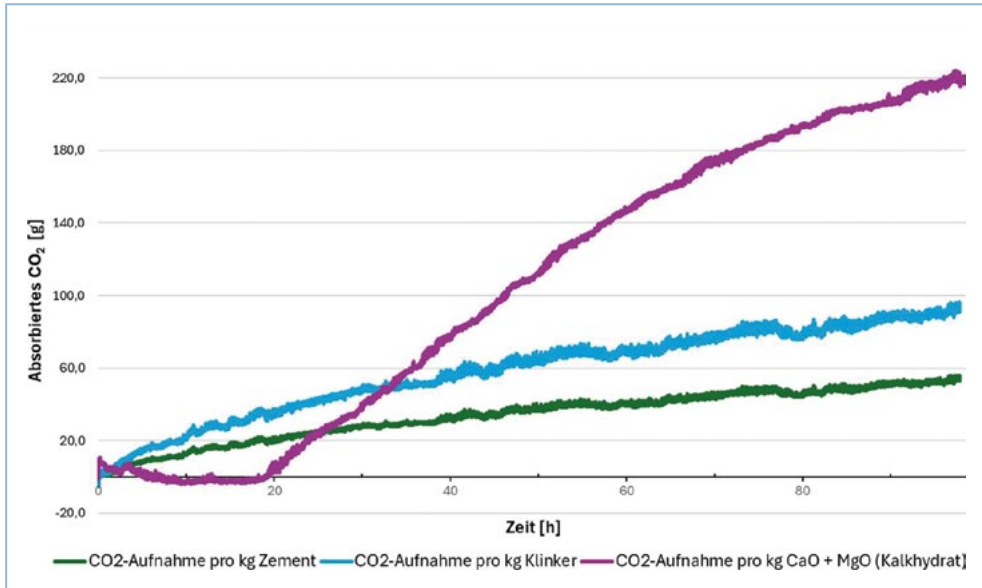


Abbildung 3: CO₂-Aufnahme von Beton und Kalkhydrat

Es ist erkennbar, dass Kalkhydrat deutlich mehr CO₂ aufgenommen hat, wobei die Aufnahme nach einer anfänglichen Verzögerung exponentiell anstieg und gegen Ende abflachte. Die zu Beginn beobachtete Verzögerungsphase ist darauf zurückzuführen, dass sich zunächst die klimatischen Bedingungen innerhalb der Versuchskammer einstellen mussten, bevor die Karbonatisierungsreaktion einsetzen konnte. Absolut wurden pro kg Bindemittel rund 220 g CO₂ aufgenommen. Beim Beton zeigen sich differenzierte Werte: Zu Beginn gibt es keine Verzögerungsphase, anschließend ist der Verlauf der Kurve ebenso leicht exponentiell, wobei es einen Übergang in einen linearen Verlauf gibt. Pro kg Zement wurden etwa 55 g und pro kg Klinker etwa 92 g CO₂ gebunden. Der Unterschied erklärt sich durch den geringeren Hydroxidanteil des Betons (großer Anteil an Gesteinskörnung, der nicht reaktionsfähig ist) und das vergleichsweise ungünstige Masse-Oberflächen-Verhältnis des Betonwürfels. Durch den Phenolphthaleintest wurde festgestellt, dass sich die Karbonatisierung während der Versuchszeit überwiegend auf die Würfeloberfläche beschränkte, während das Innere noch unkarbonatisiert blieb und somit weiteres CO₂-Aufnahmepotenzial vorhanden war. In Abbildung 4 ist links das erhärtete Kalkhydrat mit dem Trocknungsmittel und rechts der Phenolphthaleintest zu erkennen.

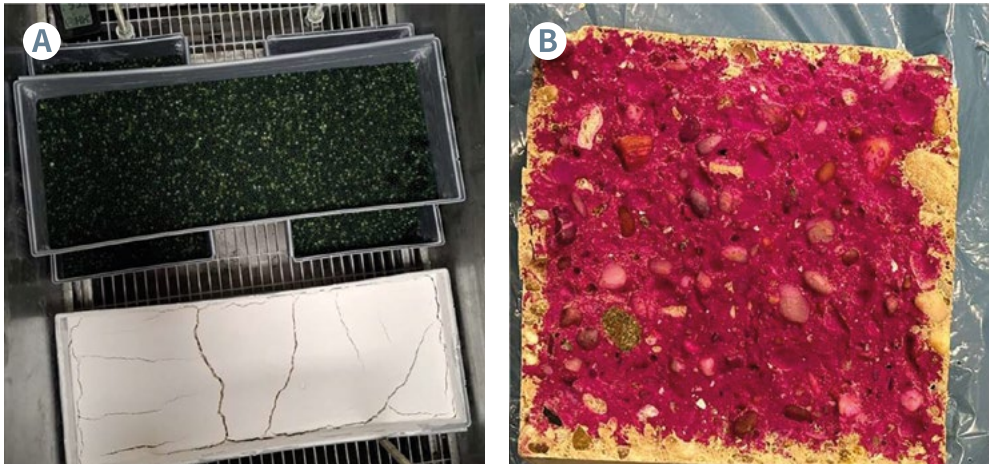


Abbildung 4: A) Kalkhydrat und B) Phenolphthaleintest bei Betonwürfel

Diskussion

Die Karbonatisierung von Baustoffen bietet vielversprechendes Potenzial für die nachhaltige CO₂-Bindung und kann eine wichtige Rolle in der CO₂-Strategie des Bausektors spielen. Zentrale Fragen betreffen jedoch die Maximierung der CO₂-Speicherungseffizienz sowie die spezifischen Bedingungen wie Luftfeuchtigkeit, Temperatur und CO₂-Konzentration. Ein weiterer Fokus liegt auf der Untersuchung der Auswirkungen der beschleunigten Karbonatisierung auf die Materialeigenschaften, um eine sichere Nutzung von Recyclingmaterialien zu gewährleisten. Darüber hinaus spielt für den Einsatz in industriellen Großanlagen künftig auch der notwendige Energieverbrauch eine entscheidende Rolle, da dieser maßgeblich die ökologische und wirtschaftliche Gesamtbilanz von CO₂-Speichertechnologien beeinflusst. Die Integration von Karbonatisierungsprozessen in die Kreislaufwirtschaft im Bausektor bietet in diesem Zusammenhang vielversprechende Perspektiven – insbesondere durch die gezielte Wiederverwendung von Abbruchmaterialien und die stoffliche Verwertung industrieller Nebenprodukte.

Referenzen

- ÖNORM EN 197-1 (2018). Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderung und Konformitätskriterien von Normalzement. Wien: Austrian Standards International.
- Pfleger, M.-P., Radl, E., & Vill, M. (2023). Untersuchungen zum CO₂-Speicherpotenzial von rezyklierten Gesteinskörnungen und Zementproben unter Zwangskarbonatisierung. *Beton- und Stahlbetonbau*, 118(8), 565–574. <https://doi.org/10.1002/best.202300006>
- Reddy, K. R., Gopakumar, A., & Chetri, J. K. (2019). Critical review of applications of iron and steel slags for carbon sequestration and environmental remediation. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 18, 127–152. <https://doi.org/10.1007/s11157-018-09490-w>