

# Nachbehandlung von additiv gefertigten Betonbauteilen mit Fokus auf die CO<sub>2</sub>-Speicherfähigkeit durch Zwangskarbonatisierung

Victoria Gaismayer, Marc-Patrick Pflieger, Christian Hölzl, Markus Vill

FH Campus Wien, Kompetenzzentrum für Bauen und Gestalten

**Abstract.** Additive Fertigungsmethoden finden in vielen Industriezweigen Anwendung und sie entwickeln sich mit rasanter Geschwindigkeit weiter. In der Baubranche kann inzwischen eine große Anzahl an F&E Projekten im Bereich des Beton 3D Drucks genannt werden, zumeist mit dem Ziel dünnwandige Strukturen mit reduziertem Materialverbrauch herzustellen. Es entstehen meist unbewehrte Bauteile mit hoher Oberfläche, wodurch sich Fragestellungen nach geeigneten, innovativen Ansätzen zur Nachbehandlung stellen. Im Zuge der Arbeit wurde die CO<sub>2</sub>-Speicherfähigkeit von gedruckten Betonteilen in einem Schnellkarbonatisierungsverfahren untersucht und dabei festgestellt, dass eine zusätzliche Nachbehandlung der gedruckten Objekte entfallen kann. Weiters ist die aufgenommene Menge an CO<sub>2</sub> über den Zeitverlauf des Versuchs dargestellt worden, um das mögliche Speicherpotenzial im Sinne der Nachhaltigkeit durch einen industriellen Prozess abzubilden.

**Keywords:** Beton 3D Druck, Nachbehandlung, Karbonatisierung

## **1 EINLEITUNG**

### **1.1 HINTERGRUND**

Additiv gefertigte Betonbauteile weisen aufgrund ihrer aufgelösten Querschnittsform nicht nur eine reduzierte Masse, sondern auch eine erhöhte Oberfläche auf, die im Sinne der Dauerhaftigkeit und aus ästhetischen Gründen auf geeignete Art und Weise nachbehandelt werden müssen [1]. Daher sind verschiedene Nachbehandlungsmethoden, die aus dem konventionellen Betonbau bekannt sind, an 3D gedruckten Bauteilen auf ihre Eignung untersucht worden. Als Nachbehandlungsmethoden wurden das Abdecken mit einer Kunststoffolie, das Besprühen mit Wasser oder das Besprühen mit Betonzusatzmitteln zur Anwendung gebracht, um eine Schwindrissbildung oder sandende Oberflächen zu vermeiden [2]. Aufgrund des günstigen Oberflächen-Volumen-Verhältnisses von gedruckten Körpern sollte zusätzlich die forcierte Karbonatisierung zur Optimierung des ökologischen Fußabdrucks der Bauteile bzw. die dauerhafte Speicherung von CO<sub>2</sub> untersucht werden. Gedruckte Betonbauteile werden zumeist noch ohne Stahlbewehrung hergestellt, wodurch keine Einbußen der Dauerhaftigkeit zu erwarten sind. Die zugrunde liegende Motivation ist, die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Zementherstellung teilweise kompensieren zu können. Mit dem „Carbon Curing“ könnte der ökologische Fußabdruck der Zementherstellung um bis zu einem Drittel verbessert werden. Nicht nur unbewehrte Betonbauteile, sondern auch Betonabfälle können karbonatisiert werden und damit den ökologischen Fußabdruck von Beton verbessern. Neben dem Nachhaltigkeitsaspekt kann durch das Carbon Curing die Festigkeit und Dichtigkeit des Betons, durch die Verkleinerung der Porenräume, gesteigert werden.

### **1.2 FRAGESTELLUNGEN**

Die Effektivität der CO<sub>2</sub>-Speicherfähigkeit von Beton ist einerseits wesentlich von den vorherrschenden Umgebungsparametern, andererseits von den Materialeigenschaften selbst abhängig. Ohne geeignetes Diffusionsvermögen bzw. Porigkeit des Materials ist von einem verlangsamten Karbonatisierungsprozess auszugehen. Additiv gefertigte Betonbauteile weisen aufgrund ihrer Betonzusammensetzung und der Verarbeitungsweise ein vergleichsweise dichtes Gefüge auf, wodurch sich grundlegende Fragestellungen zur Diffusion von Stoffen ergeben. Da zumeist unbewehrte Bauteile 3D gedruckt werden, kann ein beschleunigter Karbonatisierungsprozess zur Optimierung der CO<sub>2</sub> Speicherung angewendet werden, indem die aufnehmbare Menge aufgezeichnet und in einem weiteren Schritt den herstellungsbedingten Emissionen gegenübergestellt werden kann.

Des Weiteren weisen druckbare Mörtelrezepturen allgemein einen erhöhten Zementgehalt auf und enthalten Gesteinskörnungen mit kleinem Größtkorn. Dadurch ist besonders auf die sorgfältige Nachbehandlung von gedruckten Objekten zu achten, um schädliche Auswirkungen des Schwindens möglichst vermeiden zu können. Die forcierte Karbonatisierung findet prozessbedingt in einem gasdicht abgeschlossenen Behältnis unter hoher relativer Luftfeuchte und erhöhter Temperatur statt, wodurch der Karbonatisierungsprozess selbst ggf. als Nachbehandlungsmethode Anwendung finden kann. In ersten Versuchen soll untersucht werden, ob kleinere, unbewehrte 3D gedruckte

Objekte unmittelbar nach dem Erstarren einem solchen Prozess ausgesetzt werden können.

## 2 METHODEN

Aufgrund der Neuheit von additiven Fertigungsmethoden im Bauwesen sind in der Literatur noch keine Referenzen für geeignete Nachbehandlungsmöglichkeiten vorhanden. Daher sind im Zuge einer Versuchsreihe sowohl die bereits erwähnten Methoden als auch das Carbon Curing an 3D gedruckten Betonproben geprüft worden. Um festzustellen, welcher Karbonatisierungsgrad die Proben im Ausgangszustand aufweisen, sind diese in zwei Hälften gebrochen und die Bruchflächen mit Phenolphthaleinlösung besprüht worden. Nach dem Feststellen einer nur oberflächnahen Karbonatisierung des Materials sind die zuvor zur Bestimmung der Trockenmasse gewogenen Proben wieder befeuchtet und in eine Karbonatisierungskammer gelegt worden. Das Einstellen einer ausreichenden Materialfeuchte ist nötig, um überhaupt eine CO<sub>2</sub> Aufnahme des Betons zu ermöglichen. Der CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Kammer wurde während dem Versuch bei konstant 20 % gehalten und die Lufttemperatur auf 30 °C eingestellt. Die Versuchsdauer für die CO<sub>2</sub>-Aufnahme wurde im Vorfeld auf 42 h festgelegt. Ein Sensor zeichnet währenddessen in Echtzeit auf, wieviel CO<sub>2</sub> durch die Prüfkörper aufgenommen wird. Nach 42 h werden die Prüfobjekte aus der Karbonatisierungskammer entnommen, erneut ein Phenolphthaleintest durchgeführt, die Messdaten zur aufgenommenen Kohlendioxidmenge ausgewertet und in einem Diagramm dargestellt. Diese Daten werden dann mit vorhandenen Messdiagrammen von beschleunigt karbonatisierten rezyklierten Gesteinskörnungen verglichen. Die Proben selbst sind nach min. 28 Tagen optisch auf (oberflächliche) Risse/ Schwindrisse geprüft und mit klassisch nachbehandelten Referenzproben verglichen worden.

## 3 Versuchsdurchführung

Die Karbonatisierung der gedruckten Betonproben wurde in einer im Zuge eines Vorprojekts hergestellten Versuchsanlage durchgeführt, Abbildung 1. Insgesamt sind 12.800 g Probenmasse, bestehend aus mehreren ganzen Objekten, aber auch Bruchstücken, in die Reaktionskammer eingelegt worden. Es wurden insgesamt 4 Probestücke mit Querschnittsabmessungen von ca. 300 x 100 x 100 mm und einem Alter von 30 - 90 Tagen untersucht. Die Druckstrangbreite lag bei ca. 2,0 - 2,5 cm.



Abbildung 1. Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur beschleunigten Karbonatisierung von Beton (li.), Überblick über die Prüfkammer und die Steuerung (Mitte) und die 3D gedruckten Proben während dem Versuch (re.).

Die Umgebungsparameter sind entsprechend der Ausführungen unter Punkt 2 während der Versuchsdauer über 42 h konstant gehalten worden. Nach 12 h wurde stichprobenartig die bereits erreichte Karbonatisierungstiefe geprüft und anschließend der Versuch fortgesetzt.

#### 4 ERGEBNISSE UND AUSBLICK

Die durchgeführten Phenolphthaleintests zeigen, dass die CO<sub>2</sub>-Lagerung der Proben zur wesentlichen Erhöhung der Karbonatisierungstiefe führt. Weiters war zu beobachten, dass in Bereichen mit bereits vor dem Versuch vorhandenen oberflächlichen Schwindrissen teilweise auch eine vollständige Karbonatisierung der Prüfkörper festgestellt werden konnte, Abbildung 2.



Abbildung 2. 3D gedruckter Querschnitt nach der CO<sub>2</sub>-Lagerung für 12 h (li.) und bei Beendigung des Versuchs nach 42 h (re.).

Die Auswertung zur Speichermöglichkeit der gedruckten Prüfkörper hat ergeben, dass im vorgestellten Versuchsaufbau CO<sub>2</sub> in einem Ausmaß von rund 2,5 % des Betongewichts aufgenommen werden kann. Bei einer Probenmasse von ca. 12.800 g entspricht das rund 320 g CO<sub>2</sub>, Abbildung 3. Die Prüfkörper haben trotz ihrer hohen Dichtigkeit im beschleunigten Karbonatisierungsprozess Kohlendioxid aufnehmen können.

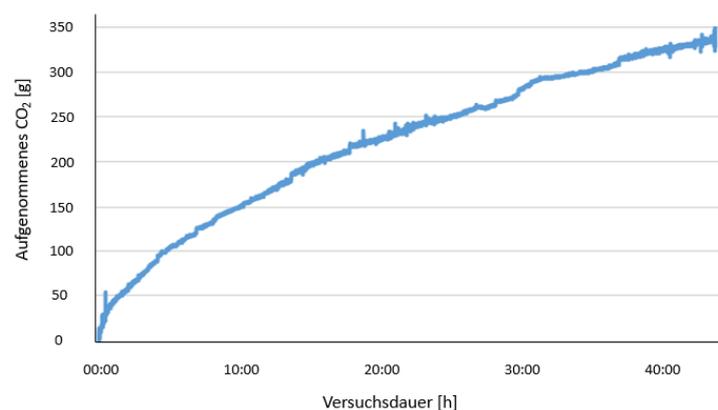


Abbildung 3. Verlauf der CO<sub>2</sub>-Aufnahme der Probe (12.800 g) im beschleunigten Karbonatisierungsverfahren über eine Versuchsdauer von 42 h.

Zudem kann die gebundene Menge mit einer vergleichsweise kurzen Expositionszeit von rund 42 Stunden auch in einem industriell durchgeführten Prozess als praxistauglich gewertet werden. Auch wenn eine gesamtheitliche Betrachtung eines verfahrenstechnischen Prozesses zur CO<sub>2</sub>-Speicherung in Beton angestellt wird, kann eine

Verbesserung der Emissionsbilanz festgestellt werden [4].

Als erschwerend, bezogen auf die Vergleichbarkeit der Ergebnisse, stellt sich der Umstand dar, dass aktuell keine Standards oder Richtlinien verfügbar sind, die die Probenherstellung im Bereich des Beton 3D-Drucks regulieren. Die Herstellung herkömmlicher Prüfkörper erscheint im Bereich des Betondrucks als nicht adäquat, da Würfel oder Prismen nicht die gewünschte Feingliedrigkeit von 3D gedruckten Objekten aufweisen. Im Rahmen der Studie konnte nachgewiesen werden, dass der ökologische Impact der gedruckten Betonteile über die erzwungene Karbonatisierung reduziert werden kann. Die im Versuchsablauf gebundene CO<sub>2</sub>-Menge entspricht einer Kompensation von min. 10 % der bei der Zementherstellung freigesetzten Emissionen. Weiters kann festgehalten werden, dass der Karbonatisierungsprozess durch erhöhte Luftfeuchte und Umgebungswärme zur schnelleren Festigkeitsentwicklung und reduzierter Rissbildung führt. Dieser Rückschluss wird deutlich, wenn ein Vergleich mit gleichartigen Referenzproben mit konventioneller oder ohne Nachbehandlung angestellt wird.

## 5 LITERATUR

- [1] Stark, J. / Wicht, B.: Dauerhaftigkeit von Beton. 2. Auflage. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg 2013.Referenz 2
- [2] Fingerloos, F. / Schwabach, E.: Einfluss der Nachbehandlung auf die Eigenschaften der Betonrandzone. In: Dauerhafter Beton. Richtige Nachbehandlung. 17. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung. Hrsg.: Nolting, Ulrich / Dehn, Frank / Kind, Vanessa Mercedes. Karlsruhe: Scientific Publishing 2021. S. 13-24.
- [3] Hainer, S. / Proske, T. / Graubner, C.: Einfluss der Nachbehandlung auf das Karbonatisierungsverhalten von Beton aus klinkerarmen Zementen. In: Beton- und Stahlbetonbau. Nr. 110 Heft 1 aus 2015. S. 41 – 49.
- [4] Tiefenthaler J., Braune L, Bauer C, Sacchi R, Mazzotti M. (2021). Technological Demonstration and Life Cycle Assessment of a Negative Emission Value Chain in the Swiss Concrete Sector. Front. Clim. 3:729259. doi: 10.3389/fclim.2021.729259.