

Untersuchung des Karbonatisierungsverhaltens von 3D-gedruckten Schalungselementen mit Ortbetonverguss für Rippendecken

Marc-Patrick Pflieger¹, Elisabeth Radl¹, Markus Vill¹

¹ Hochschule Campus Wien, Forschungszentrum Bauen und Gestalten, marc-patrick.pflieger@hcw.ac.at

Abstract. Der Forschungsfokus der vorliegenden Arbeit beschäftigt sich mit der Anrechenbarkeit der Schalungskörper aus gedrucktem Beton für die Betonüberdeckung der Bewehrung von Ortbetongergänzungen hinsichtlich der Dauerhaftigkeitseigenschaften. Bedingt durch das Extrusionsverfahren sind gedruckte Bauteile bzw. die im Weiteren beschriebenen Schalungskörper schichtweise aufgebaut und weisen daher kein homogenes Materialgefüge wie herkömmlicher, gegossener Beton auf. Um das Eindringverhalten des CO₂ über die gedruckte Materialoberfläche zu untersuchen, werden Prüfkörper hergestellt und diese anschließend in einem beschleunigten Karbonatisierungsverfahren mit CO₂ beaufschlagt. Um einen potenziellen Zusammenhang der Eindringtiefe und der Schichtstärke der Druckstränge zu untersuchen, werden verschiedene Varianten an Prüfkörperserien beprobt. Anschließend wird die Eindringtiefe an mehreren Stellen ausgewertet und mögliche Problemstellen analysiert. Besonderes Augenmerk wird auf die Materialfuge zwischen dem vorgefertigten Schalungsteil und dem Ortbetonverguss gelegt, da durch die unterschiedliche Materialzusammensetzung eine erhöhte Rissneigung und dadurch eventuell ein geringerer Karbonatisierungswiderstand zu erwarten sind.

Keywords: 3D-Betondruck, Karbonatisierung, verlorene Schalung, Rippendecken

Einleitung

Beton stellt den weltweit am häufigsten verwendeten Baustoff dar, der in allen Bereichen des Bauwesens erfolgreich eingesetzt wird. Jedoch bedingt die Herstellung

des im Beton enthaltenen Zements erhebliche CO₂-Emissionen und steht mit einem hohen Rohstoffverbrauch im Zusammenhang. Vor dem Hintergrund der Ressourcenknappheit und des Klimaschutzes ist es notwendig, nachhaltigere Ansätze für den Einsatz von Beton zu entwickeln. Der 3D-Betondruck bietet hier Potenzial, da das Material gezielt, mit großer Formfreiheit und dünnwandig aufgebracht werden kann und somit nur dort zum Einsatz kommt, wo es aus statisch-konstruktiven Gesichtspunkten erforderlich ist.

Ein Ansatz zur Materialeinsparung bei Massivdeckenkonstruktionen sind ein- oder zweiachsig gespannte Rippendecken, wodurch eine Materialeinsparung von bis zu 40 % erreicht werden kann (Burger et al., 2022). Konventionell werden hierfür Schalungs- bzw. Verdrängungskörper verwendet, die vor dem Betonieren auf ein Traggerüst oder ein Deckenschalungssystem aufgelegt und nach dem Aushärten des Betons entfernt werden müssen. Dieser Prozess ist aufwendig und ressourcenintensiv, vor allem wenn nicht standardisierte Elemente zur Anwendung kommen sollen. Ein Lösungsansatz ist der Einsatz der 3D-Betondrucktechnologien zur Herstellung von verlorenen Schalungskörpern, welche als fixer Bestandteil in der Deckenkonstruktion verbleiben können. Dabei ergeben sich technische Fragestellungen, inwiefern diese Verdrängungskörper zusätzliche konstruktive Zwecke innerhalb des Bauteilgefüges erfüllen können.

Versuchsaufbau und Methodik

Für die Versuchsdurchführung wurden Probekörper mittels des im 3D-Betondruck üblichen Extrusionsverfahrens hergestellt. Dabei wird ein speziell entwickelter Druckmörtel über eine Schneckenpumpe zu einer an einem Knickarmroboter befestigten Düse gefördert, dort strangförmig extrudiert und schichtweise zum geplanten Objekt aufgebaut (Pfleger et al., 2024).

Die Prüfkörper haben eine würfelförmige Geometrie mit einer Kantenlänge von 15 cm. Bei der Herstellung wurde die Schichtstärke zwischen 4 mm, 5 mm und 6 mm variiert. Nach dem Aushärten der Probekörper wurde der Zwischenraum mit Beton verfüllt, um den Verbund bzw. die Fuge zwischen dem Druckmörtel und dem späteren Ortbeton zu simulieren, wie in Abbildung 1 ersichtlich.

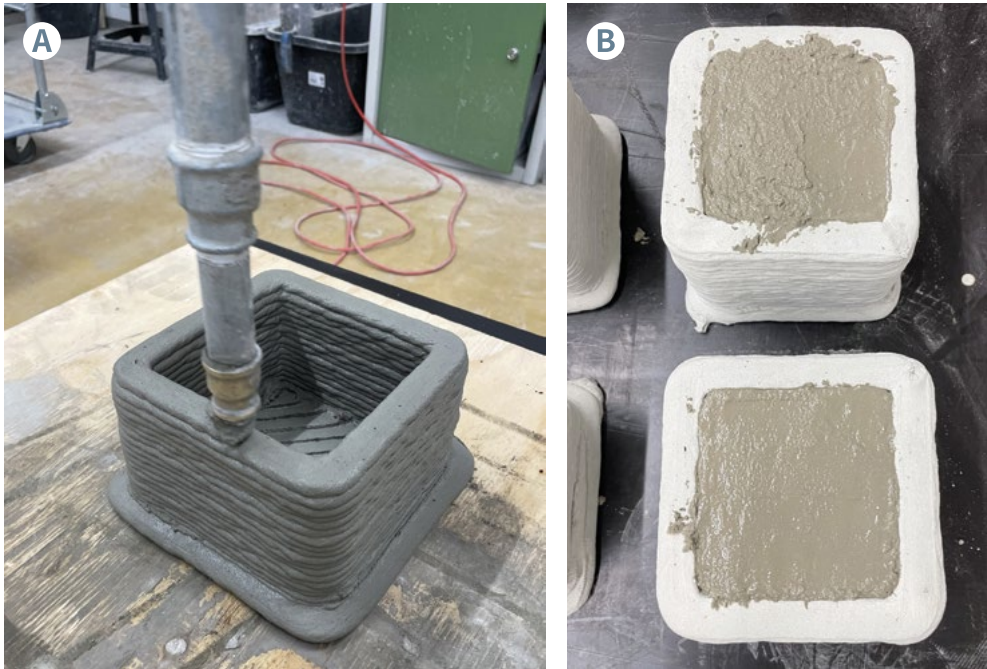


Abbildung 1: A) Druckprozess der Probekörper, B) nachträgliches Verfüllen des Zwischenraums mit Beton (eigene Darstellung)

Zur Bestimmung des Karbonatisierungsverhaltens wurden die Probekörper einer beschleunigten Karbonatisierung unterzogen, der Versuchsaufbau ist in Abbildung 2a) dargestellt. Dieser besteht aus einer luftdichten Karbonatisierungskammer, welche von der Oberseite mit den Probekörpern beschickt werden kann. Der Deckel ist gasdicht mit dem Edelstahlbehälter verschraubt, sodass eine unverfälschte Zwangsdurchströmung der Prüfkörper mit der Versuchsatmosphäre mittels der integrierten Ventilatoren gewährleistet werden kann. Dabei erfolgte die Beaufschlagung mit CO_2 unter definierten Bedingungen mit einer Konzentration von 20 % und einer Temperatur von 25–35°C. Damit soll der natürliche Karbonatisierungsprozess in kurzer Zeit nachgestellt werden. Unter realen Bedingungen würde dieser Prozess aufgrund der geringen CO_2 -Konzentration von ca. 0,04 Vol.-% in der Luft mehrere Jahre dauern. Um den Prozess zu beschleunigen, wurden die maßgeblichen Einflussgrößen CO_2 -Konzentration, Temperatur und Luftfeuchtigkeit so gewählt, dass eine beschleunigte Karbonatisierung möglich ist (Pfeifer et al., 2023).

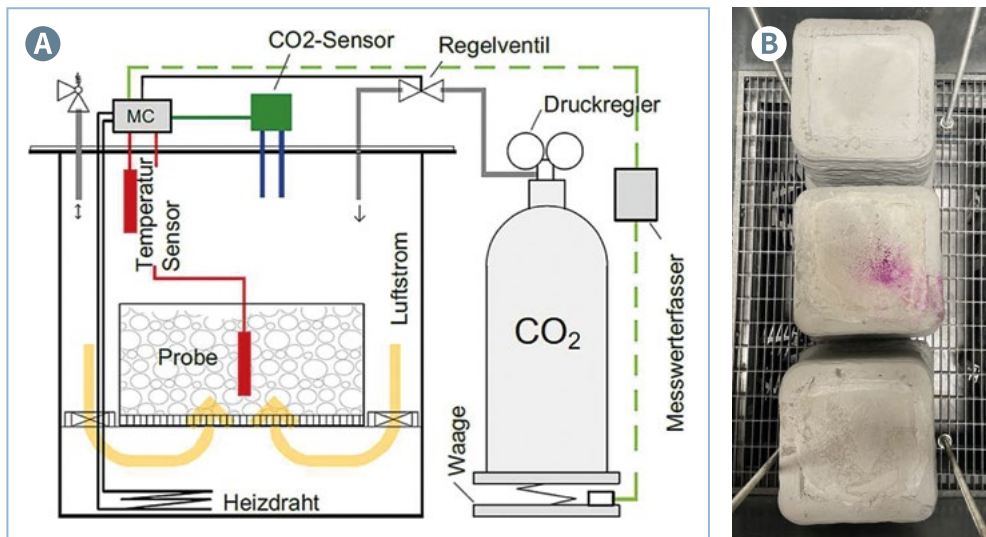


Abbildung 2: A) Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus (eigene Darstellung), B) Probekörper der Serie 2 in der Karbonatisierungskammer (eigene Darstellung)

Nach einer Dauer von elf Tagen wurden die Prüfkörper entnommen, in der Mitte gespalten und die Karbonisierungstiefe sowie das Karbonisierungsverhalten durch das Aufbringen einer Indikatorlösung bestimmt. Insgesamt wurden zwei Serien mit jeweils drei Probekörpern hergestellt und karbonatisiert.

Ergebnisse

Der Versuchsauswertung zufolge konnten keine signifikanten Unterschiede im CO₂-Eindringverhalten zwischen den verschiedenen Schichtstärken festgestellt werden. Dies lässt darauf schließen, dass unabhängig von der Schichtstärke ein ausreichender Materialverbund zwischen den Druckschichten besteht.

Abbildung 3 zeigt einen der mittig gespaltenen Prüfkörper A vor und B und C nach dem Aufbringen der Indikatorlösung. Die nicht karbonatisierten Bereiche zeigen eine rosa-violette Färbung, während die karbonatisierten Bereiche farblos bleiben. Es zeigt sich, dass der karbonatisierte Bereich den gedruckten Betonquerschnitt nicht überschreitet und im Mittel ca. 10 mm beträgt.

Weiterhin ist zu erkennen, dass in der Fuge zwischen dem Druckbeton und dem gegossenen Normalbeton kein CO₂ eingedrungen ist. Zudem zeigt sich, dass die Eindringtiefe im Bereich des Druckbetons geringer ist als im Bereich des Vergussbetons.

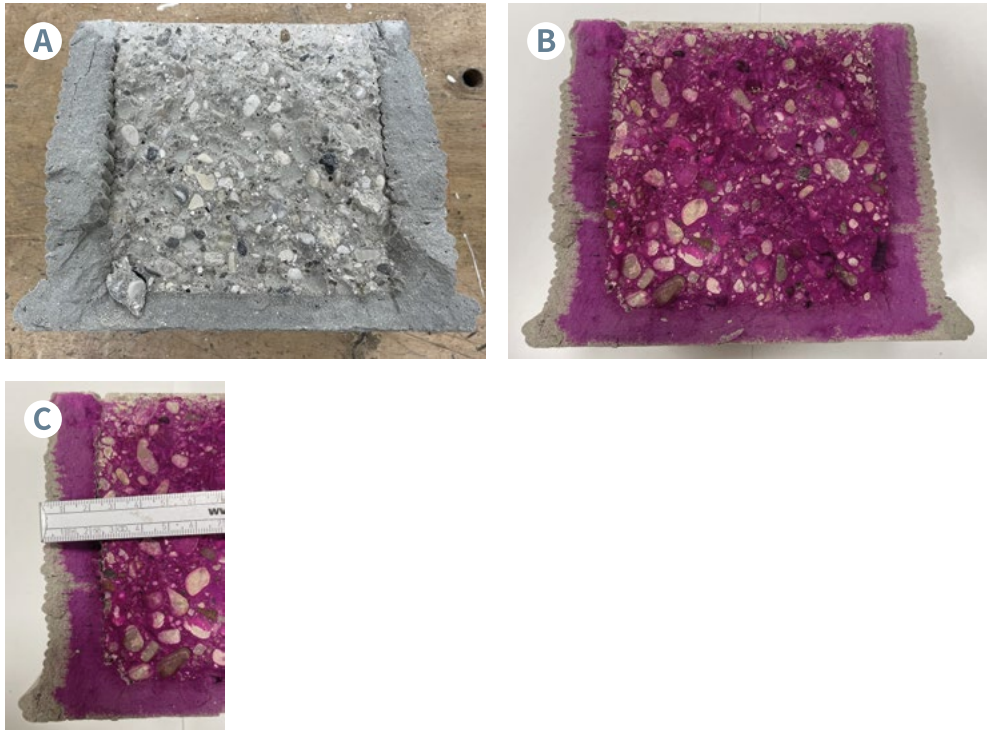


Abbildung 3: Probekörper nach der beschleunigten Karbonatisierung, A) vor sowie B) und C) nach Aufbringen der Indikatorlösung zur Bestimmung des Karbonatisierungswiderstands (eigene Darstellung)

Pro Karbonatisierungsvorgang befanden sich drei Probekörper in der Karbonatisierungskammer. Abbildung 4 zeigt die CO_2 -Aufnahme [g] in Abhängigkeit von der Dauer [d]. Zu Beginn zeigt sich eine schnelle CO_2 -Aufnahme, was auf eine rasche Karbonatisierung der Oberfläche zurückzuführen ist. Danach verläuft der Karbonatisierungsfortschritt mit einer deutlich flacheren Steigung.

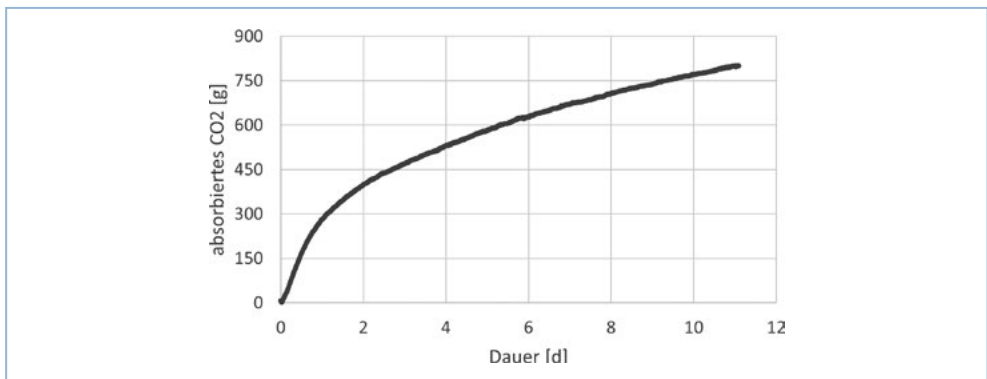


Abbildung 4: CO_2 -Aufnahme der Probekörper der Serie 2 in [g] (eigene Darstellung)

Zusammenfassung und Ausblick

Die Auswertung der ersten Versuchsserien zeigt, dass kein Eindringen von CO₂ durch den Druckbeton bzw. im Anwendungsfall durch die verlorene Schalung in den Vergussbeton erfolgt. Die unterschiedlichen Schichtstärken beeinflussen diesen Karbonatisierungswiderstand nicht maßgebend. Auch die Materialfuge zwischen verlorder Schalung und Ortbeton erweist sich in den bisher durchgeführten Versuchsreihen als unkritisch. Somit deuten die ersten Ergebnisse darauf hin, dass eine Anrechenbarkeit der Betondeckung grundsätzlich möglich sein kann. Jedoch sind weiterführende Versuchsreihen unter unterschiedlichen Randbedingungen erforderlich, um diese Erkenntnisse zu validieren.

Referenzen

- Burger, J., Huber, T., Lloret-Fritschi, E., Mata-Falcón, J., Gramazio, F., & Kohler, M. (2022). Design and fabrication of optimised ribbed concrete floor slabs using large scale 3D printed formwork. *Automation in Construction*, *144*, 104599.
- 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>
- Pfleger, M.-P., Sam, N., Radl, E., & Vill, M. (2024). Data-driven design process and production of stress-optimized concrete girders with integrated tendons using 3D printing. In *IABSE Symposium San Jose 2024* (pp.525–532). <https://doi.org/10.2749/sanjose.2024.0525>