

Shotcrete 3D Printing (SC3DP) vs. konventionell gefertigte Betonelemente: ein Vergleich des Carbonatisierungsverhaltens

Shotcrete 3D Printing (SC3DP) vs. conventionally fabricated concrete elements: a comparison of the carbonation behavior

Dressler, I.; Schuler, D.; Nordsiek, S.; Lowke, D.

1. Motivation

Additive Fertigungsverfahren sind heute in vielen Industrien Stand der Technik. Die Bauindustrie hingegen liegt im Vergleich zu anderen Branchen deutlich zurück. Neben einigen herausragenden Entwicklungen - wie z.B. die der TU Eindhoven [1], Smart Dynamic Casting [2], XTree [3] oder WinSun [4] - gibt es wenige großmaßstäbliche und keinerlei zugelassene 3D-Betondrucktechnologien. Dies kann u.a. auf den konservativen Charakter der Bauindustrie zurückgeführt werden. Die Mehrzahl der Bauprozesse ist seit Jahrzehnten nahezu unverändert. In diesem Kontext hat die Einführung der robotergestützten Fertigung ein hohes Potenzial.

Für das Shotcrete 3D-Printing (SC3DP)-Verfahren sind mit der Oberflächenbearbeitung und der Bewehrungsintegration bereits zwei wesentliche Voraussetzungen für eine zukünftige baupraktische Anwendung vorhanden, was dieses Verfahren für einen exemplarischen Vergleich additiver und konventioneller Fertigungstechniken im Stahlbetonbau als geeignet erscheinen lässt.

Mit dem SC3DP-Verfahren können bereits hohe Festigkeiten im Bereich von C55/67 erreicht werden, wobei die Druckfestigkeit maßgeblich vom Verbund der einzelnen Schichten abhängt. Diese wird im Wesentlichen prozessseitig beeinflusst. Für die industriennahe Anwendung ist neben den Kenntnissen über eine potentielle Anisotropie auch die Dauerhaftigkeit des Materials von maßgeblichem Interesse. Daher wird in diesem Kurzbericht ein Vergleich der konventionellen Herstellung von Betonbauteilen mit der additiven Fertigung im SC3DP-Verfahren angestrebt.

2. Material und Methoden

Diese Untersuchung hat zum Ziel, die additiv und konventionell hergestellten Probekörper hinsichtlich ihres Carbonatisierungsverhaltens miteinander zu vergleichen. Hierfür werden die in Tabelle 1 verwendeten Rezepturen verwendet.

Mittels eines Spritzbetonroboters werden Spritzbetonstreifen hergestellt. Das verwendete Verfahren ist näher in [5] beschrieben. Aus den Spritzstreifen werden Prismen (40x40x160 mm³) mittels Sägeschnitten gewonnen. Zudem wurde der selben Betoncharge Material entnommen, welches in Schalungen befüllt und mittels Rütteln verdichtet wurde. Alle hergestellten Probekörper werden bei 20 °C und 65 % r. LF gelagert.

Tabelle 1: Mischungszusammensetzung des verwendeten Betons

Komponente	Menge	Einheit
CEM I 52,5 R (OPC)	600	kg/m ³
Kalksteinmehl	97	kg/m ³
Gesteinskörnung d= 0 – 3,15 mm	1258	kg/m ³
Wasser	270	kg/m ³
Fließmittel	0.4	M.-%/Z.
Stabilisierer	0, 0.1, 0.2	M.-%/Z.
Beschleuniger	0, 2, 4	M.-%/Z.

Vor der Beaufschlagung mit CO₂ werden die Prismen von fünf Seiten mit Epoxidharz abgedichtet. Die untersuchten Probekörperbezeichnungen sind in Abbildung 1 gezeigt. Unterschieden werden konventionell als auch mittels SC3DP-Verfahren hergestellte Probekörper. Letztere werden hinsichtlich drei unterschiedlicher Fugenanordnungen untersucht: i) in Schichtrichtung exponierte Probekörper mit einer Zwischenschicht (SC3DP, II1), orthogonal zur Zwischenschicht exponierte Probekörper (SC3DP, I) und iii) in Schichtrichtung exponierte Probekörper mit 2 Zwischenschichten (SC3DP, II2).

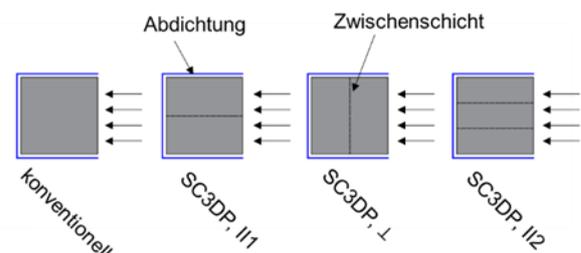


Abbildung 1: Schematische Skizze der untersuchten Probekörper

Die Probekörper wurden 5 Tage lang in einem Klimaschrank bei 20 °C und 3 Vol.-% CO₂-Konzentration gelagert. Anschließend wurden diese gespalten und die Bruchfläche mit Phenolphthalein besprüht.

Die Carbonatisierungstiefe wird an 20 äquidistanten Stellen bestimmt, um eventuelle Inhomogenitäten beim Carbonatisierungsverhalten erfassen zu können. Hierfür wird ein Foto der Bruchfläche ausgewertet, vgl. Abbildung 2. Ergänzend werden Computertomographieaufnahmen von den Probekörpern erstellt. Diese dienen der qualitativen Identifikation von Poren und Porenverteilungen.

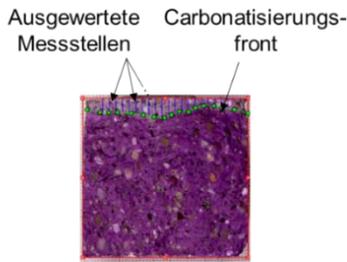


Abbildung 2: Auswertemethodik zur Evaluierung der Carbonatisierungstiefe

3. Ergebnisse

In Abbildung 3 sind die Carbonatisierungstiefen nach 5 Tagen Exposition für additiv und konventionell hergestellte Proben gezeigt. Die konventionell hergestellten Proben weisen eine höhere Carbonatisierungstiefe als die additiv gefertigten Proben auf. Dies könnte darauf zurückgeführt werden, dass die Rohdichte von den konventionell gefertigten Proben marginal niedriger ist als von additiv gefertigten Betonproben (2.1 kg/m^3 bzw. 2.2 kg/m^3). Dies wird auf einen insgesamt leicht reduzierten Luftporengehalt bei SC3DP-gefertigten Proben zurückgeführt, der aus der hohen kinetischen Energie beim Spritzbetonauftrag resultiert [6] (vgl. auch qualitativ Abbildung 4 links und rechts). Ein geringerer Luftporengehalt im Material führt zu einer geringeren Permeabilität, [7] u.a., und folglich zu einem höheren Carbonatisierungswiderstand.

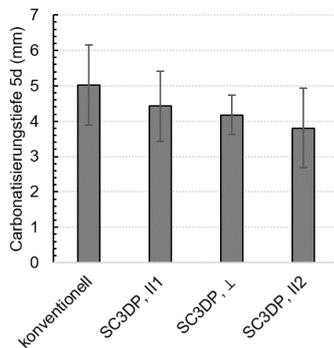


Abbildung 3: Carbonatisierungstiefe nach 5 Tagen in konventionell und mittels SC3DP-Verfahren hergestellte Probekörper

Darüber hinaus wurde für SC3DP-Probekörper ein Einfluss der Anordnung des Zwischenschichtbereiches festgestellt. So weisen die Probekörper SC3DP-II1 und SC3DP-I eine höhere mittlere Carbonatisierungstiefe als SC3DP-II2 auf.

Dies wird auf den überproportional hohen Anteil des Zwischenschichtbereiches im Probekörper zurückgeführt. Obwohl diese Zwischenschicht bei SC3DP-Proben tendenziell zementleimreicher ist, was erwartungsgemäß mit einer Erhöhung der Carbonatisierungstiefe einhergeht, ist dieser auch gleichzeitig deutlich porenärmer, vgl. Abbildung 4 rechts (blauer Pfeil markiert den Zwischenschichtbereich) und [6]. Somit reduziert sich die Carbo-

natisierungstiefe in der Zwischenschicht gegenüber der restlichen Probe. Zudem beinhaltet der Bereich unmittelbar oberhalb der Zwischenschicht oftmals einen gegenüber der restlichen Probe erhöhten Anteil an Luftporen, sodass hier wiederum eine leicht erhöhte Carbonatisierungstiefe festgestellt wurde. Die Ergebnisse sind qualitativ auch in Abbildung 5 dargestellt.

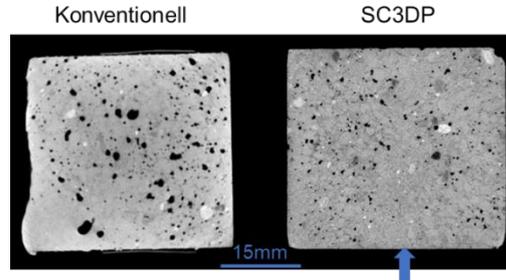


Abbildung 4: Computertomographieaufnahme eines konventionell hergestellten (links) und eines additiv gefertigten (rechts) Probekörpers. Der blaue Pfeil markiert den Zwischenschichtbereich.

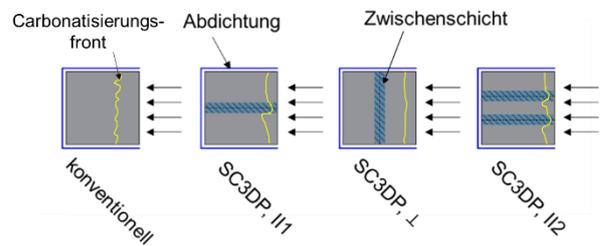


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Carbonatisierungsfrenten in den untersuchten Probekörpern

4. References

- [1] TU Eindhoven, 3D Concrete Printing: 3DCP Houses, 2019, <https://www.tue.nl/en/research/research-groups/structural-engineering-and-design/concrete-research-areas/3d-concrete-printing/>, accessed 28 August 2019.
- [2] E. Lloret-Fritsch, T. Wangler, L. Gebhard, J. Mata-Falcón, S. Mantellato, F. Scotto, J. Burger, A. Szabo, N. Ruffray, L. Reiter, F. Boscaro, W. Kaufmann, M. Kohler, F. Gramazio, R. Flatt, From Smart Dynamic Casting to a growing family of Digital Casting Systems, *Cement and Concrete Research* 134 (2020) 106071.
- [3] XtreeE, The large-scale 3D, 2020, <https://xtreee.com/>, accessed 29 November 2020.
- [4] Winsun, 3d Printing Architecture's Future, <http://www.winsun3d.com/En/Index/>, accessed 16 October 2019.
- [5] I. Dressler, N. Freund, D. Lowke, The Effect of Accelerator Dosage on Fresh Concrete Properties and on Interlayer Strength in Shotcrete 3D Printing, *Materials (Special Issue Concrete 3D Printing and Digitally-Aided Fabrication)* 13 (2020) 1–19.
- [6] H. Kloft, H.-W. Krauss, N. Hack, E. Herrmann, S. Neudecker, P. Varady, D. Lowke, Shotcrete 3D Printing (SC3DP) A robot-guided technology for Additive Manufacturing of large-scale reinforced concrete components, *Cement and Concrete Research (special issue)* 134 (2020).
- [7] F. Jacobs, Permeabilität und Porengefüge zementgebundener Werkstoffe. Dissertation, Zürich, 1994.