

GRUNDLEGENDE MATERIALSTUDIEN ZUR ADDITIVEN FERTIGUNG VON SPANNBETONBAUTEILEN

Marc-Patrick PFLEGER^{*a} and Christian HÖLZL^a

^a FH Campus Wien, University of Applied Sciences Vienna, Austria

* Corresponding Author: marc-patrick.pfleger@fh-campuswien.ac.at

Abstract. Zur additiven Herstellung von topologieoptimierten Spannbetonbauteilen ist es nötig, das eingesetzte Material bzgl. seiner Eigenschaften, Versagensformen und Verarbeitungsparameter genau zu kennen. Aufgrund des schichtweisen Aufbringens des Materials bei der additiven Fertigung ist im Speziellen das Verhalten von hochfesten Betonen in Bezug auf ihre Brucheigenschaften zu untersuchen. Die Studien zeigen orientierend nach welchen Gesichtspunkten Objekte für den 3D Druck, bezogen auf den sich bei der Fertigung ergebenden Schichtverlauf, geplant werden müssen. In praktischen Versuchen werden die günstigeren Brucheigenschaften von extrudierbaren Faserbetonen gezeigt und ihre Verarbeitbarkeit untersucht. Dadurch können wichtige Grundsätze zur Ausbildung von 3D gedruckten Bauteilen in Abhängigkeit ihrer geplanten Beanspruchung abgeleitet werden. Insbesondere sind die höchstbelasteten Ankerbereiche von 3D gedruckten Bauteilen im Fall einer Vorspannung genau zu analysieren.

Keywords: Additive Fertigung, Beton 3D Druck, Faserbeton, Betonbau

1 EINLEITUNG

Additive Fertigungsverfahren führen in verschiedenen Branchen zu völlig neuen Möglichkeiten der Produktion. Prototypen, Einzelstücke und Kleinserien können kosten- und materialeffizient hergestellt werden. International werden zahlreiche Forschungs- und Entwicklungsprojekte im Bereich des automatisierten Bauens durchgeführt. Eine Vielzahl an Beispielen zur additiven Fertigung von Gebäuden kann hier genannt werden. [1],[2],[3],[4],[5] Die genauere Analyse zeigt jedoch, dass zumeist massive Gebäudeteile, vorrangig Wände, aus Beton gedruckt werden, wobei durch das fehlende Auflösen der Strukturen keine Materialeinsparung zu verzeichnen ist. Speziell im Hinblick auf die Minimierung der Umweltwirkung von Beton (min. 8% der weltweiten CO₂ Emissionen sind auf die Zementherstellung zurückzuführen) [6] wäre eine gezielte Materialapplikation, entsprechend der statischen Erfordernisse, anzustreben. Dünnwandige Betondruckteile finden bis dato zumeist noch keine konstruktive Anwendung. Das hier übergeordnete Forschungsziel beabsichtigt die Herstellung von topologieoptimierten, dünnwandigen gedruckten Betonbauteilen. Diese sollen durch den Einbau von Spannbewehrung ohne und mit

nachträglichem Verbund Biegebeanspruchungen aufnehmen können. Die Produktion der Versuchsträger soll in Segmenten stattfinden, die über Schubverzahnungen und Vorspannelemente verbunden werden. Dazu sind im Vorfeld umfangreiche experimentelle Studien nötig, um das Materialverhalten besser zu kennen und Bemessungs- sowie Konstruktionsgrundsätze ableiten zu können, um auf den Einbau von schlaffer Bewehrung verzichten zu können.

2 PROBLEMSTELLUNG UND METHODEN

Der additive Herstellungsprozess bedingt die schichtweise Aufbringung des Materials zum Aufbau von Objekten. Dadurch ist es nicht oder nur erschwert möglich in einem automatisierten Ablauf konventionelle, schlaaffe Bewehrungselemente in einen Querschnitt einzubinden. Mit der Absicht biegebeanspruchte Bauteile zu produzieren, werden eigens entwickelte Betone mit und ohne Faserzugabe und Vorspannelemente eingesetzt, die in Spankanälen geführt werden sollen. Diese müssen bereits beim Druck hergestellt werden. Es ergeben sich vielfältige Fragestellungen betreffend das Materialverhalten am gedruckten Objekt, bspw. den Lagenverbund an den Schichtgrenzen, den Einfluss auf Druck-, Schub- und Zugfestigkeiten in Abhängigkeit der Kraftrichtung, etc. Festzuhalten ist, dass typische Prüfverfahren an gegossenen Prismen, Würfeln oder Zylindern nur unzufriedenstellende Ergebnisse und Rückschlüsse auf das Verhalten von Bauteilen liefern, wenn diese additiv gefertigt wurden.



Abb. 1. Gedruckte Prüfprismen für Biege- und Druckfestigkeitsversuche (li.); gedrucktes Prisma (160x40x40mm) im Biegezugversuch (re.)

Der lagenweise Aufbau der Druckobjekte verlangt ein verzögertes Abbinden der eingesetzten Betonrezepturen, um eine ausreichende Verarbeitungszeit des Materials gewährleisten zu können. [7] Weiters sollen über einen möglichst einheitlichen Hydratationsprozess homogene Materialeigenschaften am gedruckten Objekt erreicht werden, die vor allem vom Verbund des Materials an den Kontaktflächen beeinflusst werden.

2.1 BRUCHEIGENSCHAFTEN VON BETONREZEPTUREN OHNE FASERZUGABE

Die Kontaktflächen der einzelnen Druckstränge bilden wie in Abb. 2. dargestellt potenzielle Schwachstellen eines additiv hergestellten Bauteils. Begründet kann dies durch den

mangelnden Verbund bei ungeeigneter Betonrezeptur, bspw. durch einen zu raschen Abbindeprozess, aber auch durch die herstellungsbedingten Einschnürungen zwischen den einzelnen Materialschichten werden.



Abb. 2. Schichtweiser Materialauftrag mit unterschiedlichem Betonalter bzw. Hydratationsfortschritt (li.); Veranschaulichung der potenziellen Schwachstelle „Kontaktfläche“ durch Querschnittsverminderung (re.)

Sofern kein mechanisches Glätten der Oberflächen stattfindet, ist ein wulstartig geschichteter Querschnitt typisch für dieses Herstellungsverfahren. Durch Untersuchung der Rissverläufe im Scherversuch mit Betonen ohne Faserzugabe konnte, wie zunächst theoretisch angenommen, eine Häufung des Versagens der Kontaktflächen festgestellt werden Abb. 3.

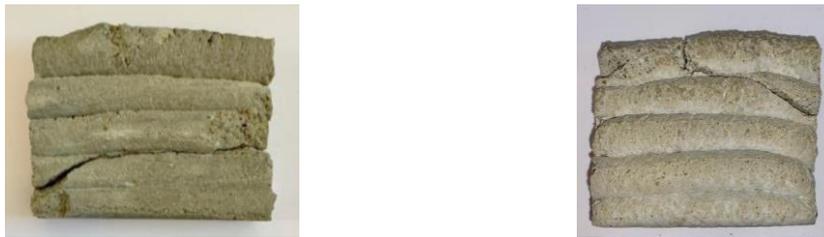


Abb. 3. Rissverlauf in der Kontaktfläche als häufigste Versagensform im Scherversuch parallel zur Schichtung

2.2 BRUCHEIGENSCHAFTEN VON BETONREZEPTUREN MIT FASERZUGABE

Die Fragestellung nach der Wirksamkeit von Faserbeimengungen bei der additiven Fertigung mit Beton ergibt sich durch eine theoretisch ungewollte Orientierung durch den Extrusionsprozess. Das passiert einerseits durch die Förderung des Betons über eine Schlauchleitung von der Pumpe bis zum Extruder, andererseits jedoch auch zusätzlich durch die kontinuierliche Vorwärtsbewegung der Düse selbst, siehe Abb. 4.



Abb. 4. Trockenbestandteile der entwickelten Betonmischung (li.); Stahl- und PP-Fasern (Mitte); Ungewünschte, prozessbedingte Orientierung der Fasern parallel zur aufgetragenen Betonschicht (re.)

Diese Eckdaten begründen die Annahme der lediglich unwesentlichen Verbesserung der Brucheigenschaften durch den Einsatz von Faserbetonen in Druckprozessen. [8] Erneut ist im Scherversuch das am häufigsten auftretende Bruchbild untersucht worden, wobei unterschiedliche Betonrezepturen geprüft worden sind. Vorrangig unterscheiden sich diese in der Art, Länge und Menge der eingemischten Fasern. Dadurch konnten zusätzliche Rückschlüsse auf die Verarbeitbarkeit des Materials gezogen und Grenzwerte für die mögliche Faserbeimengung definiert werden, sodass Verklumpungen während der Extrusion vermieden werden können.



Abb. 5. Häufigster Versagensfall bei faserverstärkten Betonen: Abscheren über mehrere Schichten (li.), Fasern durchdringen und überbrücken die Kontaktflächen (re.)

Nach der Durchführung der Serienversuche bis zum Versagen der Prüfkörper zeigt sich eine Häufung des Bruchbilds wie in Abb. 5 ersichtlich. Der Riss tritt nicht mehr in der Kontaktfläche auf, sondern entsteht schräg über mehrere Lagen des Prüfkörpers. Die Folge ist, dass in Abhängigkeit der Rezeptur deutlich höhere Materialfestigkeiten zu verzeichnen sind. Anhand der gelegentlichen Rissbildung an den Kontaktflächen der Betonstränge kann gezeigt werden, dass durch Absinken der Fasern ein Verbund der einzelnen Schichten erfolgen kann.

3 ERGEBNISSE UND AUSBLICK

Durch umfangreiche Versuchsreihen konnten Beton- bzw. Mörtelrezepturen gefunden werden, die zur additiven Fertigung von Betonbauteilen geeignet sind. Insbesondere konnten die hier dargestellten vorteilhaften Eigenschaften von Fasereinmischungen herausgearbeitet werden. Die günstigsten Ergebnisse sind hierbei mit maximal 8mm langen Polypropylenfasern erzielt worden, wohingegen Stahl- bzw. allgemein Metallfasern als ungeeignet für dünnwandige Drucke erscheinen. Diese Tatsache begründet sich vorwiegend aus der schlechten Extrudierbarkeit von zu starren Fasern. In den weiteren Schritten des übergeordneten Projekts „C3PO – Concrete!3D Printed Objects“, das von der MA23 der Stadt Wien gefördert wird, sollen hochfeste Betone zur Herstellung von dünnwandigen Tragsystemen eingesetzt werden.

Serie	Typ	Binde- mittel	GK [mm]	W/B- Wert	Fasern [M-%]	Zus.	Druck- festigkeit [N/mm ²]	Biegezug- festigkeit [N/mm ²]	Spaltzug- festigkeit [N/mm ²]
1	Guss	CEM II/A-L 42,5N	0-2	0,34	Keine	PCE-Fließm.	48,2	4,9	5,1
2	Druck	CEM II/A-L 42,5N	0-2	0,38	PP, 8mm, 0,5%	PCE-Fließm.	39,4	6,15	5,7
3	Druck	CEM II/B-S 52,5R	0-2	0,30	PP, 8mm, 0,5%	PCE-Fließm.	41,7	7,0	6,4
4	Guss	CEM I 52,5R	0-2	0,24	Keine	Microsilika, PCE-Fließm.	118,2	17,4	10,9
5	Druck	CEM I 52,5R	0-2	0,26	PP, 8mm, 0,5%	Microsilika, PCE-Fließm.	105,5	11,8	8,2

Tab. 1: Zusammensetzung und Prüfergebnisse (gem. zert. Materialprüfanstalt) ausgewählter Rezepturen

Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf der Optimierung von Querschnittsformen, einerseits durch die erhöhte Materialfestigkeit, andererseits auch durch die Möglichkeit zur gezielten Applikation des Betons. Der Einsatz von additiven Fertigungsmethoden im Betonbau bietet bis dato einzigartige Möglichkeiten zur Optimierung von Querschnittsformen und damit eine deutlich reduzierte Umweltwirkung im Betonbau.

4 LITERATUR

- [1] Paolini, A./Kollmannsberger, S./Rank, E.: Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications and digital planning methods. Additive Manufacturing 30, 2019.
- [2] Wu, P./ Wang, J./Wang, X.: A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. Automation in Construction, 68, 21–31. 2016.
- [3] Butler-Millsaps, B.: WASP Makes Progress on House 3D Printing With Modular Printed Reinforced Concrete Beams. <https://3dprint.com/88467/waspmakes-progress-on-house-3d-printing-with-modular-printed-reinforced-concretebeams/>.
- [4] Martens, P./Mathot, M./Bos, F./Coenders, J.: Optimising 3D Printed Concrete Structures Using Topology Optimisation. Springer International Publishing, 301–309, 2018.
- [5] Buswell, R./Soar, R./Gibb, A./Thorpe, A.: Freeform construction: mega-scale rapid manufacturing for construction. Automation in Construction 16, 224–231, 2007.
- [6] Mauschwitz G, Emmissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie, Berichtsjahr 2018. Technical University of Vienna, 2019.
- [7] Marchon, D./Kawashima, S./Bessaies-Bey, H./Mantellato, S./Ng, S.: Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: Potential admixtures and cement chemistry. Cement and Concrete Research 112, 96–110, 2018.
- [8] Öcel, C. and Yücel, K.T: Effect of cement content, fibers, chemical admixtures and aggregate shape on rheological parameters of pumping concrete. Arabian Journal for Science and Engineering, 28, 1059–1074. 2013.