

Ressourcenschonende Tragwerksoptimierung von Flachdecken durch 3D-gedruckte Hohlkörper aus Beton

Marc-Patrick Pfleger, Hochschule Campus Wien
Elisabeth Radl, Hochschule Campus Wien
Nina Sam, Hochschule Campus Wien
Markus Vill, Hochschule Campus Wien

Abstract: Beim Bau mehrgeschossiger Wohngebäude in Stahlbetonbauweise entfällt etwa die Hälfte des Betonvolumens auf Deckenkonstruktionen, die meist unabhängig von der tatsächlichen Kraftverteilung als monolithische Bauteile ausgeführt werden. Da die Zementproduktion rund 8 % der globalen anthropogenen CO₂-Emissionen verursacht, stellt die Reduzierung des Betonverbrauchs einen wichtigen Ansatz zur Emissionsminderung dar. Um Einsparungsmöglichkeiten zu untersuchen, wurde ein Deckenelementprototyp mit integrierten, 3D-gedruckten Betonhohlkörpern entwickelt. Die im Extrusionsverfahren hergestellten Hohlkörper wurden auf der unteren Bewehrungslage positioniert und in das konventionell betonierte Bauteil integriert. Die Tragfähigkeit wurde mittels 4-Punkt-Biegeversuch untersucht und mit numerischen Berechnungen verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Integration additiv gefertigter Hohlkörper technisch realisierbar ist und eine materialeffizientere Gestaltung von Stahlbetondecken ermöglicht.

Keywords: 3D-Betondruck, Additive Fertigung, Materialeinsparung, Strukturoptimierung, Experimentelle Untersuchungen

1. EINLEITUNG

Die Entwicklungen im Bereich der additiven Fertigung mit Beton und Mörteln nehmen global zu. Über zahlreiche internationale Forschungsvorhaben wurde gezeigt, dass der 3D-Betondruck inzwischen eine zuverlässige Produktionsweise für Betonteile darstellen kann und durch seine Formfreiheit wesentliche Vorteile ausspielen kann [1]. Derzeit besteht noch großer Forschungsbedarf im Bereich der Bewehrungsintegration im 3D-Betondruck und dementsprechend der Fertigung von konstruktiven, biegebeanspruchbaren Voll-Fertigteilen [2]. Aus diesem Grund finden sich derzeit verschiedene Anwendungsgebiete des 3D-Betondrucks in der Herstellung von nicht selbsttragenden Elementen [3]. In diesem Zusammenhang wären beispielsweise Schalungselemente zu nennen, die im Betonkörper bzw. im fertiggestellten Bauwerk verbleiben können. Auf diese Weise können Konstruktion und Bemessung mit herkömmlichen Regeln des Betonbaus stattfinden, jedoch die Vorteile des 3D-Betondrucks im Sinne der Formfreiheit und Potenziale zur Materialeinsparung genutzt werden. Durch den Einsatz solcher Elemente können komplexe rippenartige Betondecken effizient mit innenliegenden Hohlkammern hergestellt werden.

Idealerweise werden parametrische Planungsansätze zur Produktionsdatengenerierung eingesetzt, um die Schalungs- oder Hohlkörperelemente individualisiert herstellen zu können. Die geometrische Anpassung der Verdrängungskörper kann die statisch-konstruktiv benötigte Ortbetonmasse, im Vergleich zu konventionellen Konstruktionen, reduzieren.

Im Zuge der Arbeit wurde anhand eines Modellversuchs das Trag- und Rissverhalten von in Standardbeton integrierten 3D-gedruckte Schalungselementen untersucht und mit den Ergebnissen aus nicht-linearen FEM-Berechnungen verglichen.

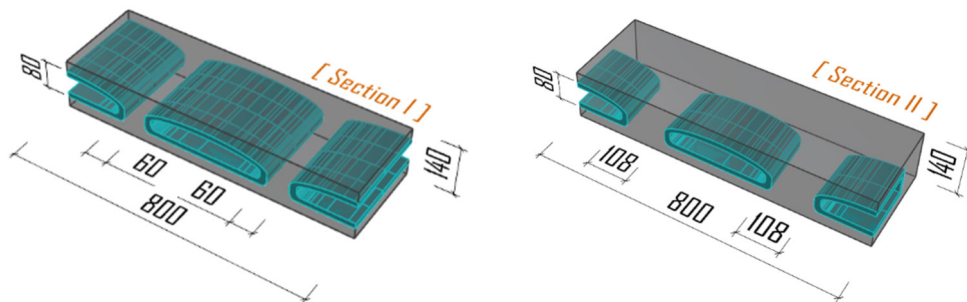
2. METHODIK

2.1. Material und 3D-Druck Anlage

Die Herstellung der 3D-gedruckten Hohlkörperelemente aus Beton erfolgte mit einer Druckanlage, im Extrusionsverfahren, bestehend aus einem 6-Achs-Knickarmroboter auf einer 7 m langen Verfahrachse in Kombination mit einer MAI Pictor Schneckenpumpe zur Materialförderung. Der Druckbeton wird mit Schichtdicken von 5-8 mm strangförmig extrudiert. Für die Probekörper wird eine eigens entwickelte Betonrezeptur verwendet, die auf dem Standardzement CEM II C-M 42,5N basiert und ein 1-Komponenten-Material darstellt. Das Größtkorn des Zuschlagstoffs beträgt 2 mm. Die Nachbehandlung der Probekörper erfolgte durch Abdecken mit einer Folie, um die Bauteile vor vorzeitigem Austrocknen zu schützen.

2.2. Konzeption des Prüfkörpers

Um die realen Gegebenheiten einer Stahlbetondecke zu simulieren, soll der Demonstrator in Form eines maßstäblich verkleinerten Bauteils umgesetzt werden. Das Größenverhältnis wird mit 1:1,5-2 gewählt, die Abmessungen sind in Abbildung 1 dargestellt. Vorab definiert wurde, dass eine klassische Ortbetonoberfläche sowie Untersicht hergestellt werden soll, um ein äußerlich konventionelles Erscheinungsbild zu erzeugen und demnach im Praxiseinsatz übliche weitere Verarbeitungsschritte durchzuführen. Die geplanten Hohlkörper sollen auf Basis bereits durchgeführter Voruntersuchungen [4] einerseits für die geplante Betondeckung verwendet werden, andererseits im Bereich der statisch wirksamen Druckzone dem fertigen Betonquerschnitt angerechnet werden.



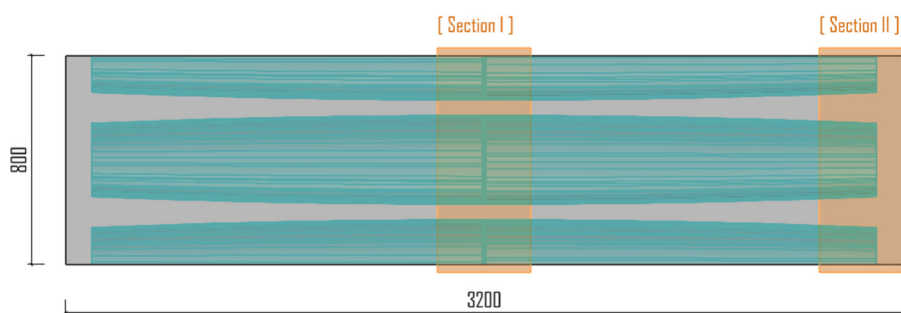


Abbildung 1: Modelldarstellung des Gesamtprototyps im Querschnitt und Grundriss; in türkis die 3D-Druckelemente und in grau der Ort beton

Für die Herstellung des Demonstrators soll normalfester Beton mit üblicher Güte verwendet werden. Aufgrund der maßstäblichen Verkleinerung der Probe wird das einzusetzende Größtkorn auf 16 mm beschränkt. Die Füllbetonrezeptur basiert auf Zementsorte CEM II C-M 42,5N mit einem Klinkergehalt von ca. 50 M-% und einer mittleren Druckfestigkeit von $f_{cm,cube150}=43,5 \text{ N/mm}^2$.

Tabelle 1: Übersicht der verwendeten Materialien, Massen und Klinkergehalte des Demonstrators einschließlich Optimierungsschritten im Zusammenhang mit 3D-gedruckten Hohlkörper-Schalungselementen.

	Volumen [m ³]	Dichte [g/cm ³]	Masse [kg]	Masse [%]	Klinkeranteil [kg]	Klinkeranteil [%]
Demonstrator V0	0,3585	2,31	827	100	68	100
Hohlkörper	0,0608	2,08	126	15	23	+17
Hohlräume	0,0758	-	-	-	-	-39
Ortbeton	0,2218	2,31	512	62	42	
Demonstrator V1	0,2826	2,24	633	76	65	78

Die Tragfähigkeit der beschriebenen Geometrie wird mithilfe der Software INCA 2 auf Grundlage einer nicht-linearen Berechnung analysiert. Der anschließende Versuch dient der Validierung der erzielten Berechnungsergebnisse.

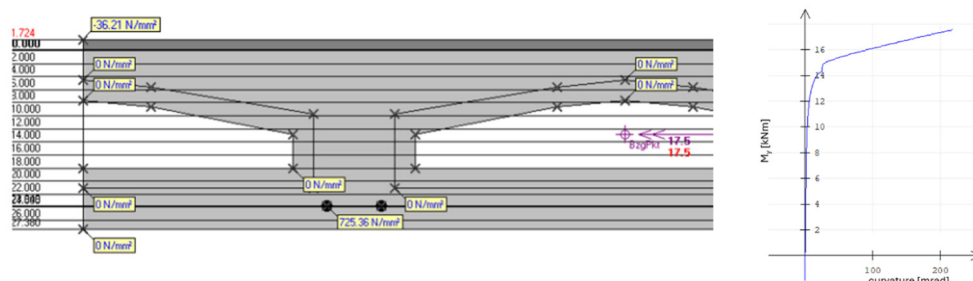


Abbildung 2: Darstellung der Spannungs-Dehnungs-Analyse des Querschnitts in INCA 2 im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS, links) und der Moment-Krümmungs-Interaktion (rechts)

2.3. Additive Fertigung der Hohlkörperelemente

Für die Herstellung des Demonstratorbauteils sind zwei volle Sets an Hohlkörpern notwendig. Dadurch, dass diese spiegelsymmetrisch sind, muss jedes Einzelsegment in vierfacher Ausführung produziert werden. Die Druckhöhe der Einzelsegmente entspricht 300 mm, was aufgrund der offenen, dünnwandigen Geometrie und der geringen Schichtzeiten beim Druck zu Stabilitätsproblem bzw. möglichen ungewollten Verformungen der 3D-Druck-Teile führen kann. Zur Vermeidung dieser Problematik im Zusammenhang mit einem vergleichsweise langsam ansteifenden 1-komponentigen Druckmaterial werden die Hohlkörper in zwei Arbeitsgängen hergestellt. Dabei wird eine Druckpause von max. 30 Minuten eingehalten, um ausreichenden Schichtverbund zu gewährleisten und das Entstehen einer kalten Fuge zu vermeiden (siehe Abbildung 3b)).

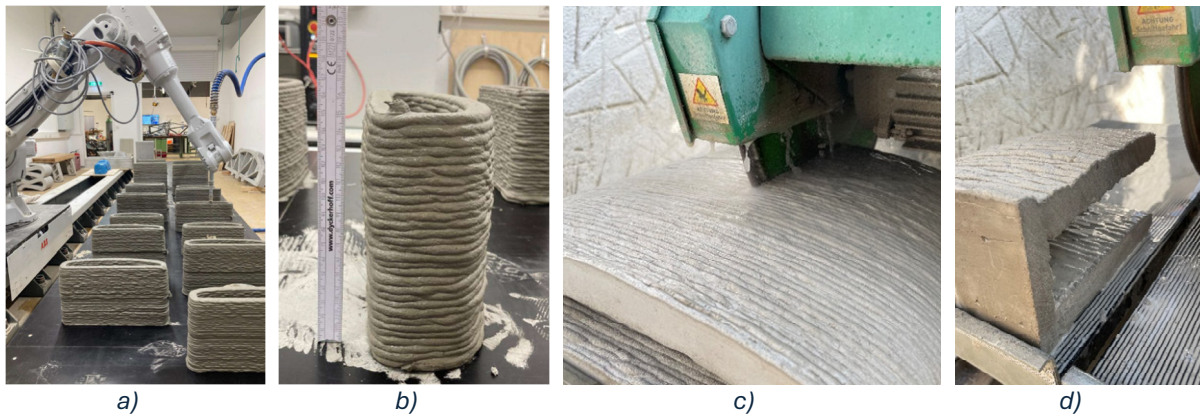


Abbildung 3: a) Druckvorgang der Hohlkörperelemente b) Unteres Segment (Druckhöhe 15 cm) während der Druckpause c) Längsschnitt der Hohlkörperelemente, um die spiegelsymmetrischen Teile vorzubereiten d) geschnittenes Hohlkörperelement mit der gut erkennbaren typischen Layerstruktur von 3D-gedruckten Bauteilen

Die 3D-Druckteile werden nach der Fertigstellung bei einer Temperatur von ca. 20 °C für min. 14 Tage unter einer PE-Folie gelagert, um eine vorzeitige Austrocknung zu verhindern und entsprechende Festbetoneigenschaften zu gewährleisten. Um den in Abbildung 1 dargestellten Deckenausschnitt nachbilden zu können, werden von jedem Hohlkörpertyp zwei Stück mit einem Nassschneider halbiert.

2.4. Herstellung des Demonstratorbauteils

Die gedruckten Schalungselemente wurden innerhalb einer Holzschalung nach dem Verlegen der unteren Bewehrung platziert und zueinander entsprechend abgedichtet, um das ungewollte Füllen der planmäßigen Hohlräume zu verhindern. Neben der Hauptbiegebewehrung in Längsrichtung von insgesamt 4 d8mm, folglich 2 Stäbe je Längsrippe, wurden sowohl ober- und unterseitig der Schalungskörper Querbewehrung mit d6mm alle 65 cm eingelegt (siehe Abbildung 3a) und 3b)), um die Quersteifigkeit der Platte zu erhöhen und ein unplanmäßiges Versagen zu verhindern. Der Füllbeton wird als Standardbeton mit üblichen Festigkeiten und Bindemittel mit reduzierten Klinkergehalt gewählt.

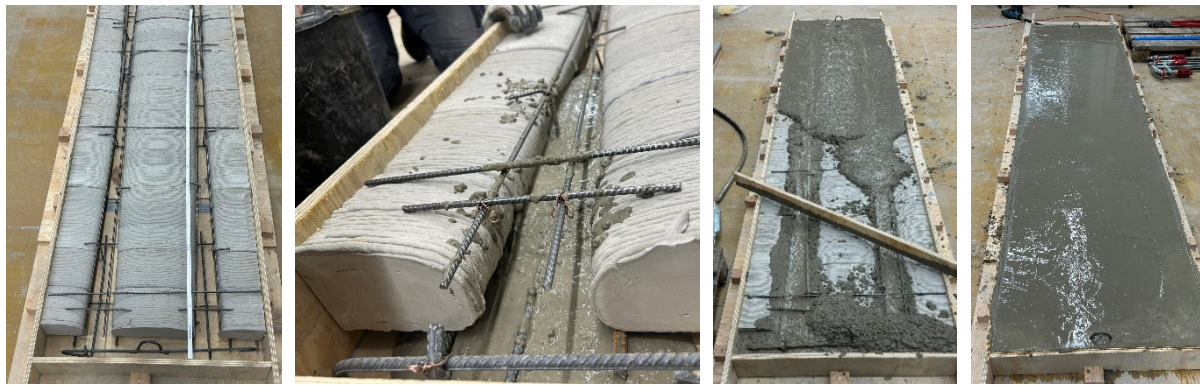


Abbildung 4: a) Positionierung der Hohlkörperelemente in der Schalung b) Position der Bewehrung und Beginn der Betonage c) Verfüllen des Demonstratorbauteils mit konventionellen Gussbeton d) Fertiggestelltes Demonstratorbauteil

2.5. Durchführung des Tragfähigkeitstests

Der Probekörper ist nach dem Aushärten in einem 4-Punkt-Biegeversuch geprüft und bis zum Fließen (Übergang von elastischen zu plastischen Materialverhalten) der Hauptbewehrung belastet worden. Die Stützweite, Lagerungssituation sowie die Positionen der Lasteinleitungspunkte können Abbildung 5 entnommen werden.

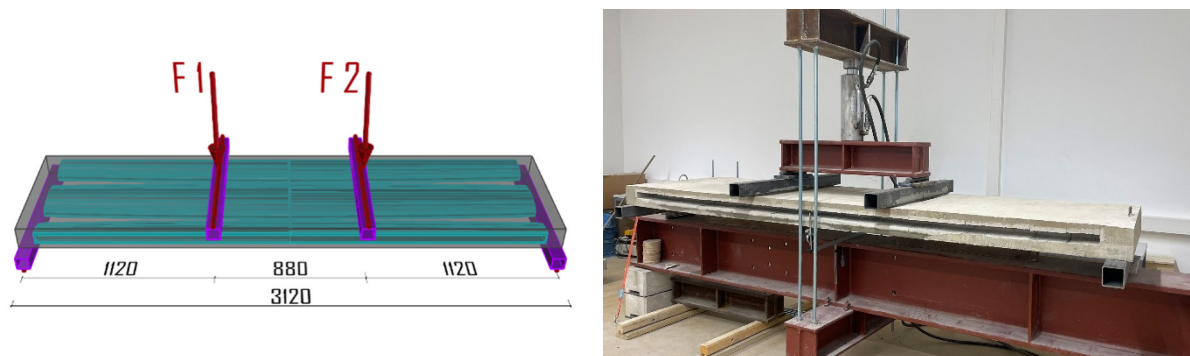
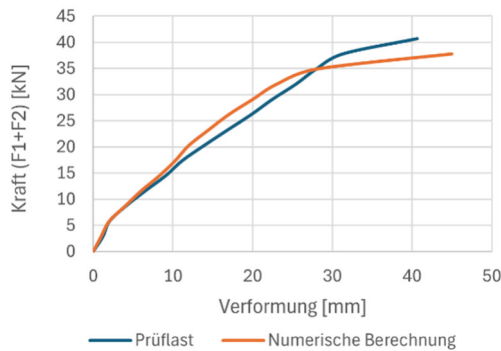


Abbildung 5: Prüfaufbau des 4-Punkt-Biegeversuchs mit den Abmessungen und der Einbau im Prüfraum

3. ERGEBNISSE

Die Bauteilprüfung wurde bis zum Fließen der Biegezugbewehrung bzw. einer maximalen Verformung von $L/75$ durchgeführt. Dabei wurde sowohl die aufgebrachte Kraft als auch die Verformung in Bauteilmitte an beiden Seiten gemessen und gemittelt. Der experimentelle Kraft-Verformungsverlauf wird dann mit den Ergebnissen der analytischen Methode nach nicht-linearen Berechnungsmethoden verglichen (Abbildung 6a).

Die aufgetretenen Rissbreiten und -abstände wurden am Versuchsende dokumentiert. Zwischen den beiden Lasteinleitungspunkten konnte ein mittlerer Rissabstand von 96 mm festgestellt werden. Die Risse entwickeln sich jeweils orthogonal vollständig über die gesamte Bauteilbreite und verspringen in einigen Fällen in der Fuge zwischen Füllbeton und 3D-Beton (Abbildung 6b).



a)



b)

Abbildung 6: a) Vergleich der Prüflast und der errechneten Last im Kraft-Verformungsdiagramm und b) Biegerisse im Demonstratorbauteil zwischen den Lasteinleitungspunkten

4. DISKUSSION

Durch den Einsatz von 3D-gedruckten Schalungskörpern als Verdrängungselemente kann die Masse der Konstruktion deutlich reduziert werden, wodurch weitere günstige Effekte bezogen auf die Materialreduktion an der Gesamtkonstruktion auftreten können.

Druckbare Betonrezepturen weisen jedoch höhere Zement- bzw. Bindemittelgehalte auf als konventionelle Betonrezepturen, weshalb nicht nur auf die Materialeinsparung durch geschaffene Hohlräume eingegangen werden sollte, sondern im Sinne der Emissionsreduktion und Ressourcenschonung auf die eingesetzte Zement- bzw. vor allem Klinkermenge eingegangen werden soll. Im dargestellten Fall kann entsprechend Tabelle 1 das Eigengewicht des Demonstrators gegenüber einer konventionellen Vollbetondecke um 24 % verringert werden, wobei das Verformungsverhalten und der Versagensmodus erhalten bleibt.

Der niedrige Bewehrungsgrad kann entsprechend Abbildung 2 die Druckfestigkeit des Betons nur gering ausnutzen, wodurch ein ausgeprägtes Fließen der Bewehrung erzeugt und das Biegerissverhalten des zusammengesetzten Querschnitts beobachtet werden konnte.

5. CONCLUSIO

Aus technischer Sicht ist der Einbau von 3D-gedruckten Hohlkörpern in sonst konventionelle Stahlbetonbauteile möglich und zur Material- und vor allem Masseneinsparung wirkungsvoll. Bei einem Vergleich des Ressourcenverbrauchs und der damit verbundenen CO_2 -Emissionen muss jedoch der höhere Klinker- oder Bindemittelgehalt der druckbaren Betonmischungen berücksichtigt werden. Die Testergebnisse des Demonstrators mit integrierten 3D-gedruckten Hohlkörpern aus Beton entsprechen den numerischen Analysen, die auf herkömmlichen Berechnungsmethoden basieren. Die allgemeine Gestaltungsflexibilität des 3D-Drucks ermöglicht eine präzise Anpassung der verlorenen Schalung an den jeweiligen Einsatzort und schafft so strukturell optimierte Querschnittsformen, die sich mit herkömmlichen Methoden nicht mit denselben technischen Eigenschaften herstellen lassen.

Literaturverzeichnis

1. Garcés, G., García Alvarado, R., Bunster, V., & Muñoz Sanguinetti, C. (2025). Additive Construction 4.0: A systematic review of 3D concrete printing for Construction 4.0. Engineering, Construction and Architectural Management. <https://doi.org/10.1108/ECAM-07-2024-0875>.
2. Pfleger, M.-P., Radl, E., Sam, N., & Vill, M. (2025, January). 3D concrete printing of thin-walled load-bearing reinforced structures. In IABSE Congress, Ghent 2025: The essence of structural engineering for society. <https://doi.org/10.2749/ghent.2025.2518>
3. Näther, M., Nerella, V. N., Krause, M., Kunze, G., Mechtcherine, V., & Schach, R. (2017). Beton-3D-Druck – Machbarkeitsuntersuchungen zu kontinuierlichen und schalungsfreien Bauverfahren durch 3D-Formung von Frischbeton (Abschlussbericht F 3024). Fraunhofer IRB Verlag. URL: <https://www.irbnet.de/daten/rswb/17079004398.pdf> [irbnet.de].
4. Pfleger, M.-P., Radl, E., & Vill, M. (2025). *Untersuchung des Karbonatisierungsverhaltens von 3D-gedruckten Schalungselementen mit Ortbetonverguss für Rippendecken*. Vortrag präsentiert beim 18. Forschungsforum der österreichischen Fachhochschulen (FFH2025), Hochschule Campus Wien, Österreich.