

BBSR-  
Online-Publikation  
42/2022

# Entwicklung eines Verfahrens zur Bewehrung 3D-gedruckter Betonkörper

von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit  
Dr.-Ing. Daniel Nyman



# Entwicklung eines Verfahrens zur Bewehrung 3D-gedruckter Betonkörper

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wohnen, Stadtentwicklung  
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**ZUKUNFT BAU**  
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-18.19

Projektlaufzeit: 12.2018 bis 06.2021

## IMPRESSUM

### Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)  
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)  
Deichmanns Aue 31–37  
53179 Bonn

### Fachbetreuer

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung  
Referat WB 3 „Forschung im Bauwesen“  
Dr.-Ing. Arnd Rose  
arnd.rose@bbr.bund.de

### Autoren

Technische Universität Kaiserslautern  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit (Projektleitung)  
wolfgang.breit@bauing.uni-kl.de

Dr.-Ing. Daniel Nyman

### Redaktion

Technische Universität Kaiserslautern

### Stand

Juni 2021

### Gestaltung

Technische Universität Kaiserslautern  
Dr.-Ing. Daniel Nyman

### Bildnachweis

Titelbild: Dr.-Ing. Daniel Nyman

### Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

### Zitierweise

Breit, Wolfgang; Nymann, Daniel, 2022: Entwicklung eines Verfahrens zur Bewehrung 3D-gedruckter Betonkörper. BBSR-Online-Publikation 42/2022, Bonn.

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                                                                                 | Seite |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Übersicht.....                                                                                                                  | 4     |
| 1 Ausgangssituation.....                                                                                                        | 5     |
| 1.1 Kurzbeschreibung.....                                                                                                       | 5     |
| 1.2 Beschreibung der zu lösenden Probleme.....                                                                                  | 5     |
| 1.3 Begründung des Forschungsvorhabens.....                                                                                     | 6     |
| 1.4 Ausgangsbasis für das Forschungsvorhaben.....                                                                               | 7     |
| 1.5 Forschungsverbund / Projektbegleitung / Beratergruppe.....                                                                  | 8     |
| 2 Aufbau des Forschungsvorhabens.....                                                                                           | 10    |
| 2.1 Allgemein.....                                                                                                              | 10    |
| 2.2 Arbeitspaket I.....                                                                                                         | 11    |
| 2.3 Arbeitspaket II.....                                                                                                        | 11    |
| 2.4 Arbeitspaket III.....                                                                                                       | 12    |
| 2.5 Arbeitspaket IV.....                                                                                                        | 12    |
| 2.6 Arbeitspaket V.....                                                                                                         | 12    |
| 3 Durchführung und Ergebnisse der Module.....                                                                                   | 13    |
| 3.1 Arbeitspaket I.....                                                                                                         | 13    |
| 3.1.1 Untersuchung eines geeigneten Epoxidharz-Systems.....                                                                     | 13    |
| 3.1.2 Analyse des Fließverhaltens sowie des Verfüllgrades ohne den trockenen Compound innerhalb des Simulationsprüfstandes..... | 20    |
| 3.1.3 Untersuchung des Bewehrungsdurchmessers hinsichtlich des Feuchtigkeitseintrags.....                                       | 28    |
| 3.1.4 Untersuchung der Lagerungsbedingungen.....                                                                                | 32    |
| 3.1.5 Analyse des Fließverhaltens mit dem trockenem Compound innerhalb des Simulationsprüfstandes.....                          | 35    |
| 3.2 Arbeitspaket II.....                                                                                                        | 42    |
| 3.2.1 Allgemeines.....                                                                                                          | 42    |
| 3.2.2 Vorberechnung der aufnehmbaren betontechnologischen Kenngrößen innerhalb der FEM-Simulation.....                          | 43    |
| 3.2.3 Definition der Bewehrungseigenschaften für die FEM-Simulation.....                                                        | 49    |
| 3.2.4 Exemplarische Topologieoptimierung mittels FEM-Simulation.....                                                            | 54    |
| 3.3 Arbeitspaket III.....                                                                                                       | 58    |

|       |                                                                                                                         |     |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.3.1 | Allgemeines.....                                                                                                        | 58  |
| 3.3.2 | Entwicklung belastungsorientierter Probekörper.....                                                                     | 58  |
| 3.3.3 | Produktion belastungsorientierter Probekörper.....                                                                      | 65  |
| 3.4   | Arbeitspaket IV .....                                                                                                   | 69  |
| 3.4.1 | Allgemeines.....                                                                                                        | 69  |
| 3.4.2 | Analyse der Versuchsreihen aus Arbeitspaket III .....                                                                   | 69  |
| 3.4.3 | Auswertung der Verbundeigenschaften zwischen Beton und Bewehrung.....                                                   | 75  |
| 3.4.4 | Implementierung der erbrachten Ergebnisse in die FEM-Simulation einer<br>anwendungsbezogenen Tragwerkskonstruktion..... | 86  |
| 3.4.5 | Fazit und Ausblick.....                                                                                                 | 90  |
|       | Literaturverzeichnis.....                                                                                               | 93  |
|       | Abbildungsverzeichnis.....                                                                                              | 98  |
|       | Tabellenverzeichnis.....                                                                                                | 102 |

## Übersicht

|                                   |                                                                                                                                                                         |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| BBR-Bericht:                      | SWD-10.08.18.7-18.19                                                                                                                                                    |
| Titel:                            | Entwicklung eines Verfahrens zur Bewehrung 3D-gedruckter Betonkörper                                                                                                    |
| Kurztitel:                        | Bewehrung von 3D-Betonkörpern                                                                                                                                           |
| Zuwendungsgeber:                  | Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)<br><br>Zukunft BAU<br><br>Deichmanns Aue 31-37<br>D-53179 Bonn |
| Zuwendungsgeber, vertreten durch: | Herr Dr.-Ing. Arnd Rose                                                                                                                                                 |
| Bearbeiter:                       | Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit (Technische Universität Kaiserslautern)<br><br>Daniel Nyman, M. Eng. (Technische Universität Kaiserslautern)                        |
| Interne Forschungsnummer:         | FWB-9201556                                                                                                                                                             |
| Ausgestellt am:                   | 15.06.2021                                                                                                                                                              |
| Berichtsumfang:                   | 102 Seiten                                                                                                                                                              |

# 1 Ausgangssituation

## 1.1 Kurzbeschreibung

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Optimierung 3D-gedruckter Betonkörper anhand einer injizierten Bewehrung. Die zu konstruierende Traglaststruktur kann ohne Schalungsarbeiten direkt vom Drucker in Auftrag genommen und hergestellt werden. Eine darauffolgende Einbringung der Bewehrung mittels Injektion erfolgt in die nicht ausgehärteten Bereiche, die anhand einer Berechnung eines Finite-Element-Methode-Programms (FEM-Programms) als Zugstränge definiert wurden. Diese Bereiche können sowohl mit dem nicht erhärtenden Compound befüllt sein oder nachträglich ausgehöhlt werden. Dies führt neben der bereits erreichten Betondruckfestigkeit zur signifikanten Steigerung der aufnehmbaren Zugfestigkeit biegebelasteter Tragwerkstrukturen. Die Interaktion der Vorteile führt zu einer belastungsorientierten Konzeption eines neuen Tragwerksystems, das aufgrund seiner Topologieoptimierung maximal ausgelastet ist, dabei ressourcenoptimiert und emissionsreduziert hergestellt werden kann. Das heißt, dass die Tragwerkstruktur so konzipiert wird, dass gering ausgelastete Bereiche im Beton während des Druckprozesses nicht erhärten und somit eine Rezyklierung des überschüssigen Materials möglich ist. Neben der erheblichen Materialeinsparung, einer Verringerung des Eigengewichts und einer Entlastung aller tragenden Elemente des Bauwerks können die vertikal lastführenden Strukturen minimiert werden, sodass eine Vergrößerung der Nutzfläche und eine effektivere Umnutzung ermöglicht wird. Mit diesem Verfahren ist eine detaillierte Optimierbarkeit in jedem Bereich der Decken-, Unterzug- oder Stützenkonstruktion unter Verwendung eines FEM-Programms realisierbar.

## 1.2 Beschreibung der zu lösenden Probleme

Während des Entwicklungsprozesses einer druckfesten Zementsuspension entstand immer häufiger das Problem der zu geringen Zugfestigkeit 3D-gedruckter Betonkörper, da es in dem bisherigen Prozess nicht möglich ist die gedruckte Struktur zu bewehren.

Im Rahmen dieses Projekts soll demnach die Entwicklung eines geeigneten Injektionsmaterials zur nachträglich eingebrachten Bewehrung erforscht werden, das aufgrund der vorherigen Berechnung des auftretenden Zugbereichs innerhalb des Tragwerksystems richtungsabhängig (belastungsorientiert) eingepresst werden kann. Dies soll gezielt für das 3D-Pulverdruckverfahren entwickelt werden, da bislang ausschließlich mit diesem 3D-Verfahren beliebig große Überhänge und Hohlräume ohne zusätzliche Hilfskonstruktionen gedruckt werden können. Wichtige Fragestellungen werden hierbei sein, ob die injizierte Bewehrung alle vorprogrammierten Zugstränge ausfüllt und ob der nicht erhärtete Compound in dem Baukörper verbleiben kann. Demnach werden zunächst hinreichende Analysen zur Fließfähigkeit bzw. Viskosität der "Verpressuspension" angefertigt, um eine Prognose des

Eindringverhaltens der injizierten Bewehrung geben zu können. Durch den Eintrag einer zunächst flüssigen Bewehrung in alle nicht ausgehärteten Bereiche des Betonkörpers wird die Bewehrung eine optimierte Verzahnung erzeugen, sodass nach der anschließenden Aushärtung des Materials die häufig auftretende Verbundproblematik einer nachträglichen Bewehrung nicht in Erscheinung tritt. Die Untersuchung bzgl. der tatsächlichen Bewehrungsbildung innerhalb des gedruckten Betonkörpers wird anhand einer computertomographischen Bildanalyse durchgeführt.

Des Weiteren können durch die Verwendung einer "Verpresssuspension" die Korrosionsgefahr ausgeschlossen und somit filigranere Tragwerksstrukturen erzeugt werden.

Mit der Umsetzung dieses Forschungsvorhabens ist der nächste Schritt in Richtung einer topologieoptimierten Bauwerkstruktur geebnet, in der überflüssiges Material rezykliert, lastabhängig "betoniert" und richtungsabhängig bewehrt werden kann.

### **1.3 Begründung des Forschungsvorhabens**

Beton, der durch seine Vielfältigkeit und Eigenschaften als Jahrhundertbaustoff bezeichnet wird (vgl. u. a. [1]), kommt in unserer heutigen Zeit in fast allen Bauwerken zum Einsatz. Die konventionelle Herstellung kommt jedoch dabei besonders bei freigeformten Bauteilen an ihre Grenzen und neue Techniken müssen erforscht werden.

Der 3D-Druck von zementgebundenen Bauteilen stellt in Zeiten des nachhaltigen Denkens eine Lösung mit hohem Potential dar. Mit diesem Verfahren lassen sich nicht nur beliebige Formen und architektonische Highlights erzeugen, sondern auch eine ressourcenschonende Verarbeitung realisieren. Diese wird erzeugt durch eine optimale Materialausnutzung und eine Wiederverwertung des unverbrauchten Materials. Da auf die Herstellung von Zement etwa acht Prozent des globalen CO<sub>2</sub> entfallen (vgl. u. a. [2]), ist eine effizientere Verarbeitung sehr nachhaltig. Außerdem können die durch den Transport von Beton entstehenden Emissionen verringert werden. Ein weiterer positiver Aspekt dieses Verfahrens ist die Wirtschaftlichkeit. Durch die Eingabe der Geometrie in ein Computermodell entfallen jegliche Kosten für Schalungselemente, Werkzeuge, Lagerungskosten und gleichzeitig wird die Herstellungsdauer verringert. Auch die strengen Anforderungen an Sichtbetonoberflächen können mit diesem Verfahren eingehalten werden. Damit die Baubranche nicht von der Digitalisierung der Welt abgehängt wird und zukunftsorientiert handelt, wird der Erforschung additiver Fertigungstechniken ein wesentlicher Aspekt zukommen. Dabei liegt das besondere Augenmerk auf der Erforschung einer druckfesten Zementsuspension in Verbindung mit einer geeigneten Bewehrungsausführung, um die Vorstellung belastungsorientierter Baukörper realisieren zu können.

## **1.4 Ausgangsbasis für das Forschungsvorhaben**

In Zusammenarbeit der mit der Firma 4D Concepts GmbH durchgeführten Forschungsarbeiten wurde auf Basis der bestehenden 3D-Pulverdruck-Technologie ein neuartiges Druckverfahren für zementgebundene Werkstoffe entwickelt. Hierzu gehörten beispielsweise Verfahren, die die homogene Verteilung des Compounds auf der Druckfläche sicherstellen. Die Druckköpfe mussten auf die Verarbeitung des für den Compound benötigten Reaktionsmittels angepasst werden. Zusätzlich sollten Verfahren entwickelt werden, die geeignet sind die Ortsauflösung des Druckverfahrens entsprechend der jeweiligen Anforderung variabel zu realisieren, um auf diese Weise einen schnelleren Baufortschritt in den Fällen zu ermöglichen, in denen eine geringere Ortsauflösung vertretbar ist und damit für diese Werkstücke das Verfahren besonders wirtschaftlich angewendet werden kann.

Des Weiteren wurde ein auf den Prozess abgestimmter Compound mit angepasstem Reaktionsmittel entwickelt. Ein besonderer Fokus lag auf den kennzeichnenden Eigenschaften Packungsdichte, Porosität, Frühfestigkeit und Endfestigkeit. Ein weiterer Entwicklungsgegenstand war der zeitlich angepasste Erhärtungsverlauf der übereinanderliegenden Schichten sowie eine nach dem Drucken des Werkstücks angepasste Nachbehandlung, die die Nachaktivierung der bisher noch nicht abgebundenen Bestandteile des Compounds folgen lassen.

Die im Rahmen des vorangegangenen Forschungsprojektes gewonnenen Erfahrungen sollen auch in die Entwicklung bewehrter 3D-gedruckter Betonkörper mit einfließen. Die bisher durchgeführten Versuche und erzielten Ergebnisse haben zu diesem Antrag „Entwicklung eines Verfahrens zur Bewehrung 3D-Pulverdruck geformter Betonkörper“ im Rahmen der Forschungsinitiative ZukunftBau geführt, sodass die o. g. Technologien weiterentwickelt und praktisch angewandt werden können.

## 1.5 Forschungsverbund / Projektbegleitung / Beratergruppe

Die Bearbeitung des Forschungsprojekts „Entwicklung eines Verfahrens zur Bewehrung 3D-gedruckter Betonkörper“ wurde von folgenden Mitarbeitern des Fachgebiets Werkstoffe im Bauwesen (FWB) der Technischen Universität Kaiserslautern (TUK) durchgeführt:

**Projektleiter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit**

Projektbearbeiter: Daniel Nyman, M. Eng.  
daniel.nyman@bauing.uni-kl.de  
Tel.: 0631 / 205-5946

Anschrift: Technische Universität Kaiserslautern  
Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen  
Gottlieb-Daimler-Straße, Geb. 60  
D-67663 Kaiserslautern

Das Projekt wurde seitens des BBR begleitet von:

**Projektbegleitung: Dr.-Ing. Arnd Rose**

Referent im Referat II-3  
Forschung im Bauwesen

Anschrift: Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)  
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)  
Deichmanns Aue 31-37  
D-53179 Bonn

**Projektbegleitung: Jörg Mies**

Leitung (SWD; SWD/FV; SWD/QC)

Anschrift: Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)  
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)  
Deichmanns Aue 31-37  
D-53179 Bonn

Das Forschungsprojekt wurde durch fünf renommierte Wirtschaftsunternehmen unterstützt. Im Folgenden werden die Praxispartner aufgeführt:

**Unternehmen: Wöllner GmbH**

Anschrift: Wöllnerstraße 26  
D-67065 Ludwigshafen

Ansprechpartner: Dr. Andreas Reindl

**Unternehmen: WEBAC-Chemie GmbH**

Anschrift: Fahrenberg 22  
D-22885 Barsbüttel

Ansprechpartner: Dr. Anton Reichert

**Unternehmen: BASF Construction Solutions GmbH**

Anschrift: Ernst-Thälmann-Straße 9  
D-39240 Staßfurt

Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Ronald Koenig

**Unternehmen: Quarzwerke GmbH**

Anschrift: Kaskadenweg 40  
D-50226 Frechen

Ansprechpartner: Katharina Wirz

**Unternehmen: ANSYS Germany GmbH**

Anschrift: Staudenfeldweg 20  
D-83624 Otterfing

Ansprechpartner: Max Schuler

## 2 Aufbau des Forschungsvorhabens

### 2.1 Allgemeines

Um die genannten Ziele für das Forschungsvorhaben „Entwicklung eines Verfahrens zur Bewehrung 3D-gedruckter Betonkörper“ aus den Abschnitten 1.1 bis 1.3 zu erreichen, wurden im Voraus differierende Arbeitspakete bestimmt, die sich wie folgt unterteilen:

Mit dem ersten Arbeitspaket sollen die Grundlagen für eine realisierbare Umsetzung der in Arbeitspaket III geplanten Produktion optimierter Probekörper inklusive einer injizierten Bewehrung erarbeitet werden. Hierzu zählen zum einen die Definition der einzuhaltenden Herstellungsbedingungen in Bezug auf die Injektionsbewehrung in Form eines speziellen Epoxidharzes und zum anderen die Komposition der zu beachtenden Nachbehandlungsmaßnahmen der 3D-gedruckten Betonstrukturen, um eine nachträgliche Injektion des gewünschten Bewehrungsverlaufs gewährleisten zu können.

Im zweiten Arbeitspaket werden die simulationstechnischen Grundlagen zur späteren Konzeption bzw. Modellierung belastungsorientierter 3D-gedruckter Betonkörper geschaffen. Des Weiteren wird in diesem Arbeitsschritt die Thematik der Topologieoptimierung aufgegriffen, um den wesentlichen Vorteil additiver Fertigungsverfahren gegenüber den konventionellen, subtraktiven sowie formativen Produktionsverfahren darstellen zu können. Dies zeigt sich insbesondere im Hinblick auf den Aspekt der Ressourcenschonung sowie der Konstruktion freigeformter Bauteile. Dieser Fortschritt erhält bereits Einzug in der additiven Verarbeitung von Kunststoffen oder Metallen und soll somit in der Entwicklung der Betondrucktechnologie aufgegriffen bzw. umgesetzt werden.

Die Tätigkeiten des dritten Arbeitspaketes beziehen sich prinzipiell auf die Produktion optimierter Betonstrukturen zuzüglich einer injizierten Bewehrung, um die prognostizierten Eigenschaften der Exponate verifizieren zu können. Hierzu zählen bspw. die Untersuchung der Durchführbarkeit diffiziler Bewehrungsverläufe sowie die Analyse des Fließverhaltens des Reaktionsharzes in Bezug auf den Ausfüllungsgrad der berechneten Zugstränge. Die Erfahrungen dieser praktischen Phase fließen wiederum in einem ständigen Optimierungsprozess in die vorangegangenen Arbeitspakete ein, um eine eventuelle Adaption der kalkulierten Eigenschaften und vorformulierten Herstellungsmethoden vornehmen zu können.

Mit dem letzten praktischen Arbeitspaket schiebt sich der Fokus von den Untersuchungen einer praktikablen Herstellungsmethode zur Analyse der Versuchsreihen in Bezug auf die statischen Eigenschaften 3D-gedruckter Betonkörper inklusive einer nachträglichen Bewehrung. Wesentliche Merkmale, die es zu beachten gilt, sind die betontechnologischen Kenngrößen, der Vergleich der Kenngrößen mit und ohne injizierte Bewehrung, die Auswertung der Verbundeigenschaften zwischen Beton und Bewehrung sowie die zerstörungsfreie bzw. computertomographische Untersuchung der Bewehrungsstruktur innerhalb des Betonkörpers.

Die erbrachten Ergebnisse werden anschließend in die FEM-Simulation implementiert, um die simulationstechnische Berechnung an die realen Verhältnisse adjustieren zu können.

Im Anschluss an dieses Arbeitspaket werden die experimentellen sowie simulationstechnischen Untersuchungen abgeschlossen, bewertet und in einem Endbericht komprimiert dargestellt.

## **2.2 Arbeitspaket I**

### **Messtechnische Untersuchung des zeit- und ortsabhängigen Strukturierungszustandes**

- Ermittlung einer geeigneten Verarbeitungstemperatur der Injektionsbewehrung
- Bestimmung der makroskopischen rheologischen Eigenschaften
- Ausstattung der Versuchsanlage und der Fließversuchsgeometrien mit Drucksensoren zur Bestimmung der lokalen Druckverhältnisse
- Analyse des Fließverhaltens mit dem 3D-Compound innerhalb des Simulationsprüfstandes
- Reglementierung der Druckverteilung anhand der erbrachten Ergebnisse
- Festlegung der einsetzbaren Fertigungsverfahren für AP3

## **2.3 Arbeitspaket II**

### **Konzeption und Simulation belastungsorientierter 3D-gedruckter Betonkörper**

- Berechnung topologieoptimierter Tragwerksysteme mittels Finite-Element-Methode (FEM)
- Ermittlung realisierbarer Bewehrungsverläufe
- Definition unterschiedlicher Probekörper für AP3 und AP4
- Vorberechnung der aufnehmbaren betontechnologischen Kenngrößen innerhalb der FEM-Simulation wie z. B.:
  - Druckfestigkeit
  - Biegezugfestigkeit
  - Elastizitätsmodul
- Erstellung druckfähiger Stereo-Lithography-Files (STL-Dateien) anhand der festgelegten Parameter

## **2.4 Arbeitspaket III**

### **Produktion optimierter Probekörper inklusive einer injizierten Bewehrung**

- Entwicklung belastungsorientierter Probekörper unter Berücksichtigung:
  - einer optimierten thermischen Vorbehandlung des Betonkörpers
  - der in AP1 erforschten Definitionsgrößen zur Verarbeitungstemperatur und Druckverteilung der injizierten Bewehrung
  - unterschiedlicher Bewehrungsquerschnitte und Ausrichtungen
  - eventueller Adaption der unterschiedlichen Druckverhältnisse der injizierten Bewehrung und thermischen Injektion der Bewehrung
- Analyse der Korrelation zwischen der injizierten Bewehrung und des 3D-gedruckten Tragwerksystems

## **2.5 Arbeitspaket IV**

### **Analyse der Versuchsreihen und Modifikation der FEM-Simulation**

- Analyse der Versuchsreihen in Bezug auf die betontechnologischen Kenngrößen
- Vergleich der Kenngrößen mit und ohne injizierter Bewehrung
- Auswertung der Verbundeigenschaften zwischen Beton und Bewehrung
- Computertomographische Untersuchung der Bewehrungsstruktur innerhalb des Betonkörpers
- Implementierung der erbrachten Ergebnisse in die FEM-Simulation
- Konkretisierung der realisierbaren faserorientierten Belastungstheorie in 3D-gedruckten Betonstrukturen
- Bewertung

## **2.6 Arbeitspaket V**

### **Abschlussbericht, Veröffentlichungen**

### **3 Durchführung und Ergebnisse der Module**

#### **3.1 Arbeitspaket I**

##### **3.1.1 Untersuchung eines geeigneten Epoxidharz-Systems**

###### **3.1.1.1 Allgemeines**

Basierend auf der grundlegenden Konzeption der nachträglichen Bewehrung 3D-gedruckter Betonstrukturen musste zunächst für das vorliegende Forschungsvorhaben neben der Bestimmung einer anwendbaren Verpresstechnik eine messtechnische Untersuchung des zeit- und ortsabhängigen Strukturierungszustandes des Reaktionsharzes erfolgen. Dies beinhaltete primär die Interaktion zwischen Viskosität, Verarbeitungstemperatur und Topfzeit für die vorherrschenden Umgebungsbedingungen.

Im Allgemeinen heißt es nach ZTV-ING – Teil 3 [3] u. a., dass Rissfüllstoffe eine füllartangepasste Viskosität bzw. eine gute Verarbeitbarkeit innerhalb füllartabhängig definierten Grenzen aufweisen sowie sich durch eine ausreichende Mischungsstabilität und Haftfestigkeit am Betongefüge kennzeichnen soll. Weitere maßgebende Faktoren, die ebenfalls berücksichtigt werden müssen, sind eine ausreichende Eigenfestigkeit und eine Verträglichkeit mit allen Stoffen, mit denen das Epoxidharz in Berührung kommt. Auszuschließen ist im Vorhinein die Prüfung einer möglichen Korrosionsförderung, da aufgrund der fehlenden Stahlbewehrung das injizierte Reaktionsharz die Zugspannung im 3D-gedruckten Bauteil aufnehmen soll.

Die für die Versuchsreihen eingesetzten Epoxidharze zeichnen sich daher durch niedrig bis mittelviskose Fließeigenschaften, gute Haftfestigkeiten auf Beton, lange Verarbeitungszeiten, allgemein chemische Widerstandsfähigkeiten sowie durch eine ca. 20-fach höhere Zugfestigkeit als 3D-gedruckter Beton aus. Auf die entsprechenden Eigenschaftswerte der verwendeten Reaktionsharze wird in den nachfolgenden Abschnitten differenziert eingegangen. Des Weiteren eignen sich die Epoxidharze prinzipiell aufgrund der hohen Alkalibeständigkeit besonders gut zur Beschichtung von Beton und weisen eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Einwirkungen auf [4], was sich im Wesentlichen auch positiv für den geplanten Einsatz einer nachträglichen Injektionsbewehrung ausspricht. Jedoch können gerade in der Vorbereitungsphase, die zunächst von klimatischen oder versuchsbedingten Umgebungseinflüssen unabhängig ist, die geplanten Produkteigenschaften maßgeblich beeinflusst werden. Denn bei der Verarbeitung von Epoxidharzen sind insbesondere neben der genauen Einhaltung des Mischungsverhältnisses sowie einer sorgfältigen Vermengung der Komponenten, die einzuhaltende Topfzeit und die notwendige Aushärtungstemperatur zu beachten.

### 3.1.1.2 Injektionstechniken

Im konventionellen Anwendungsgebiet stellen die unterschiedlichen Injektionstechniken, wie Verpressung und Tränkung [3], eine kraftschlüssige Verklebung sowie dehnfähige Verschließung von Rissen mittels Epoxidharzen (EP) oder Polyurethanharzen (PUR) dar. Für das vorliegende Forschungsvorhaben werden beide Injektionstechniken unter Einsatz leistungsstarker Epoxidharze der Firma WEBAC-Chemie GmbH hinsichtlich einer geeigneten Umsetzungsmöglichkeit untersucht.

Für die Ausführung einer Tränkung, die ohne eine Druckapplikation auskommt, müssen zusätzliche Bedingungen geschaffen werden, damit nicht wie im üblichen Verfahren hauptsächlich die oberflächennahen Bereiche verfüllt werden, sondern die kompletten Bewehrungsstränge. Die Injektion der im Vorhinein definierten Injektionskanäle erfolgt dabei ebenfalls von oben, um eine vollständige Tränkung sicherstellen zu können. Eine weitere Voraussetzung ist eine ununterbrochene Zufuhr des Rissfüllstoffes bis zum Abschluss des kapillaren Saugens [4].

Die zweite Injektionsvariante verfolgt die häufig in der Praxis angewendete Form der Verpressung. Ähnlich zur üblichen Rissverschließung und Abdichtung mithilfe einer lösungsmittelfreien, kalt härtenden Zweikomponenten-Epoxidharzinjektion werden in diesem Fall die definierten Stränge kraftschlüssig mit einem niedrigviskosen Reaktionsharz unter Druck bis zur Sättigung des 3D-gedruckten Betonbauteils eingepresst [5].

Im Vergleich zum konventionellen Injektionsverfahren wird das Füllgut nicht über druckfeste Anschlüsse zwischen Bauteil und Injektionsgerät, sogenannte Packer, in den Riss eingebracht, sondern mithilfe eines angepassten Versuchsaufbaus, um bspw. den Injektionsfortschritt sowie mögliche Komplikationen gerade in den ersten Testphasen frühzeitig erkennen zu können.

Im Allgemeinen kann je nach Betonqualität oder Bauteilzustand die Injektion infolge eines Nieder- oder Hochdruckverfahrens erfolgen.

- Niederdruckverfahren: < 10 bar
- Hochdruckverfahren: > 10 bar

Für die Rissanierung in Betonbauteilen wird hauptsächlich im Hochdruckverfahren gearbeitet. Die Gefahr von zusätzlichen Gefügeschädigungen aufgrund von zu hohen Injektionsdrücken ist bei konventionell hergestelltem Beton vernachlässigbar gering. Dennoch ist der Injektionsdruck immer auf die vorliegenden Gegebenheiten abzustimmen.

Für Betonbauteile gilt dabei folgende Berechnungsformel [6]:

$$\sigma_{\text{Inj}} = \frac{\sigma_c}{3} \cdot 10 = \frac{17,5}{3} \cdot 10 = 58 \text{ bar} \quad \text{Gl. 3-1}$$

Dabei ist:

$\sigma_{\text{Inj}}$       der maximale Injektionsdruck, in bar

$\sigma_c$         die Betondruckfestigkeit, in MPa

Für den vorliegenden Fall eines 3D-gedruckten Betonkörpers mit einer charakteristischen Druckfestigkeit von 17,5 MPa ergibt sich somit ein maximaler Injektionsdruck von 58 bar. Des Weiteren ist beim Injektionsvorgang darauf zu achten, dass der Verpressdruck langsam aufgebaut wird. Sobald ein Gegendruck entsteht, ist eine Druckregulierung vorzunehmen. Der maximale, rechnerisch ermittelte Injektionsdruck darf dabei nicht überschritten werden.

Prinzipiell ist eine Epoxidharz-Injektion ab einer Rissbreite von 0,1 mm einsetzbar [5], sodass die Durchmessergröße der Bewehrungsstränge nicht maßgeblich vom Injektionsprozess beeinflusst wird, sondern von der potenziell realisierbaren Kanalausbildung mithilfe des 3D-Druckprozesses (siehe Abschnitt 3.1.3).

#### 3.1.1.3 Verarbeitungstemperatur

Ein weiterer Parameter für eine reibungslose Durchführbarkeit der Injektion ist die Temperatur der Umluft oder des zu füllenden Bauteils sowie die Temperaturentwicklung des Reaktionsharzes selbst. Die kraftschlüssige Verklebung zwischen dem anorganischen Baustoff Beton und dem organischen Epoxidharz erfordert eine gezielte Abstimmung der klimatischen Bedingungen zum Zeitpunkt der Injektion. Wie alle chemischen Reaktionen ist auch die Epoxidharz-Härtung in ihrer Geschwindigkeit temperaturabhängig. Je nach Reaktivität der Härter kommt sie bei bauüblichen kalthärtenden Systemen unterhalb etwa +5 °C bis ±0 °C fast völlig zum Stillstand. Bei Wiedererwärmung springt die Reaktion jedoch wieder an [7], wobei mit einer geeigneten Formulierung des Harzes auch eine Verwendung bei Temperaturen nahe 0 °C möglich ist [8].

Für einen länger andauernden Injektionsvorgang, gerade bei der Tränkung der 3D-gedruckten Bewehrungsstränge oder bei dickeren Bauteilen, kann eine Kühlung der Lufttemperatur die Verarbeitungszeit verlängern. Generell empfiehlt die DIN V 18028 [9] bzw. DIN EN 1504-5 [10] eine Verarbeitungstemperatur für Reaktionsharze von  $T_{\text{nom}} = 21 \text{ °C} \pm 2 \text{ K}$ , die sich somit im durchschnittlichen Bereich der Grenztemperaturen für Reaktionsharze von i. d. R. 3 °C bis 40 °C befindet. Darüber hinaus werden noch weitere Grenzbereiche in der Literatur bzgl. der Temperaturen genannt, so z. B. muss die Oberflächentemperatur des Betons im Rahmen der

DAfStb-Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen für kunststoffgebundene Reaktionsharze immer mindestens 3 K über dem Taupunkt liegen [11]. Letztendlich existiert eine Palette an denkbaren Einflussparametern, sodass es nicht möglich ist, Harze zu entwickeln, die unter allen Bedingungen einsetzbar sind. Die Rahmenbedingungen und Materialkennwerte sind folglich der vorliegenden Situation anzupassen [12]. In Bezug auf die Verarbeitungstemperatur des Epoxidharzes wurden infolgedessen nachstehende, zu berücksichtigende Faktoren zusammengefasst und angesichts der maßgebenden Parameter (verwendbare Viskosität sowie ausreichende Topfzeit) bzgl. eines realisierbaren Injektionsprozesses definiert:

- Viskosität
- Aushärtungsdauer
- Topfzeit / Verarbeitungszeit
- Festigkeit
- Reaktionsgeschwindigkeit
- Reaktionsbedingter Volumenschwund
- Verbund zwischen Epoxidharz und Bauteil
- Bauteil- und Umgebungstemperatur

#### 3.1.1.4 Viskosität

Die sich aus den genannten Empfehlungen und Grenzwerten beeinflussbaren Parameter bzgl. der Temperatur des Reaktionsharzes sind u. a. die Verarbeitungszeit und die Viskosität. Dies veranschaulicht das in Abbildung 1 (links) dargestellte Diagramm zum Verhältnis von Verarbeitungszeit zur Viskosität für eine Epoxidharztemperatur von 20 °C sowie der exemplarisch aufgestellte Zusammenhang zwischen Temperatur und Viskosität [11]:

- Viskosität bei einer Epoxidharztemperatur von +23 °C  $\leq 1000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$
- Viskosität bei einer Epoxidharztemperatur von +12 °C  $\leq 4000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$

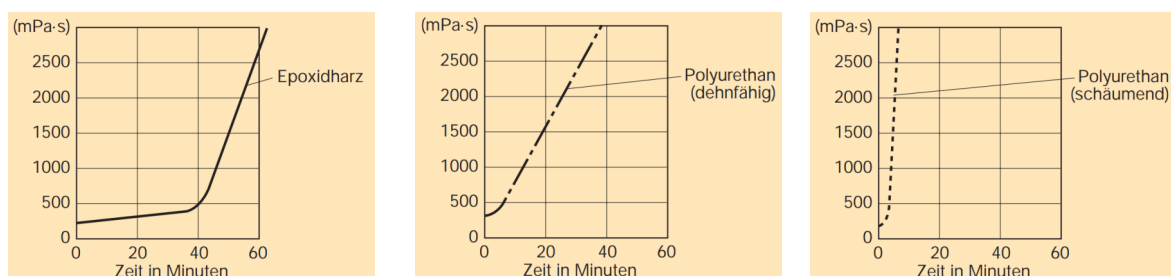


Abbildung 1: v.l.n.r. Viskosität von Epoxidharz, Polyurethanharz und Polyurethanharz (SPUR) bei 20 °C [13]

Demnach sollte je nach veranschlagter Temperatur und Verarbeitungsdauer die Verarbeitungsmethode bzw. das verwendete Injektionsgerät hinsichtlich der Viskosität angepasst werden. Aufgrund des vorherrschenden Laborklimas von 20 °C  $\pm$  2 K wiesen die bisher verwendeten Epoxidharze eine Mischviskosität von ca. 200 mPa·s bis ca. 360 mPa·s

auf und lagen somit im niedrigviskosen ( $< 300 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ) bzw. mittelviskosen Bereich ( $< 8000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ). Dies erwies sich für die geplante Injektion der definierten Bewehrungsstränge als förderlich, da somit keinerlei Probleme während des Injektionsprozesses aufgetreten sind.

#### 3.1.1.5 Topfzeit

Ein zusätzlicher Faktor für eine reibungslose Injektion waren die langen Verarbeitungszeiten, die im Allgemeinen bei Epoxidharzen als Topfzeiten deklariert werden. Die Topfzeit beschreibt prinzipiell die Zeitspanne in der das Harz eine Viskosität von  $> 800 \text{ mPa} \cdot \text{s}$  erreicht bzw. den Zeitraum zwischen Mischen des Materials und Ende der Verarbeitbarkeit. Ab einer Viskosität von ca.  $800 \text{ mPa} \cdot \text{s}$  wäre daher eine Injektion des Reaktionsharzes mit dem in Abschnitt 3.1.2 und 3.1.5 dargestellten Versuchsaufbau nicht mehr zufriedenstellend. Zudem kann das verwendete Mischvolumen noch einen Einfluss auf die Topfzeit haben, da sich bei einer Erhöhung des Mischvolumens die Topfzeit verringert. Bei den durchgeführten Versuchsreihen konnten für die verwendeten Harze während des Laborklimas von  $20^\circ\text{C} \pm 2 \text{ K}$  eine Topfzeit von ca. 50 - 100 min ermittelt werden. Da die tatsächliche Bearbeitungszeit i. d. R. bei ca. 20 - 30 min lag, konnte auf eine Kühlung der Epoxidharze bzw. der örtlichen Gegebenheiten zugunsten einer Verlängerung der Verarbeitungszeit verzichtet werden. Demzufolge konnten infolge der getroffenen Vorbereitungen und der geringen Injektionsmenge mögliche Problematiken bzgl. der Viskosität während der Durchführung ausgeschlossen werden.

#### 3.1.1.6 Schwindung

Epoxidharze schwinden während dem Erhärtungsprozess, sodass nach zwei Stunden eine Nachverpressung in jedem Falle durchzuführen ist [12]. Da die 3D-gedruckten Probekörper in der Machbarkeitsstudie dieses Forschungsvorhabens im Verhältnis zu späteren Unterzügen bzw. anderen lastabtragenden Betonkonstruktionen klein ausfielen, konnten nur geringe Veränderungen festgestellt werden. Die Gesamtvolumenschwindung von ungesättigten Polyestern und Epoxidharzen wird nach [14] durch die Summe der Härtings- und Abkühlshwindung beschrieben und lässt sich, in Prozent, aus der Änderung der Dichte vor und nach dem Härten wie folgt berechnen:

$$V_S = \frac{\rho_u - \rho_g}{\rho_u} \cdot 100 \quad \text{Gl. 3-2}$$

Dabei ist:

$V_S$  die Gesamtvolumenschwindung, in Prozent

$\rho_u$  die Dichte des ungehärteten Probekörpers, in Gramm pro Kubikzentimeter

$\rho_g$  die Dichte des gehärteten Probekörpers, in Gramm pro Kubikzentimeter

Abbildung 2 veranschaulicht schematisch den Änderungsprozess der Dichte eines Epoxidharzes als Funktion zur Temperatur während dem Härtingsprozess. Die Gesamtvolumenschwindung setzt sich dabei aus verschiedenen Phasen zusammen. In der Aufheizphase (A-B) expandiert das Volumen, sodass die Dichte des Epoxidharzes abnimmt. Nach der thermischen Volumenexpansion steigert sich die Dichte während der isothermen Härtung (B-C). Diese Phase bestimmt den ersten Teil des Schwindprozesses. Im Anschluss an die Reaktionsschwindung beginnt mit der Abkühlschwindung der zweite Teil des Schwindvorgangs. Die thermische Volumenkontraktion erzeugt in der Abkühlphase (C-D-E) nochmals eine Steigerung der Dichte des Epoxidharzes und abschließend endet die Gesamtvolumenschwindung im Allgemeinen bei Raumtemperatur.

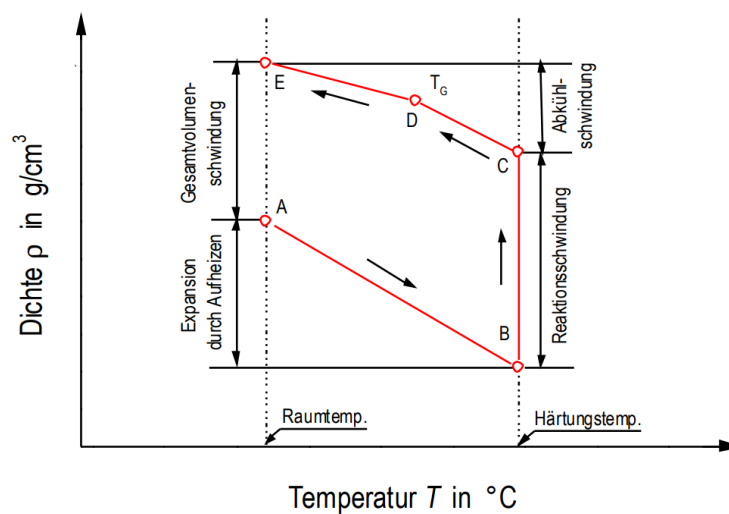


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Dichteänderungen eines Epoxidharz-Systems während des Aufheizens, der Härtung und des Abkühlens (vgl. [15]).

Da der Volumenausdehnungskoeffizient der Eduktgemische prinzipiell größer ist als der des ausgehärteten Epoxidharzes (sowohl oberhalb als auch unterhalb der Glasübergangstemperatur  $T_G$ ), ist der Anteil der Dichteänderung der Aufheizphase größer als der Anteil der Abkühlphase [16]. Der Betrag der Reaktionsschwindung ist abhängig vom individuell gewählten Gemisch bzw. kann durch eine Reihe von Faktoren beeinflusst werden [17] und das Maß der Abkühlschwindung wird während der Härtung durch die Bildung von kovalenten Bindungen bestimmt [18]. Da für den geplanten Einsatz des Epoxidharzes eine möglichst geringe Schwindung angestrebt wird, sind in Abbildung 3 mögliche Faktoren dargestellt, die u. a. die Reaktionsschwindung beeinflussen. Dabei ist zwischen material- und verarbeitungsspezifischen Einflussgrößen zu unterscheiden. Zu den erstgenannten Einflussgrößen gehören die Harz- und Härterkomponente, der Beschleuniger sowie ein dem System eventuell zugegebener Füllstoff. Sie verändern durch ihren chemischen Aufbau und ihre Konzentration die molekulare Struktur und die Vernetzungsdichte des Netzwerkes und damit den Betrag der Reaktionsschwindung [16]. Die Füllstoffe haben den Vorteil, dass sie

durch ihr näherungsweise unveränderliches Volumen im Epoxidharz-System schwindreduzierend wirken. Maßgeblich ist bei der Auswahl des Füllstoffes darauf zu achten, dass der Elastizitätsmodul des Füllstoffes größer sein muss als der des gehärteten Epoxidharzes. Demnach wurden in nachfolgenden Untersuchungen neben der Injektion von reinem Epoxidharz weitere Kombinationen mit Glasfasern oder Carbon analysiert.

Zu den verarbeitungsspezifischen Parametern, die ebenfalls den Reaktionsablauf sowie die Dichte des Epoxidharz-Systems beeinflussen, zählen die Temperaturführung, Oberfläche und Geometrie des Probekörpers und die Wärmeleitfähigkeit zur Umgebung. Abschließend können noch material- und fertigungsbedingte Fehlstellen wie Poren, Hohlräumen etc. einen Einfluss auf die Gesamtvolumenschwindung des Epoxidharzes nehmen.

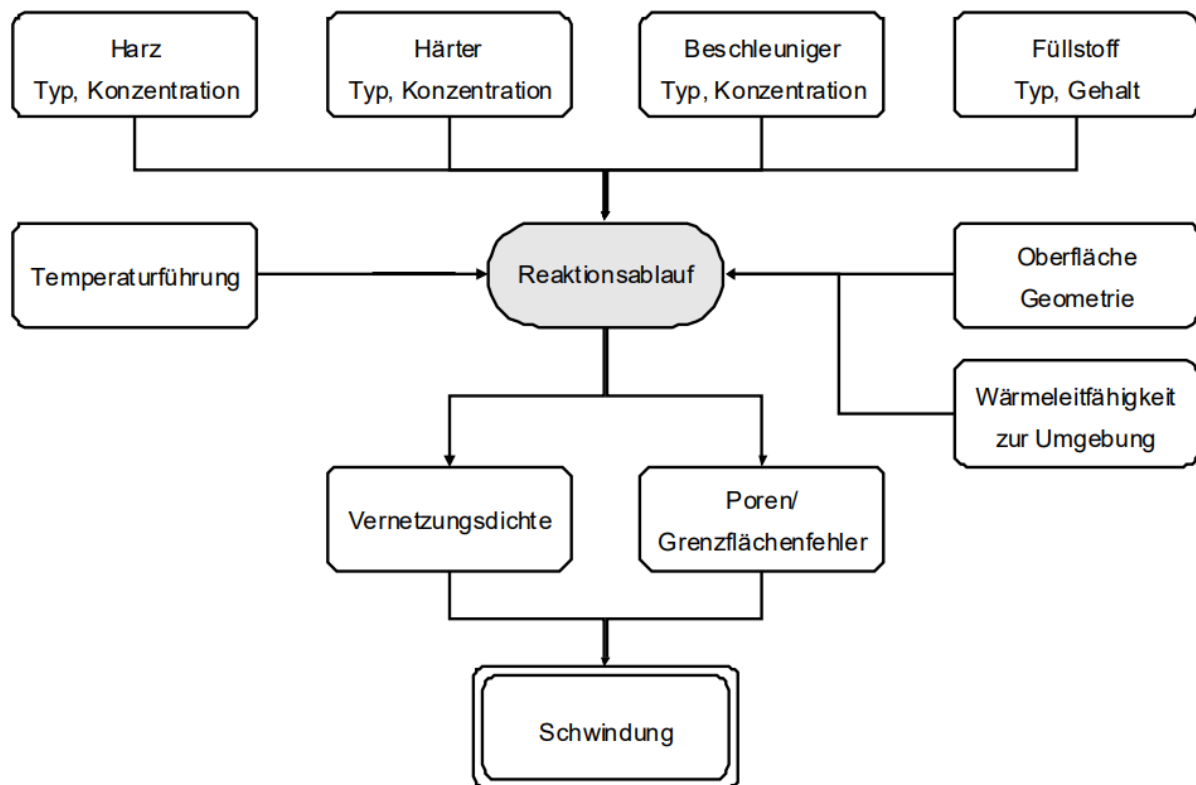


Abbildung 3: Material- und verarbeitungsspezifische Einflussgrößen auf die Reaktionsschwindung [17]

### 3.1.2 Analyse des Fließverhaltens sowie des Verfüllgrades ohne den trockenen Compound innerhalb des Simulationsprüfstandes

#### 3.1.2.1 Allgemeines

Da der Werkstoff Beton auch bei der additiven Herstellung bzw. eine infolge des 3D-Pulverdruckverfahrens erstellte Betonstruktur höhere Druck- als Zugspannungen aufnehmen kann, ist die Implementierung einer Bewehrung zur Steigerung des Lastabtrages zwingend erforderlich. Um die Geometriefreiheit dabei weitestgehend aufrecht zu erhalten und das Einbringen der Bewehrung in den Herstellungsprozess zu integrieren, galt es in den ersten Versuchsreihen zu untersuchen, ob das Injektionsmaterial in die vordefinierten Verzweigungsstränge fließen kann. Weitere Untersuchungskriterien neben dem Fließverhalten des Epoxidharzes waren der Verfüllungsgrad sowie das Eindringverhalten in die 3D-gedruckte bzw. erhärtete Betonstruktur. Dies wurde zunächst, wie im folgenden Abschnitt 3.1.2.2 erläutert, an Probekörpern mit freien Verlaufskanälen (ohne trockenen Compound innerhalb des Kanals) und einer offenen Bauteilhälfte (zur optischen Kontrolle) experimentiert.

#### 3.1.2.2 Versuchsaufbau und Durchführung

Für die Bestimmung realisierbarer Bewehrungsstränge wurde zunächst das Fließverhalten des Epoxidharzes in einem 3D-gedruckten Betonkörper untersucht. Zur Verifizierung, wie diffizil das innere Geflecht der zukünftigen Kanäle hergestellt werden kann, wurde hierzu ein Verzweigungskörper mit der integrierten Modellierungssoftware „SpaceClaim“ von ANSYS® generiert (siehe Abbildung 4).

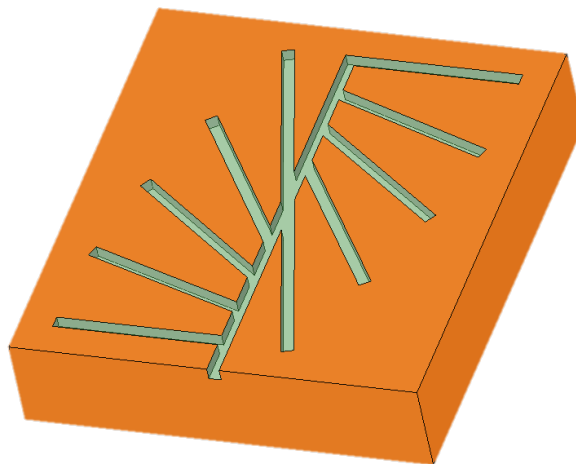


Abbildung 4: Modellierter Verzweigungskörper – SpaceClaim von ANSYS® [19]

Mit Abschluss des Modellierungsprozesses wurde das CAD-Modell in eine Surface-Tessellation-Language-Datei (kurz: STL-Datei, Bezeichnung nach VDI-Richtlinie 3405 [20]), welches als gängiges 3D-Druckformat genutzt wird, konvertiert. Der anschließende Druckprozess, welcher schematisch in Abbildung 5 dargestellt ist, wurde mit dem (vom

Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen der Technischen Universität Kaiserslautern) adaptierten 3D-Drucker der Firma Z Corporation durchgeführt.

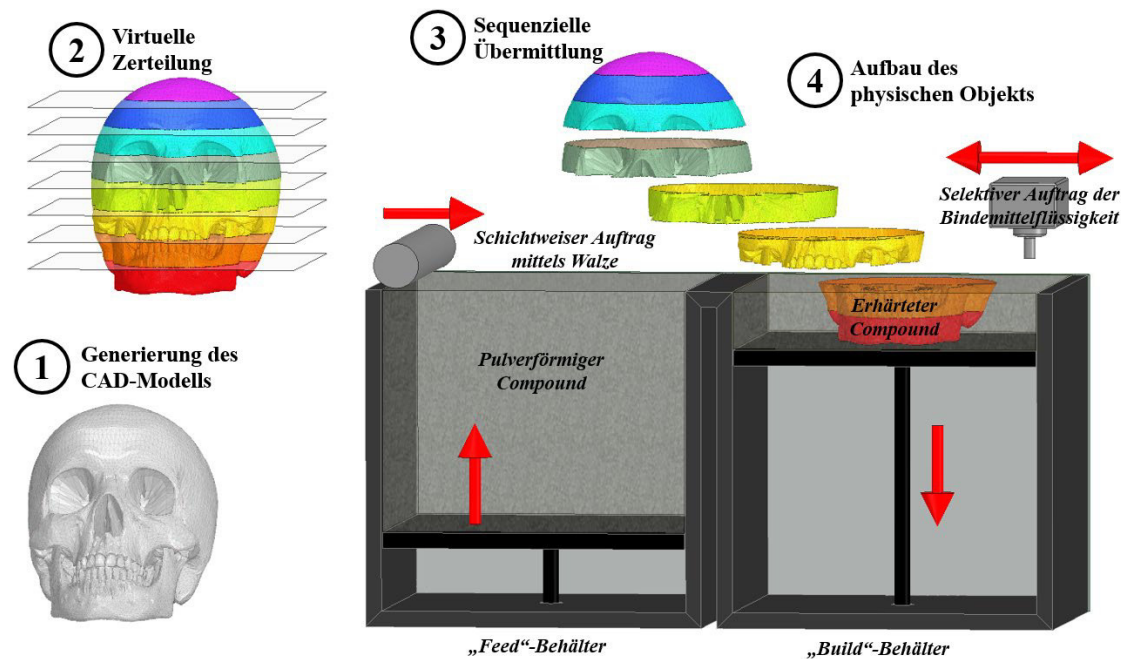


Abbildung 5: Ablaufschema des 3D-Druckprozesses

In diesem Herstellungsprozess wurde darauf geachtet, dass die trockenen Bestandteile jeder Versuchsreihe auf eine Differenz von  $\pm 0,1$  g genau abgewogen und mit einem Intensivmischer vermengt wurden. Die Mischdauer betrug dabei mindestens 5 min, um einen möglichst homogenen Compound zu erhalten. Dieses homogenisierte Trockenmörtelgemisch wurde nachfolgend in den „Feed“-Behälter des 3D-Druckers eingefüllt und danach mittels Abstrichstreifen das Pulver glattgezogen. Im Anschluss wurde noch ein gleichmäßig, homogener Untergrund im „Build“-Behälter (siehe Abbildung 6) erzeugt, um eine glatte Ebene zu erhalten, von der die 3D-gedruckten Betonkörper nach Beendigung des Druckvorgangs entnommen werden können.

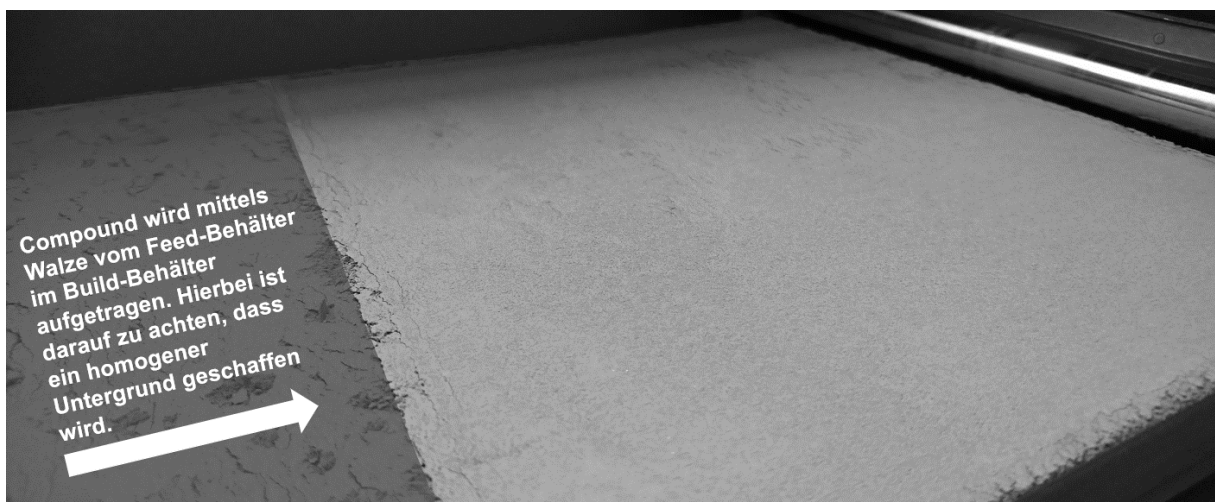


Abbildung 6: Erzeugen eines gleichmäßigen, homogenen Untergrunds im „Build“-Behälter

Die Bindemittelflüssigkeitslösung wurde ebenfalls mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1$  g zusammengestellt und nach dem Mischvorgang in das Schlauchsystem des 3D-Druckers gefüllt. Zur Sicherung, dass mit Beginn des Druckprozesses die gemischte Bindemittelflüssigkeit auf dem entsprechenden Querschnitt des Layers aufgebracht wird, wurde zudem noch ein „Purge“-Vorgang des Druckkopfes vorgenommen. Bei dem s. g. „Purge“-Vorgang spült sich der Druckkopf, damit das destillierte Wasser, welches in den Ruhephasen zwischen den Druckvorgängen zur Schonung der Kartusche eingefüllt wurde, wieder aus dem Drucksystem gelangt und der Druckkopf ausschließlich mit der erforderlichen Bindemittelflüssigkeit befüllt ist. Zur weiteren Überprüfung der Funktionalität des Druckkopfes wurde noch ein „Stripe-Test“ durchgeführt, bei dem der Druckkopf ein definiertes Streifenmuster zur Überprüfung des Feuchtigkeitsauftrages auf ein untergelegtes Papier druckt.

Nach Abschluss der Vorbereitungen des Compounds sowie der Bindemittelflüssigkeit wurden für den Druckprozess die maschinentechnischen Randbedingungen bzw. Einstellungen aus Tabelle 1 justiert und die STL-Dateien im virtuellen Bauraum platziert. Aufgrund des ressourcenschonenden Gedankens wurde bei der Anordnung der Probekörper darauf geachtet, dass die kleinste Achse des Exponates die Bauhöhe im Behälter darstellte, um die erforderliche Menge des Compounds zu reduzieren.

Tabelle 1: 3D-Pulverdrucker Einstellungen

| Beschreibung                 | Kennwerte    |
|------------------------------|--------------|
| Schichtstärke                | 0,1 mm       |
| Walzengeschwindigkeit        | 255 U/min    |
| Geschwindigkeitsmodus (Z310) | 0,15         |
| Service nach X Schichten     | 20 Schichten |
| Max. Druckkopf Temperatur    | 82 °C        |

Bevor der Druckprozess eingeleitet werden konnte, wurde noch mithilfe der ZPrint Software die aufzutragende Feuchtigkeitsmenge definiert sowie die gesamte Struktur entsprechend der spezifischen Prozessparameter in Schichten zerlegt, sodass jede Scheibe als 2D-Layer betrachtet und auf Fehlstellen überprüft werden konnte.

Mit Beginn des Druckvorgangs wurden die Schichten der virtuell zerlegten Probekörper entsprechend der spezifischen Prozessparameter als Pakete von mehreren 2,5D-Layern an den 3D-Pulverdrucker geleitet. Die Übersetzung der geschnittenen STL-Dateien in Druckbefehle erfolgte dabei über einen Algorithmus in der Druckersteuerung. Die daraus resultierenden

Schichtdaten bilden ein monochromes Bitmap. D. h. dass der Druckkopf die Bindemittelflüssigkeit entweder aufsprüht oder nicht abgibt und demnach die Erhärtung einer definierten Position in der jeweiligen Schicht herbeiführt. Die verwendeten 3D-Drucker nutzten dafür eine der „Drop-on-Demand Ink-Jet“-Technologien – das thermische Verfahren bzw. die s. g. Bubble Jet Technologie [21].

Jede einzelne Schicht beinhaltet demnach einen Maschinencode, der aus den Konturen der zu druckenden zweidimensionalen Fläche sowie aus der aufzutragenden Pulverschichtstärke besteht. Die Druckvorgänge wurden auf Basis von Vektoren (wie beim Plotten) verarbeitet, sodass die Bewegungen immer in einer geraden Linie  $X_a, Y_a$  bis  $X_b, Y_b$  verlaufen. Die Y-Achse ist als s. g. Streifenrichtung definiert, in der sich der Druckkopf bewegt, wenn er die Bindemittelflüssigkeit entlang des Portals aufsprüht, sodass letztendlich alle Streifen parallel zur Y-Achse liegen. Die X-Achse steht in der Ebene einer Druckschicht senkrecht zur Streifen(Y)-Richtung, d. h. der Richtung, in der sich der Druckkopf von einem Streifen zum nächsten bewegt. Die Z-Achse ist die vertikale Richtung, die senkrecht zur Druckschicht verläuft (siehe Abbildung 7).

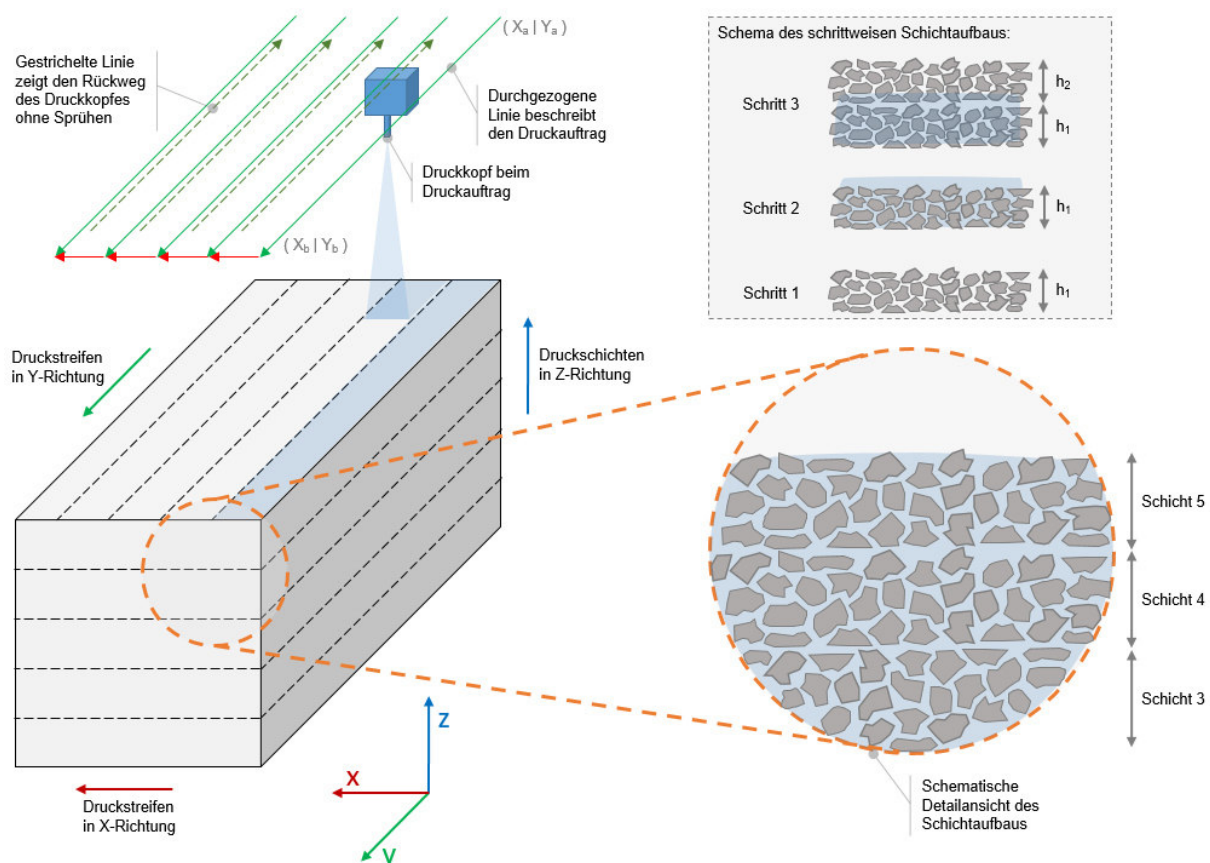


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Druckprozesses [22]

Die Materialverfestigung erfolgte ausschließlich durch den Austritt der Bindemittelflüssigkeit in den berechneten Segmenten sowie einer anschließenden chemischen Reaktion mit dem schichtweise aufgetragenen Trockencompound. Wichtig war es hierbei, dass zwischen den einzelnen Layern der zeitliche Abstand gering gehalten wurde und die aufgetragenen Partikel die Feuchtigkeit des vorherigen Druckauftrags aufnehmen, um einen s. g. frisch in frisch Schichtaufbau gewährleisten zu können.

Als Schichtstärke wurde, wie in Tabelle 1 aufgelistet, für alle Betonkörper ein Maß von 0,1 mm gewählt, das nach Vaezi et al. [23] u. a. im Gegensatz zu geringeren Schichtstärken eine Steigerung der Biegezugfestigkeit erbrachte. Demnach senkte sich mit jedem Layer der „Build“-Behälter um die vorgegebene Schichtstärke und dem gegenüber hob sich die „Feed“-Einheit um das definierte Maß. Im Anschluss an den letzten Layer des ersten Pakets wurden weitere Daten angefordert bzw. übertragen und in Maschinenoperatoren umgewandelt. Der 3D-Drucker konstruierte somit die Probekörper, indem sie die einzelnen 2,5D-Pulverschichten sequentiell miteinander verkittete.

Nach Beendigung des Druckvorgangs wurde der Boden des „Build“-Behälters angehoben, um die Probekörper aus dem Pulverbett zu entfernen. Der überschüssige trockene Compound wurde hinsichtlich des ressourcenschonenden Grundgedankens aus dem Bauraum mittels Sauger, Pinsel und Schaufel entnommen und für weitere Versuchsreihen und Analysen wiederverwendet. Die weiterhin anhaftenden Partikel am Probekörper wurden in einer Absaugstation entfernt. Die in Abbildung 8 exemplarisch veranschaulichte geometrische Optimierung war jedoch abhängig von Form bzw. Struktur des generierten Baukörpers. Beachtet wurde in diesem Bearbeitungsprozess, dass die Probekörper für die Biegezug- und Druckfestigkeitsprüfung anschließend eine möglichst glatte Seitenfläche aufwiesen, um eine konstante Lastverteilung gewährleisten zu können.

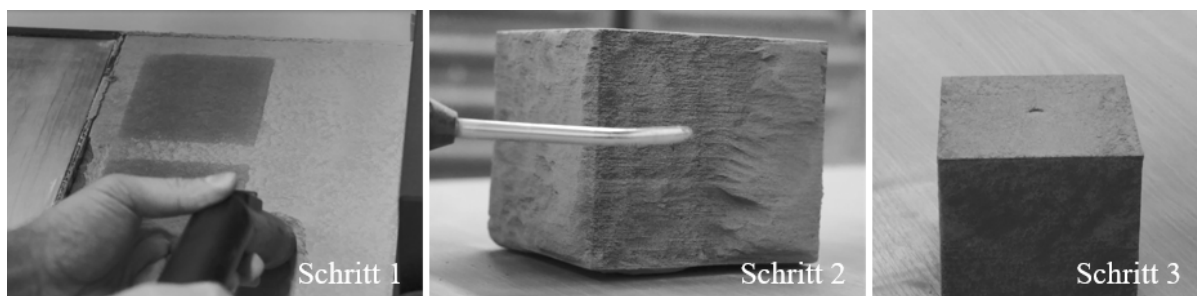


Abbildung 8: v.l.n.r. schrittweiser Nachbearbeitungsprozess

Zur Untersuchung des Fließverhaltens des Reaktionsharzes wurde für die Versuchsreihe der Verzweigungskörper der nicht erhärtende Compound aus den Kanälen rausgeblasen, um differenziert den Kriterien bzgl. des Fließverhaltens in den Strängen nachgehen bzw. eine mögliche Beeinträchtigung des trockenen Pulvers im definierten Kanal ausschließen zu können. Die wesentlichen zu überprüfenden Kriterien bei der Versuchsdurchführung stellten der

Verfüllungsgrad der definierten Stränge, die Notwendigkeit etwaiger Entlüftungskanäle sowie das Entweichen des Epoxidharzes in angrenzende Bereiche dar.

Nach Beendigung der geometrischen Optimierung wurden die Probekörper jeweils zwei Lagerungsvarianten zugeordnet. Zum einen wurde die Lagerung in Wasser mit einer Temperatur von  $20\text{ °C} \pm 2\text{ K}$  vorgenommen und zum anderen wurden die Exponate in spezielle Wassergläser der Firma Wöllner GmbH gelegt. Vorteile der Wasserglasnachbehandlung waren neben der abriebfesteren Oberflächenstruktur die Abdichtung im Randbereich bzw. die Porositätsminimierung der Probekörper. Dies resümiert grundsätzlich aus den zwei Grundvarianten „physikalische Verfestigung“ infolge Dehydratation bzw. Trocknung oder Wasserentzug sowie aus einer „chemischen Verfestigung“ bzw. Härtung [24]. Im Randbereich können beide Varianten unter dem Rasterelektronenmikroskop, wie in Abbildung 9 illustriert, beobachtet werden. Neben der Verdunstung des Wassers und einer prinzipiellen Ausgelierung reagiert das Wasserglas mit dem Kohlendioxid aus der Umgebungsluft und startet die chemische Erhärtung. Im Inneren hingegen reagiert der Silikatbestandteil des Wasserglases mit dem Calciumhydroxid ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), welches als Nebenprodukt aus der chemischen Reaktion (Hydratation) vom Tricalcium- oder Dicalciumsilikat mit dem Wasser entsteht, um weitere Calciumsilikathydratphasen (CSH-Phasen) bilden zu können.

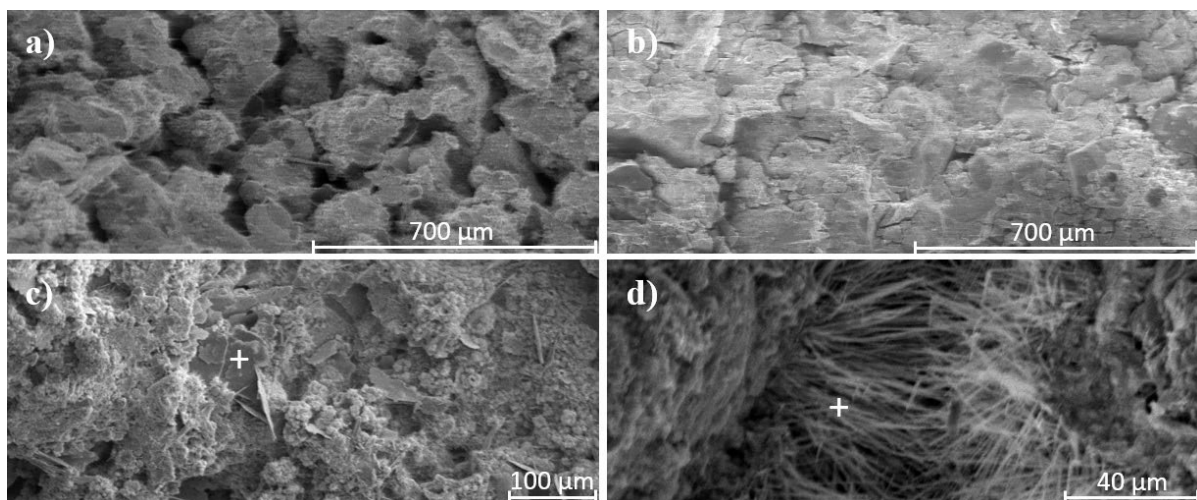


Abbildung 9: REM-Analyse:

- a) offenporige Betonmatrix infolge unzureichender Nachbehandlung
- b) dichte Betonmatrix infolge der Wasserglas-Nachbehandlung
- c) Exemplarisch dargestelltes  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Kristall (mit + gekennzeichnet)
- d) Exemplarisch dargestellte CSH-Nadeln (mit + gekennzeichnet)

Die charakteristische Lagerungsdauer von 28 Tagen nach DIN EN 196-1 [25] wurde für diese Versuchsreihe auf einen Tag reduziert, da einerseits keine Festigkeitsuntersuchung mit den Verzweigungskörpern geplant waren und mit einer ausreichenden Dichtigkeit der in Wasserglas gelegenen Probekörpern zu rechnen war. Nachfolgend wurden die Exponate auf

einer vorgefertigten Injektionsstation, wie in Abbildung 11 und Abbildung 12 dargestellt, befestigt.

Der Aufbau der veranschaulichten Injektionsstation für die Verzweigungskörper bestand aus einer Unterlegplatte, einer Plexiglasscheibe zur optischen Kontrolle des Injektionsprozesses sowie aus einer passenden Vorrichtung für die Injektionsspritze. Zur Sicherung, dass nur die vorgefertigten Kanäle verpresst werden konnten, wurde der Probekörper zwischen Unterlegplatte und Plexiglasscheibe an den Ausflussbereich der Injektionsvorrichtung gelegt und über die Gewindeschrauben zusammengepresst. Weiterhin wurde der Verzweigungskörper mit Silikon abgedichtet, um ein mögliches Ausfließen des Epoxidharzes zu verhindern. Ein gesonderter und wesentlicher Aspekt, den es neben den klimatischen Bedingungen aus Abschnitt 3.1.1.3 im Zuge der Injektionsvorbereitungen 3D-gedruckter Betonkörper einzuhalten galt, war, dass die Injektionsöffnung ähnlich zum konventionellen Anwendungsgebiet für eine kraftschlüssige Verbindung zwischen Versuchsaufbau und Probekörper trocken sowie frei von haftungsstörenden Verunreinigungen sein mussten [26]. Somit konnte eine saubere Abdichtung gewährleistet bzw. ein Ausfließen des Reaktionsharzes während des Injektionsvorgangs verhindert werden.

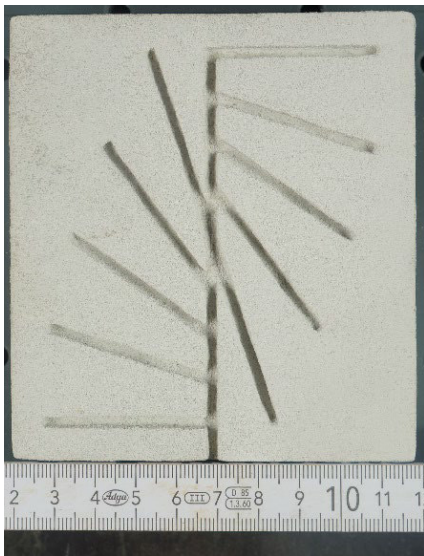


Abbildung 10: Verzweigungskörper mit freigeblasenen Bewehrungskanälen

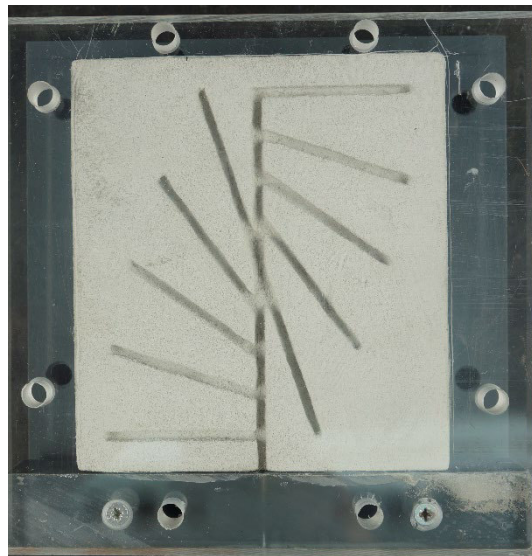


Abbildung 11: Verzweigungskörper mit freigeblasenen Bewehrungskanälen eingefasst in der vorgefertigten Injektionsapparatur



Abbildung 12: Mit Wasserglas nachbehandelter Probekörper zzgl. freigeblasener Bewehrungskanäle eingefasst in der vorgefertigten Injektionsapparatur und mit Silikon abgedichtet



Abbildung 13: Mit Wasserglas nachbehandelter Probekörper zzgl. eines nachträglich injizierten Bewehrungsharzes

Nach Abschluss des Injektionsvorgangs wurde der Probekörper von der Halterung getrennt und hinsichtlich der aufgestellten Untersuchungskriterien analysiert. In Abbildung 13 ist deutlich zu erkennen, dass die vordefinierten Verzweigungsstränge komplett ausgefüllt und kaum Luftblasen eingeschlossen wurden. Das Fließverhalten des eingesetzten Epoxidharzes lag aufgrund der in Abschnitt 3.1.1.4 thematisierten Eigenschaften im niederviskosen Bereich und ließ sich somit bedenkenlos injizieren. Des Weiteren konnte bei den in Wasserglas gelagerten Probekörpern kein sichtbares Eindringen des Injektionsharzes in die 3D-gedruckte bzw. erhärtete Betonstruktur ermittelt werden. Zur Überprüfung der optischen Wahrnehmung wurde eine schadensfreie Untersuchung des Versuchsobjektes mithilfe der computer-tomografischen Analyse verifiziert. Anhand dieser Untersuchungsmethode ließ sich der Probekörper, wie in Abbildung 14 illustriert, durchleuchten, drehen und in einzelne Layer zerteilen, um etwaige Dichteunterschiede infolge einer Epoxidharz-Injektion identifizieren zu können. Gleichmaßen konnte auch hier kein Eindringen des Epoxidharzes in die 3D-gedruckte sowie nachbehandelte Struktur festgestellt werden.

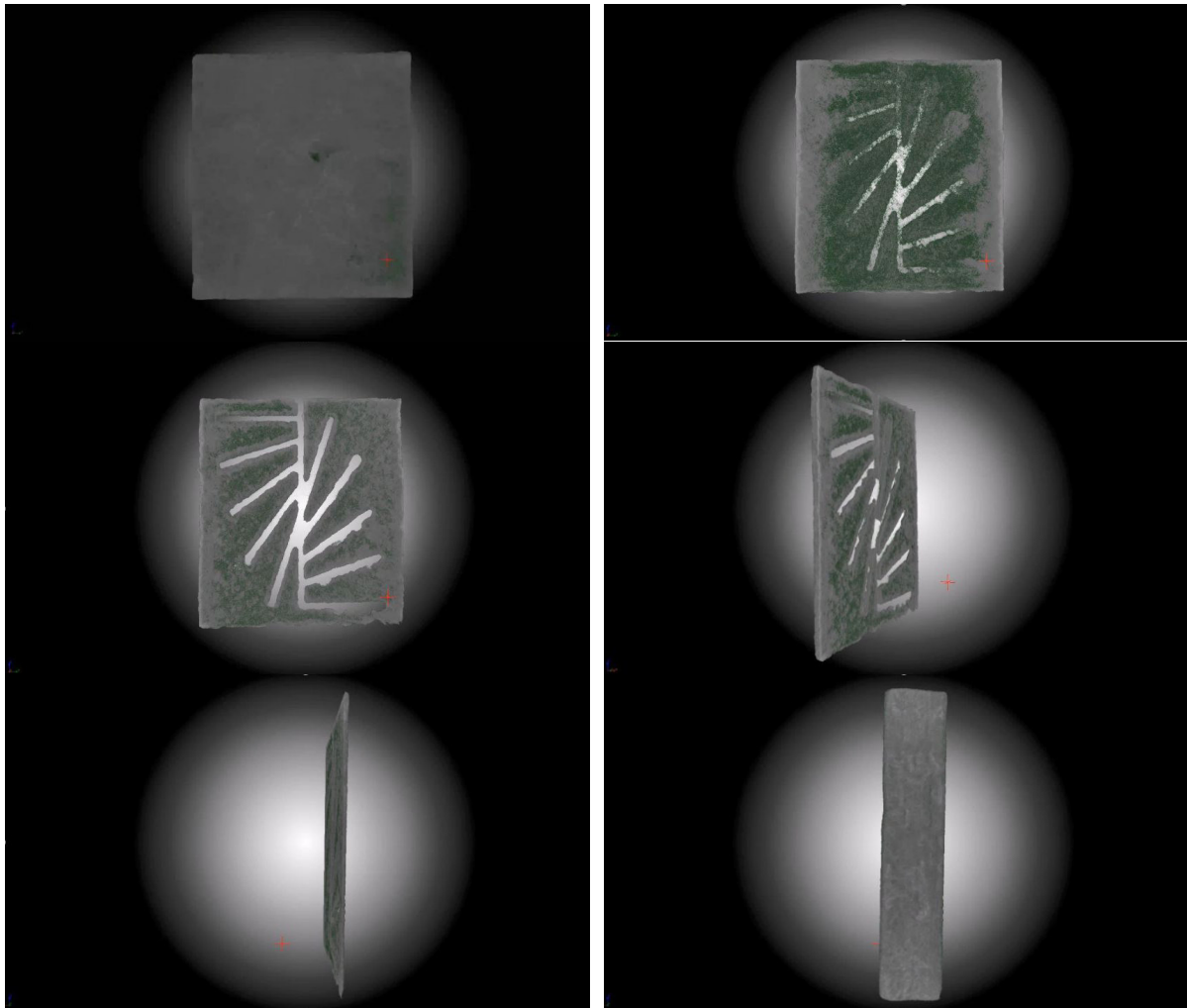


Abbildung 14: Computertomografische Analyse eines verpressten Verzweigungskörpers (Drehung um die z-Achse)

Bis auf die im jeweiligen Abschnitt einzugehenden Unterschiede beschreibt diese bündige Zusammenfassung den Herstellungsprozess bis zur Nachbehandlung der Probekörper, sodass im weiteren Verlauf für die anschließenden Versuchsreihen hierauf verwiesen werden kann.

### 3.1.3 Untersuchung des Bewehrungsdurchmessers hinsichtlich des Feuchtigkeitseintrags

#### 3.1.3.1 Allgemeines

Eine wesentliche Frage in Bezug auf die Herstellung zukünftiger 3D-gedruckter Betonstrukturen inklusive nachträglicher Bewehrung ist die Ausführbarkeit berechneter Kanäle zur Aufnahme der aufkommenden Zugspannungen. Hierfür wurde in der ersten Phase die Ausbildung bzw. der Durchmesser zukünftiger Kanäle untersucht. Da die definierten Zugstränge in nachfolgenden Probekörpern nicht wie in Abschnitt 3.1.2.2 offen liegen und sich über die gesamte Strangtiefe ungehindert freiblasen lassen, muss u. a. ein praktikabler

Bindemittelflüssigkeitseintrag ermittelt werden, da die angrenzenden Partikel beim Druckvorgang Feuchtigkeit vom bedruckten Bereich ziehen bzw. aufgrund eines zu hohen Bindemittelflüssigkeitsauftrags die Lösung in den unbedruckten Compound ausblutet. Um diesen Effekt zu berücksichtigen, wird in Vorversuchen der Grad der Feuchtigkeitsabsorption bestimmt, sodass in späteren Versuchsreihen der gewünschte Durchmesser des Zugstrangs gedruckt werden kann.

Für den 3D-Drucker der Firma Z Corporation spiegelt sich der Feuchtigkeitseintrag in Form des Shell/Core-Wertes wider. Der Shell/Core-Wert beschreibt das Verhältnis zwischen der ausgetragenen Feuchtigkeitsmenge im Inneren des bedruckten Querschnittes (Core) und der Feuchtigkeit im Randbereich des bedruckten Segmentes (Shell). Dieses Verhältnis wurde für alle Versuchsreihen mit 1/2 festgelegt, um das „Ausbluten“ bzw. den Absorptionseffekt angrenzender Partikel aus dem nicht bedruckten Areal möglichst gering zu halten. Des Weiteren bedarf es zur Sicherstellung der gewünschten Proportionen und Details des fertigen Betonkörpers einen sehr schnell reaktiven sowie packungsdichten Compound. Da sich trotz der beschriebenen Maßnahmen Unterschiede in der Größe des Absorptionseffektes darstellen, wurde in diesen Versuchsreihen ein optimaler Shell/Core-Wert in Bezug auf einen funktionalen Bewehrungsdurchmesser ermittelt.

### 3.1.3.2 Versuchsaufbau und Durchführung

Für diesen Untersuchungsgegenstand wurden sechs verschiedene Probekörper mit „SpaceClaim“ von ANSYS® modelliert. Die Würfel besaßen dabei eine Kantenlänge von 40 mm und die Durchmesser der gradlinig verlaufenden Stränge steigerten sich, wie in Abbildung 16 veranschaulicht, in 5 mm Steps von 10 mm bis 35 mm. Zur Erläuterung der Generierung druckfähiger STL-Dateien sowie der Darstellung des Druckprozesses wird an dieser Stelle auf Abschnitt 3.1.2.2 verwiesen.

Der verwendete Compound wurde mit drei unterschiedlichen Feuchtigkeitsmengen benetzt. Die erste Versuchsreihe wies einen Shell/Core-Wert von 150/300 auf, was einem w/z-Wert von 0,63 entspricht. Im zweiten Durchgang wurde ein Shell/Core-Wert von 130/260 (w/z-Wert = 0,51) verwendet und für die letzte Variation wurden die Einstellungen des Druckkopfes in der Software mit einem Shell/Core-Wert von 110/220 (w/z-Wert = 0,41) angegeben.

Infolge der differierenden Auftragsmengen der Bindemittelflüssigkeit konnten die in Abbildung 17 aufgeführten Druckaufträge beobachtet werden. Zum einen war der bedruckte Layer erwartungsgemäß bei einem niedrigeren Shell/Core-Wert (geringerem w/z-Wert) nicht so stark gesättigt und zum anderen wies er kein optisch erkennbares „Ausbluten“ bzw. Absorbieren der Feuchtigkeit der angrenzenden Partikel auf. Demzufolge konnten die Probekörper nach einer Aushärungszeit von ca. 30 min schnell und effektiv aus dem Bauraum entnommen sowie von anhaftenden Partikeln mittels Druckluft befreit werden. Die geometrische Nachbehandlung in Form des Freiblasens der unterschiedlichen Kanäle erwies sich infolgedessen als unkompliziert. Ausschließlich die Probekörper mit einem

Kanaldurchmesser von 35 mm waren aufgrund der verbliebenen Wandstärke von 2,5 mm zu gering bemessen, sodass die fragile Struktur in diesen Bereichen zerstört wurde (siehe Abbildung 15). Ob eine angepasste Lagerungsvariante zur Verhinderung dieser Art der Beschädigung beiträgt oder ob das Freiblasen des Kanals notwendig und ein nachträgliches Verpressen der Bewehrungsstränge mit innenliegendem Trockenmörtel möglich ist, wird in den weiteren Abschnitten 3.1.4 und 3.1.5 behandelt.



Abbildung 15: Fragile Struktur bei zu geringen Wandstärken

Mit einem höheren Shell/Core-Wert von 130/260 zeichnete sich, wie in Abbildung 17 (Mitte) dargestellt, eine gesättigtere Feuchtigkeitsschicht auf dem bedruckten Layer ab. Ungeachtet dessen hielt sich der Absorptionseffekt im Rahmen, sodass der nicht bedruckte Compound im Inneren des kleinsten Bewehrungsdurchmessers von 10 mm kaum Bindemittelflüssigkeit absorbiert hat. Demnach verlief die Nachbehandlung aller Exponate ähnlich zur geometrischen Optimierung der Probekörper mit einem Shell/Core-Wert von 110/220 unkompliziert.

Bei den Versuchsreihen mit einem Shell/Core-Wert von 150/300 war der bedruckte Layer zwar ebenfalls gut mit der Lösung benetzt, jedoch zeichnete sich bei den kleineren Durchmessern ein Zulaufen des Bereiches ab. Da der unbedruckte Compound daraufhin anfängt zu reagieren bzw. auszuhärten, führte dies gerade beim Freiblasen der Probekörper mit einem Durchmesser von 10 mm zu erschwerten Bedingungen.

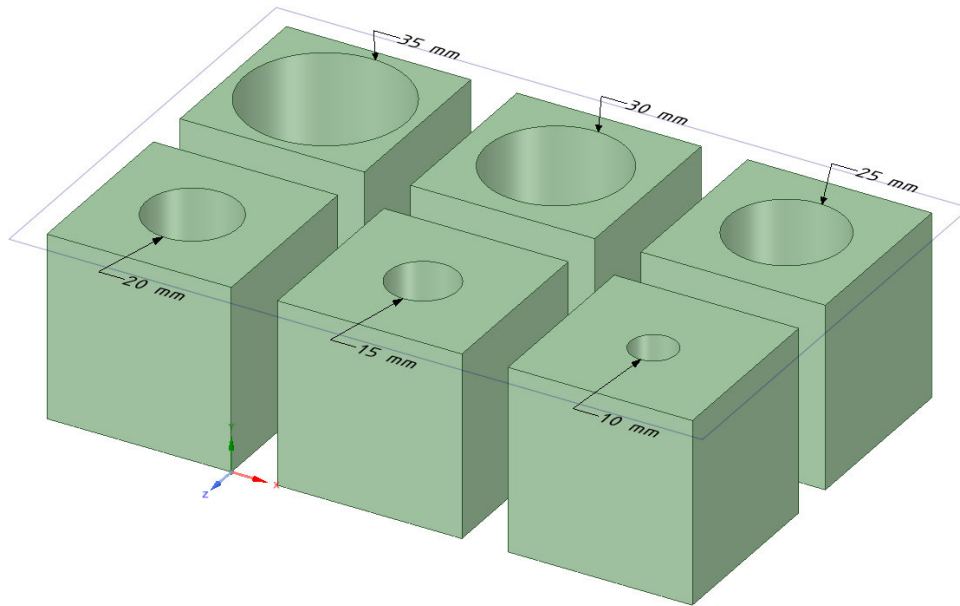


Abbildung 16: Modellierte Probekörper zur Untersuchung des Ausblutungsgrades bzw. des Absorptionsgrades der angrenzenden Partikel

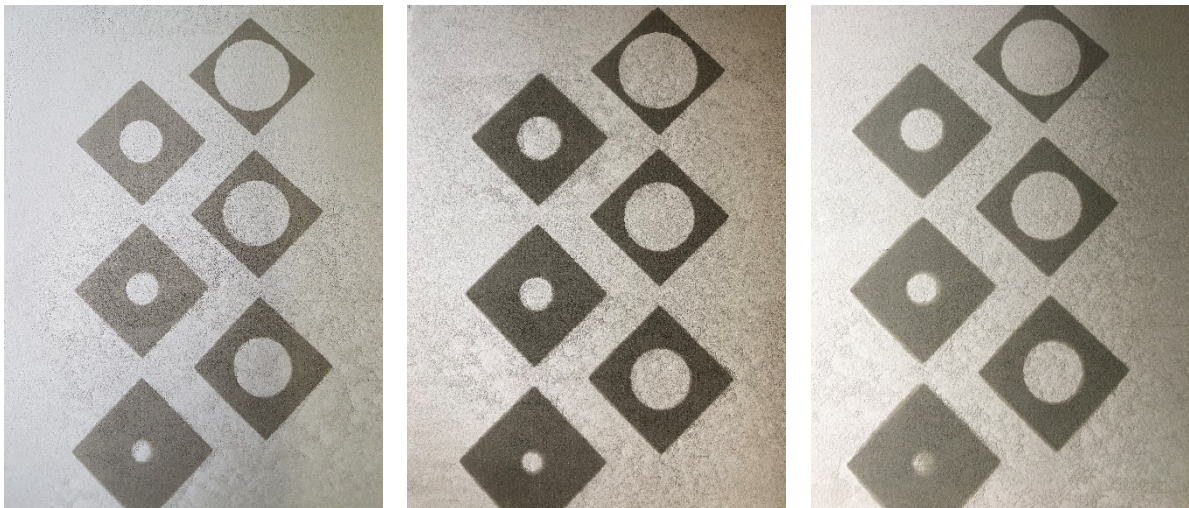


Abbildung 17: Druckaufträge der unterschiedlichen Shell/Core-Einstellungen (v.l.n.r. 110/220, 130/260, 150/300)

Hinsichtlich der Herstellbarkeit eines 3D-gedruckten Betonkörpers mit einer innenliegenden Injektionsbewehrung, die nachträglich in vordefinierte Kanäle fließen soll, sind zwei Faktoren von wesentlicher Bedeutung. Zum einen soll die Geometrie auch im Inneren der Betonstruktur den geplanten Vorstellungen entsprechen und zum anderen soll der 3D-gedruckte Beton die notwendige Festigkeit aufweisen. Dass diese beiden Faktoren nicht proportional, sondern eher antiproportional verlaufen, ist aus der beschriebenen Untersuchung in Bezug auf den Absorptionseffekt sowie der Analyse zum Verhalten der Druckfestigkeit zum w/z-Wert zu entnehmen. Aus bereits durchgeführten Untersuchungen [27] ist die Korrelation zwischen einem höheren w/z-Wert und einer höheren Druckfestigkeit der 3D-gedruckten

Betonstrukturen bekannt, jedoch steht für dieses Forschungsvorhaben die Umsetzbarkeit eines im Vorhinein definierten Bewehrungsverlaufs im Vordergrund.

Der nicht ersichtliche Absorptionseffekt bei einem niedrigen Feuchtigkeitseintrag ist in Bezug auf die gewünschte Geometrieerhaltung des fertigen Exponates sowie in Anbetracht der späteren Nachbehandlungsarbeiten als vorteilhaft zu sehen, jedoch ist die Opportunität einer höheren Druckfestigkeit als wesentlicher bzw. maßgebender zu kennzeichnen. Da die geometrische Nachbehandlung für einen Shell/Core-Wert von 130/260 noch funktional war und sich Bewehrungsstränge mit einem Durchmesser von 10 mm ohne Risiken bzgl. des Aushärtens des innenliegenden Trockenmörtels umsetzen ließen, wurde als Optimum zwischen hoher Druckfestigkeit und geringem Ausblutungsgrad diese Parametereingabe für den 3D-Drucker festgelegt.

### **3.1.4 Untersuchung der Lagerungsbedingungen**

#### **3.1.4.1 Allgemeines**

Die charakteristische Lagerungsvariante konventionell hergestellter Betonkörper ist nach DIN EN 12390-2 [28] die Wasserlagerung bei einer Temperatur von  $20\text{ °C} \pm 2\text{ K}$ . Diese Form der Lagerung wurde u. a. für die 3D-gedruckten Betonstrukturen in vorangegangenen Forschungsstudien gewählt, jedoch nimmt die Porosität neben der damit im Zusammenhang stehenden Druckfestigkeit nun für dieses Forschungsvorhaben bei der Durchführbarkeit einer nachträglichen Injektion vordefinierter Kanäle eine maßgebendere Bedeutung ein. Daher müssen die Nachbehandlungsmethoden sowie die Lagerungsvarianten unter Berücksichtigung einer hinreichend dichten Oberflächenstruktur des Betons angepasst werden, um letztendlich eine Injektion der berechneten Zugstränge sicherstellen und ein Hineinfließen des Epoxidharzes in den gesamten 3D-gedruckten Probekörper zu verhindern.

#### **3.1.4.2 Versuchsaufbau und Durchführung**

Für die Analyse der Lagerungsbedingungen wurden erneut die Versuchskörper mit den differierenden Öffnungsweiten gedruckt. Hierbei galt es zunächst zu untersuchen, ob der nicht bedruckte Compound für die gesamte Lagerungsdauer innerhalb der Struktur belassen werden kann und sich während des Zeitraums nur im Randbereich verfestigt. Dazu wurden drei Lagerungsvarianten definiert:

- Lagerung in Wasser bei einer Temperatur von  $20\text{ °C} \pm 2\text{ K}$
- Lagerung in Wasserglas bei einer Temperatur von  $20\text{ °C} \pm 2\text{ K}$
- Lagerung im Klimaschrank bei einer Temperatur von  $20\text{ °C} \pm 2\text{ K}$  und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 85 %

Aufgrund der erzielten Ergebnisse aus Abschnitt 3.1.3 wurden die Probekörper mit einem Shell/Core-Wert von 130/260 gedruckt. Somit konnte zum einen das vollständige Verschließen der kleineren Kanaldurchmesser infolge des Absorptionseffektes der angrenzenden Partikel vermieden werden und zum anderen blieben die 3D-gedruckten Strukturen in ihrer gewünschten Form erwartungsgemäß erhalten. Die unterschiedlichen Probekörper konnten im Nachgang unkompliziert geometrisch optimiert sowie der entsprechenden Lagerungsvariante zugeordnet werden. Die Lagerungsdauer wurde mit einem, sieben und 28 Tag(en) variiert.

In den flüssigen Lagerungsmethoden drang das jeweilige Medium direkt, wie in Abbildung 18 exemplarisch schrittweise veranschaulicht, in die Strukturen ein, wobei die Exponate im Klimaschrank trotz der hohen relativen Luftfeuchtigkeit keinerlei optische Veränderungen aufwiesen (siehe Abbildung 19).

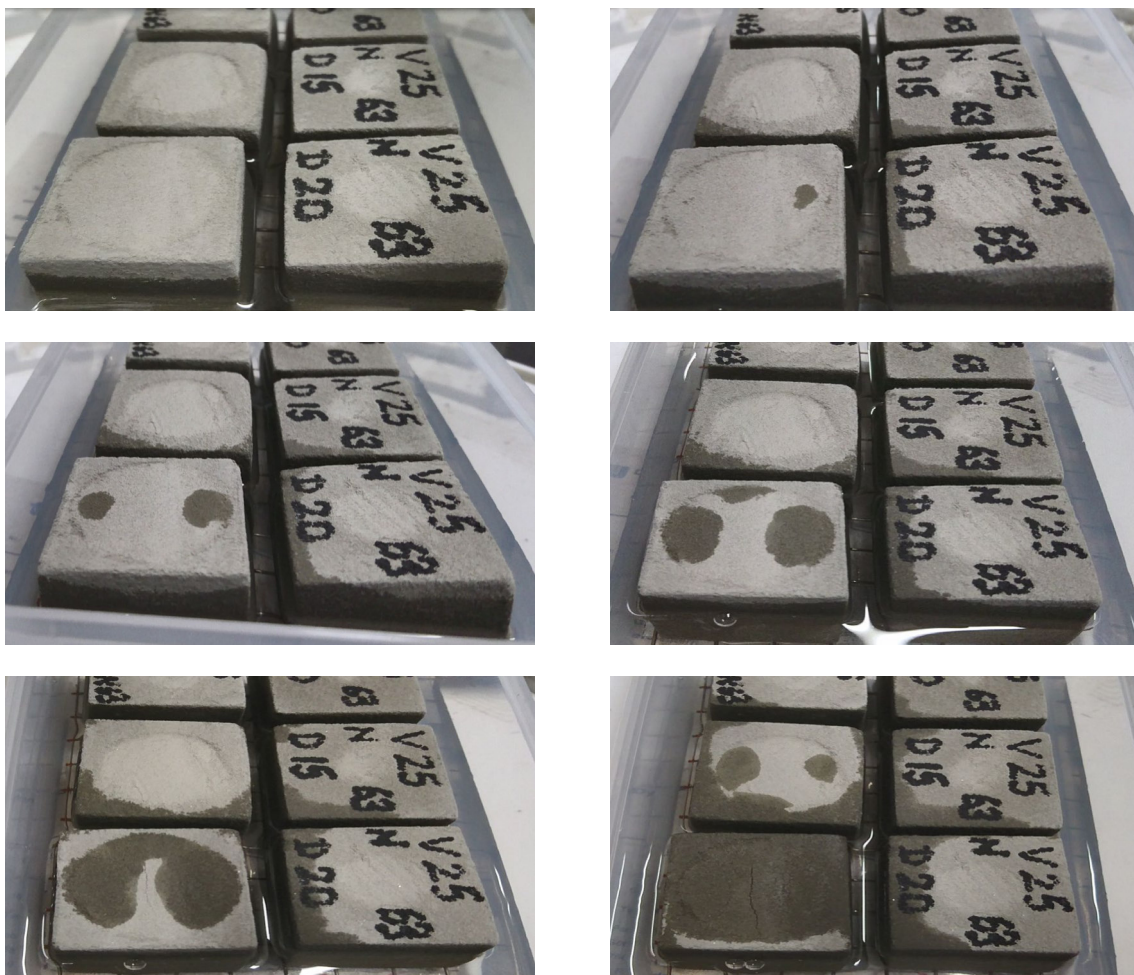


Abbildung 18: Lagerung 3D-gedruckter Betonkörper mit innenliegendem Trockencompound in Wasserglas  
(Bilderfolge im Zeitraum von ca. 4 min)

|        |               |        |               |
|--------|---------------|--------|---------------|
| o. l.: | bis 140 sec.  | o. r.: | nach 140 sec. |
| m. l.: | nach 150 sec. | m. r.: | nach 170 sec. |
| u. l.: | nach 190 sec. | u. r.: | nach 240 sec. |

Nach Abschluss der jeweiligen Lagerungsdauer wurde zunächst versucht die Randbereiche der gedruckten Öffnungen mit einem Spatel aufzukratzen. Hierbei konnte bei den in Wasserglas gelegenen Probekörpern kein sichtbarer Unterschied erzielt und bei den in Wasser gelegenen Exponaten nur ein leichtes Absanden der Oberfläche verzeichnet werden. Durch das Abkratzen der Oberfläche kam jedoch kein trockener Compound zum Vorschein, sodass man keinen signifikanten Unterschied erkennen konnte. Ausschließlich die im Klimaschrank befindlichen Versuchskörper ließen einen merklichen Abtrag der leicht erhärtenden Randstruktur zu, sodass auch nach 28 Tagen in dem feuchten Klima nach wenigen Millimetern der noch trockene Compound im Inneren zum Vorschein trat. Daraufhin wurden die Probekörper jeweils aufgespalten, um verifizieren zu können, wie sich der zu Beginn trockene Kern durch die jeweilige Lagerung verändert hat.

Der unbedruckte Compound erhärtete in den Fluiden komplett, jedoch ging der Kanal der im Wasser gelagerten Probekörper keinen richtigen Verbund mit der bedruckten Betonmatrix ein, sodass der Zylinder im Nachgang von der angrenzenden Struktur abgetrennt werden konnte. Dies ließ sich im Vergleich zur Wasserglaslagerung nicht feststellen. Ein nachträgliches Ausstanzen des in Wasser erhärtenden Zylinders ist aufgrund des teilweise parabelförmigen Zugstrangverlaufs topologieoptimierter Betonstrukturen keine Option. Die Exponate aus dem Klimaschrank hingegen bestätigten nach dem Aufspalten der Versuchskörper, dass der Compound im Inneren trotz einer Lagerung von bis zu 28 Tagen und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 85 % trocken blieb. Nur der bereits ausgekratzte Randbereich von ca. 3 mm verfestigte sich durch die umgebende Feuchtigkeit. Demnach konnte der zerteilte Kanal, wie in der Abbildung 19 eines im Klimaschrank gelagerten Probekörpers, vollständig freigeblasen werden.

Anhand der durchgeführten Untersuchungen lässt sich rückschließend beurteilen, dass der trockene Compound bei einer Lagerung in flüssigen Medien, wie Wasser oder Wasserglas, nicht in den vordefinierten Kanälen bleiben kann, da nicht nur der Randbereich mit dem Trockencompound reagiert, sondern der komplette Strang erhärtet und somit eine nachträgliche Injektion verhindern würde. Demnach bietet sich für die Analyse des Fließverhaltens des Reaktionsharzes mit trockenem Compound innerhalb des Simulationsprüfstandes in Abschnitt 3.1.5 ausschließlich die Lagerung im Klimaschrank an. Die Variante einer Trocken- bzw. Luftlagerung wurde aufgrund der Dehydrierungsproblematik 3D-gedruckter Betonkörper ausgeschlossen. Eine weitere zu untersuchende Methodik stellt die Lagerung der Probekörper in Wasser oder Wasserglas mit freigelegten Strängen sowie einer anschließenden Injektion dar, was ebenfalls in Abschnitt 3.1.5 zu Analogiezwecken verfolgt wird.

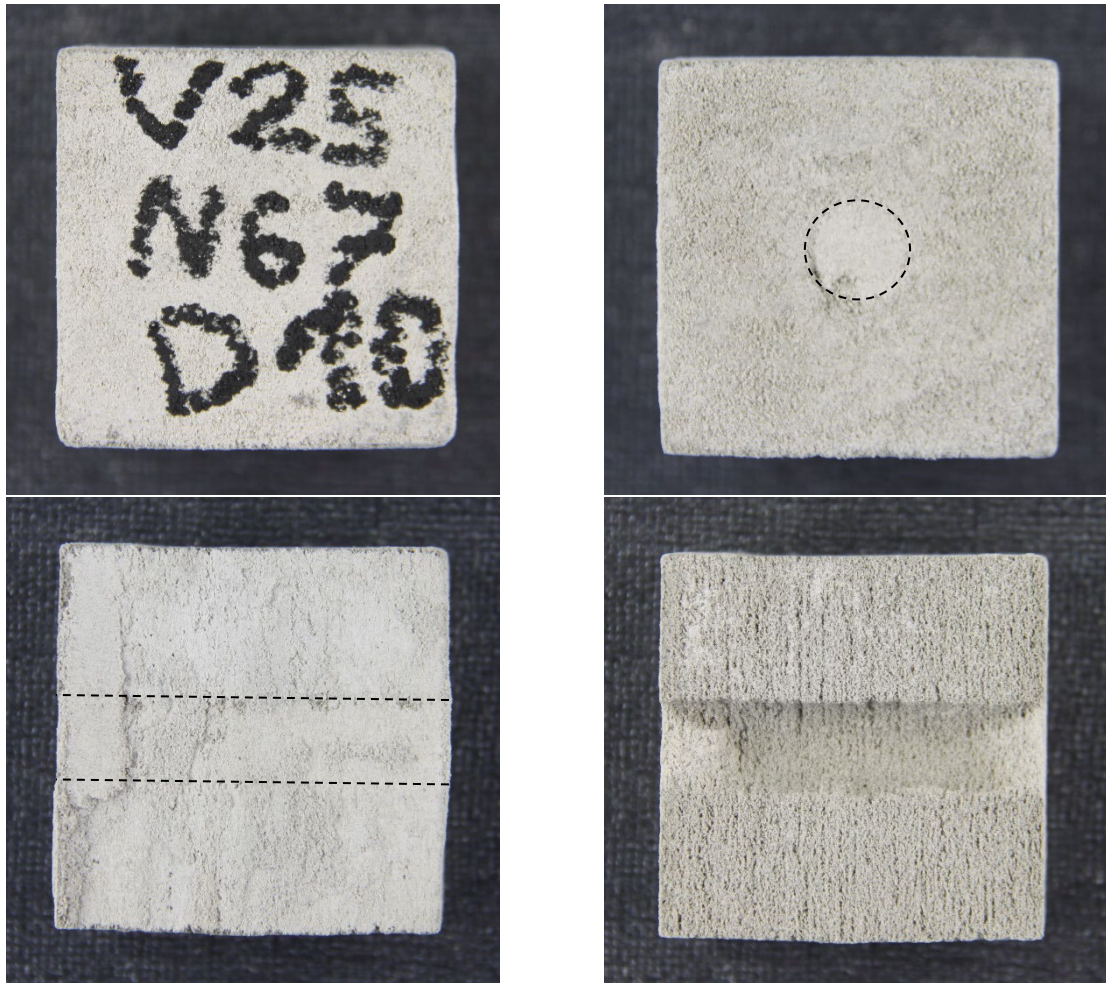


Abbildung 19: Strukturierungszustand 3D-gedruckter Probekörper infolge der Nachbehandlung im Klimaschrank

- o. l.: Probekörper inkl. Bezeichnung (Durchmesser = 10 mm)
- o. r.: Draufsicht des Probekörpers mit innenliegendem Trockenmörtel
- u. l.: Zerteilter Probekörper mit trockenem Compound im Inneren
- u. r.: Zerteilter Probekörper mit freigeblasenem Kanal

### 3.1.5 Analyse des Fließverhaltens mit dem trockenem Compound innerhalb des Simulationsprüfstandes

#### 3.1.5.1 Allgemeines

Neben der Möglichkeit die produzierten Betonstrukturen gänzlich vom trockenem Compound befreien zu können, wurde zur Verifizierung des Fließverhaltens eines Epoxidharzes innerhalb des Simulationsprüfstandes getestet, ob die Beseitigung des Trockenmörtels aus den Zugsträngen notwendig ist. Sofern die Ausführbarkeit gewährleistet ist bzw. der Verbleib des trockenem Pulvers im Bauraum kein Hindernis darstellt, könnte man die Nachbehandlung bei der geometrischen Optimierung 3D-gedruckter Betonstrukturen um einen Schritt reduzieren. Zur Untersuchung der aufgeführten Fragestellung wurden die in Abschnitt 3.1.1.2 dokumentierten Injektionstechniken – Verpressung und Tränkung – eingesetzt.

Für diese Versuchsserien wurden wiederum die speziellen Epoxidharze der Firma WEBAC-Chemie mit einer niedrigen Viskosität (siehe Abschnitt 3.1.1.4) appliziert, um ein etwaiges Durchdringen des Compounds mit der hohen Packungsdichte ermöglichen zu können. Konträr dazu bestärkt es das Risiko einer vollständigen Injektion des 3D-gedruckten Betonkörpers. Diesem gegensätzlichen Spannungsfeld wurde sich im folgenden Abschnitt gewidmet.

### 3.1.5.2 Versuchsaufbau und Durchführung

Zur Untersuchung eines Verbleibs des trockenen Compounds im Inneren der vordefinierten Bewehrungsstränge bzw. zur Analyse des Fließverhaltens mit dem Compound innerhalb des Simulationsprüfstandes wurden erneut Würfel mit einem innenliegenden Kanal gedruckt. Die Lagerung erfolgte angesichts der in Abschnitt 3.1.4 erbrachten Erkenntnisse im Klimaschrank bei einer Temperatur von  $20\text{ °C} \pm 2\text{ K}$  und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 85 %. Da bei einer Lagerung von einem Tag nicht davon auszugehen ist, dass die 3D-gedruckte Betonmatrix eine ausreichende Dichtigkeit gegenüber dem niederviskosen Epoxidharz aufweist, wurden die Exponate nach sieben, 28 und 56 Tagen aus dem Klimaschrank entnommen.

Nach der Entnahme wurden die Probekörper zur optischen Kontrolle während des Injektionsprozesses halbiert, auf der Versuchstation aus Abschnitt 3.1.2 befestigt und abgedichtet. Für die Injektion mittels Trängung wurde der Versuchsstand zur Sicherstellung eines stetigen Nachfließens hochkant aufgestellt, der Spritzenzylinder ohne Spritzenkolben in die vorgefertigte Öffnung gesteckt und von oben mit dem Reaktionsharz befüllt. Die Verpressung erfolgte in den ersten Vergleichsuntersuchungen per Hand über den Spritzenkolben und zur besseren Sichtbarkeit des Epoxidharzes wurde es für diese Versuchsreihen wie in vorangegangenen Analysen gefärbt.

In Abbildung 20 ist schrittweise der Injektionsvorgang eines geschnittenen Probekörper mit innenliegendem Trockenmörtel veranschaulicht. In Bezug auf das Fließverhalten des gefärbten Epoxidharzes mit dem Compound innerhalb des Simulationsprüfstandes sind keine deutlichen Unterschiede zwischen Trängung und Verpressung zu verzeichnen. Einzig die absehbar kürzere Injektionsdauer bei der Verpressmethode konnte festgehalten werden. Maßgebend für den Injektionsprozess war hingegen das Fließverhalten des Reaktionsharzes quer durch den unbedruckten bzw. trockenen Compound. In Hinblick darauf war zu erkennen, dass das niederviskose Epoxidharz das Pulver durchdringen konnte und folglich einen festen Verbund mit dem trockenen Compound und der gedruckten Betonmatrix eingehen konnte. Als negativ ist demgegenüber das Eindringverhalten bzw. das Versickern des Reaktionsharzes in die 3D-gedruckte Struktur zu bewerten. Dies ließ sich durchaus nach Ausbau eines weiteren Probekörpers aus der Injektionsstation im umliegenden Bereich identifizieren (siehe Abbildung 21 rechts).

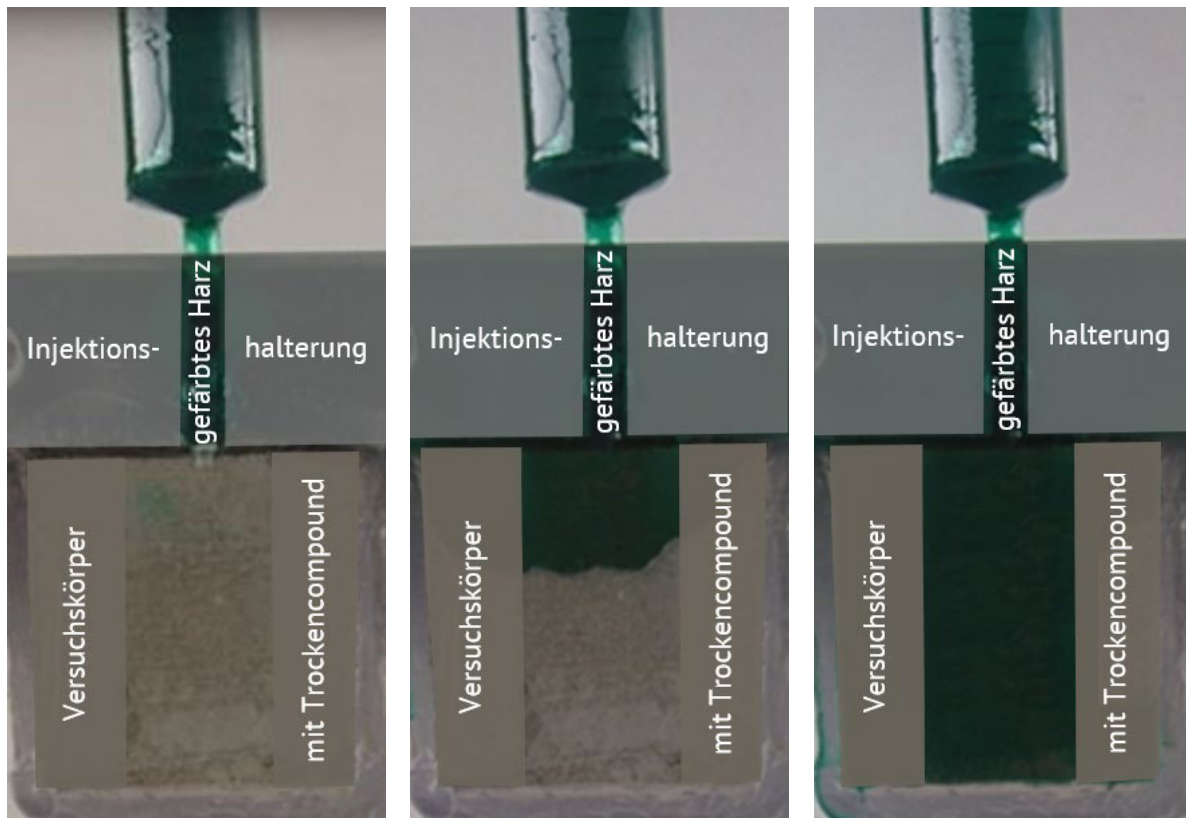


Abbildung 20: Exemplarische Injektion eines geschnittenen Probekörper mit innenliegendem Trockenmörtel

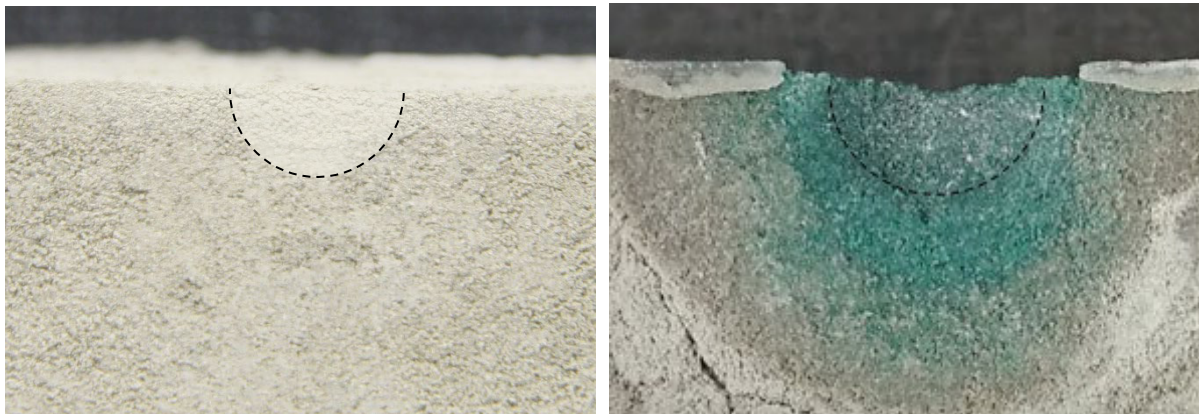


Abbildung 21: Aufgeschnittener Probekörper vor und nach der Injektion

Unter Berücksichtigung, dass die Zugstränge bei größeren Versuchskörpern zu lang werden können und der Aufbau einer Injektion mittels Verpressung im Vergleich zur Tränkung von oben unkomplizierter ist, wurde die Verpressmethode als zielführende Variante bestimmt. Des Weiteren wurde zur Verifizierung, ob ein definierter Zugstrang über eine längere Distanz ebenfalls mit innenliegendem Trockenmörtel verfüllt werden kann, eine Vergleichsanalyse zwischen einem Probekörper mit freigeblasenem Kanal sowie einem Exponat mit trockenem Compound im Inneren durchgeführt.

Die beiden Prismen wurden mit den genormten Abmessungen ( $l/b/h=160/40/40$  mm) für Mörtelprismen nach DIN EN 196-1 [25] sowie einem zentrisch liegendem Zugstrang gedruckt. Der Kanal wies jeweils einen Durchmesser von 10 mm auf und wurde für die Lagerungsvariante in Wasserglas aufgrund der Ergebnisse aus Abschnitt 3.1.4 freigeblasen. Die Wasserglaslagerung wurde für diese Versuchsreihe anhand der aufgelisteten Vorteile in Abschnitt 3.1.2.2 gegenüber der Lagerungsvariante in Wasser bevorzugt. Der Versuchskörper zur Verifizierung der Verfüllung bei längeren Distanzen mit trockenem Compound im Inneren wurde demgegenüber im Klimaschrank bei einer Temperatur von  $20\text{ °C} \pm 2\text{ K}$  und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 85 % nachbehandelt. Die Entnahme erfolgte nach sieben Tagen, woraufhin die Versuchskörper auf der Versuchsanlage befestigt sowie abgedichtet wurden. Die Injektion erfolgte in dieser Versuchsserie, wie in Abbildung 22 und Abbildung 23 illustriert, maschinell gesteuert, sodass ein kontinuierlicher Zufluss gewährleistet werden konnte. Weiterhin wurde mithilfe der Injektionsmaschine (kdScientific Model 100) ein konstanter Druck aufgebracht und ein exaktes Volumen in den Probekörper injiziert, was für die spätere Rezyklisierung relevant werden kann.

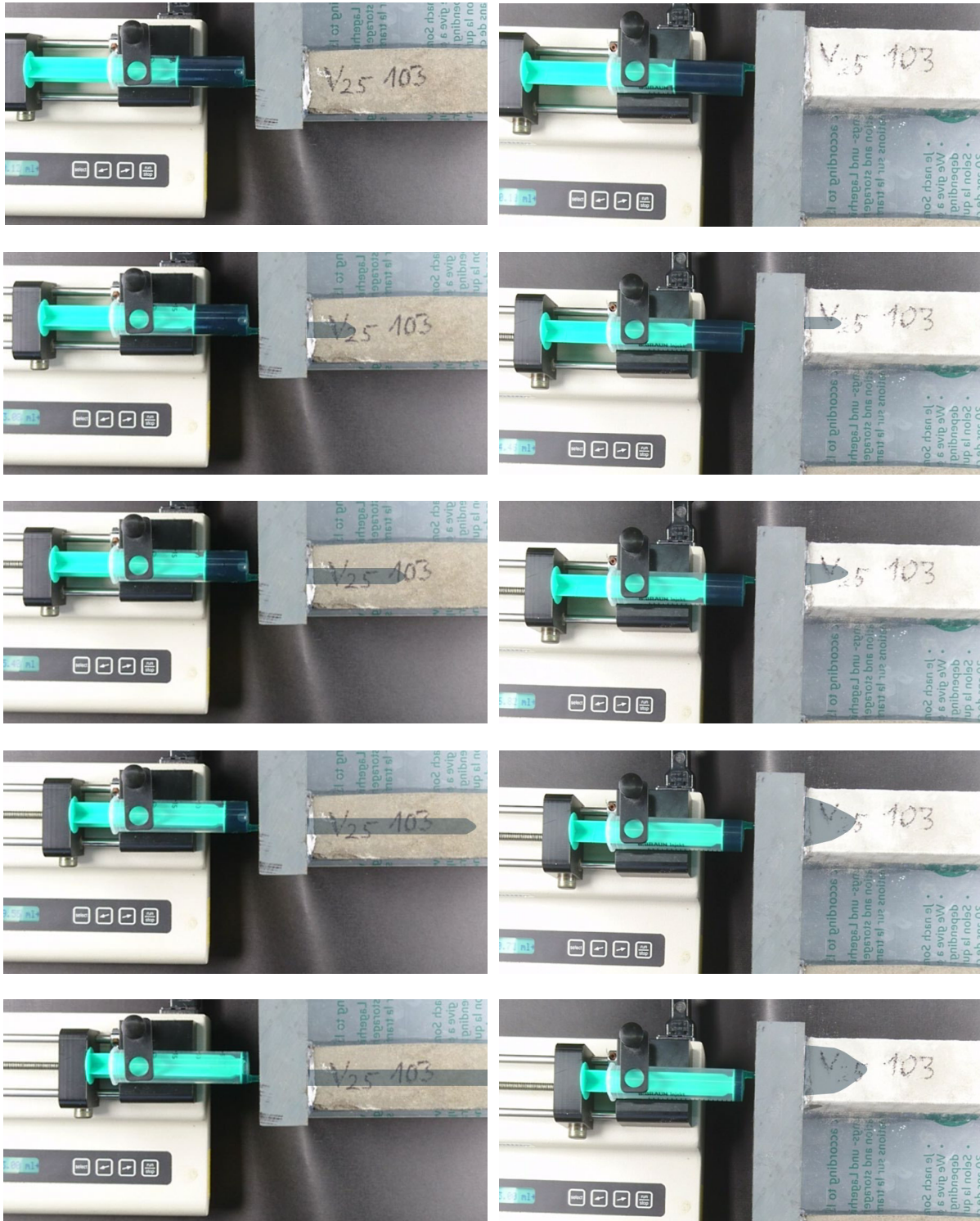


Abbildung 22: Exemplarischer Injektionsvorgang eines 3D-gedruckten Prismenkörpers ohne innenliegendem Trockencompound im Bewehrungsstrang und einer Nachbehandlung in Wasserglas bei 20 °C (Bildabfolge je 48 sec.)

Abbildung 23: Exemplarischer Injektionsvorgang eines 3D-gedruckten Prismenkörpers mit innenliegendem Trockencompound im Bewehrungsstrang und einer Nachbehandlung im Klimaschrank bei 20 °C und 85 % r.F. (Bildabfolge je 48 sec.)

Die Injektion des freigeblasenen und in Wasserglas gelagerten Probekörpers verlief ohne etwaige Komplikationen, sodass der Kanal bzw. das berechnete Volumen exakt mit der geplanten Epoxidharzmenge verpresst wurde. Dies ließ sich ebenfalls bei der Versuchsserie mit den Verzweigungskörpern beobachten, was auf die abdichtende Wirkung der Wasserglasnachbehandlung zurückzuführen ist. Des Weiteren konnte kein sichtbares Austreten im abgedichteten Anschlussbereich oder Versickern in der Betonmatrix festgestellt werden. Zur Bestätigung wurden die Probekörper noch mithilfe der zerstörungsfreien, computertomografischen Analyse, wie in Abbildung 24 rechts dargestellt, untersucht. Auffällig ist in der CT-Aufnahme, dass der 3D-gedruckte Beton im Gegensatz zu den anderen beiden Darstellungen weißlicher ist bzw. eine höhere Dichte aufweist. Dies ist wiederum auf die zusätzliche Porositätsminimierung infolge der Wasserglasnachbehandlung zurückzuführen, die bei einer nachträglichen Injektion von Probekörpern mit trockenem Compound innerhalb der Zugstränge nicht möglich ist (siehe Abschnitt 3.1.4).

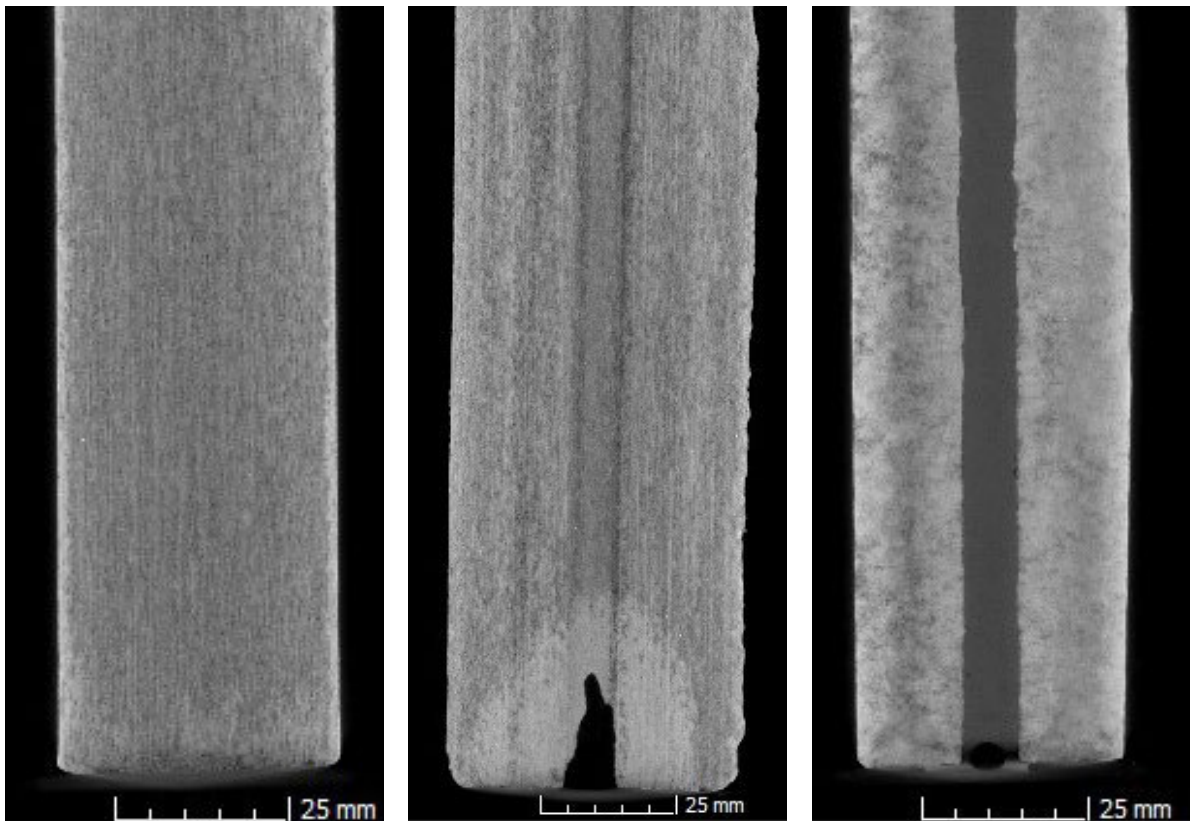


Abbildung 24: Computertomografische Analyse 3D-gedruckter Probekörper:

Links: Prisma ohne eine Bewehrung

Mitte: Prisma mit Trockencompound im Kanal zzgl. einer nachträglichen Injektion

Rechts: Prisma ohne Trockencompound im Kanal zzgl. einer nachträglichen Injektion

Beim Probekörper mit innenliegendem Trockenmörtel und einer Nachbehandlung im Klimaschrank konnte ebenfalls die gewünschte Menge des Epoxidharzes injiziert werden, jedoch ließ sich hier der negative Effekt des Durchdringens des Reaktionsharzes in die 3D-gedruckte Betonstruktur sehr deutlich im Randbereich beobachten. Demzufolge bildete sich im Injektionsbereich ein Pfropfen, wodurch der gewünschte Effekt des Verpressens mit trockenem Compound in den definierten Zugsträngen nicht erzielt werden konnte. In Abbildung 24 (Mitte) ist dies durch das Eindringen des Epoxidharzes bzw. durch den schwarzen Körper im Injektionseingangsbereich zu erkennen. Des Weiteren konnte das Reaktionsharz nicht durch den gesamten Strang fließen, sondern bildete den angesprochenen Pfropfen, welcher sich in der CT-Aufnahme durch den weißlichen Schein im 3D-gedruckten Beton bzw. durch die Steigerung der Dichte im unteren Bereich kennzeichnen lässt.

Folglich lässt sich zusammenfassend formulieren, dass die Opportunität des in Abschnitt 3.1.2.2 erläuterten Wasserglases mit den Erkenntnissen hinsichtlich der Lagerungsvarianten aus Abschnitt 3.1.4 sich in dieser Versuchsreihe als zielführende Nachbehandlungsmaßnahme der 3D-gedruckten Betonkörper inklusive einer nachträglich einzubringen Injektionsbewehrung erwies.



Abbildung 25: Probekörper ohne Trockencompound im Kanal zzgl. einer nachträglichen Injektion

## 3.2 Arbeitspaket II

### 3.2.1 Allgemeines

Die Aufgabe eines Ingenieurs in fast allen Fachbereichen ist es ein effizientes sowie tragfähiges Bauteil zu entwickeln, was nach grundlegenden wissenschaftlichen Erkenntnissen bzw. dem geltenden Stand der Technik konstruiert wurde. Final soll somit eine funktionale, wirtschaftliche sowie technisch hochwertige Lösung entstehen. In diesem meist iterativen Entwicklungsprozess müssen die Ingenieure die Randbedingungen (wie Lasteinleitung, Auflagerzustände, Materialeigenschaften, etc.) kennen, um letztendlich das optimale Endprodukt designen zu können. Neben der häufig zum Einsatz kommenden FEM-Software bedarf es zur Interpretation der Ergebnisse einen ingenieurstechnischen Sachverstand sowie eine Mischung aus Erfahrung und Intuition. Gerade im Bereich der computergestützten Programme kann der Ingenieur auf eine Vielzahl von Hilfsmitteln zurückgreifen, die ihn bei der Lösungsfindung unterstützen [29]. Allgemeine Optimierungsmethoden – für die technische Anwendung insbesondere die Strukturoptimierung – können dabei eines der elementaren und umfangreichen Hilfsmittel darstellen [30, 31].

Mithilfe der Strukturoptimierung können sowohl innere als auch äußere Bereiche eines Elements optimiert werden. Sie befasst sich im Allgemeinen mit der Suche nach der optimalen Form eines Festkörpers für eine festgelegte Anwendung und gliedert sich dbzgl. in unterschiedliche Teilgebiete oder -disziplinen. Bei der Unterteilung ist in der Regel von folgenden Optimierungen die Rede [32, 33]:

- Topologieoptimierung
- Formoptimierung
- Bemessungs- bzw. Querschnittsoptimierung
- Materialoptimierung

Die Topologieoptimierung ist hierbei die freieste Form der Optimierung, da sie auf Entwurfsraumebene stattfindet und am Beginn der Strukturoptimierung steht. Ziel der Topologieoptimierung ist es, für einen gegebenen Bauraum die optimale Materialverteilung bei gleichzeitiger Einhaltung verschiedener Randbedingungen zu ermitteln [32]. Zum Zeitpunkt der Formoptimierung ist die Topologie bereits bekannt und wird hinsichtlich der Optimierungsaufgabe variiert. Bspw. entstehen je nach Feinheitsgrad des FEM-Netzes im Anschluss an die Topologieoptimierung harte Kanten, die den natürlichen Lastfluss im Bauteil nicht optimal darstellen. Infolge der Formoptimierung wird demnach die äußere Struktur des Elements idealisiert. Die Querschnittsoptimierung ist vergleichbar mit der Formoptimierung findet allerdings in der Querschnitts- und nicht der Tragwerksebene statt. Die Materialoptimierung ist ein letzter Verfeinerungsschritt, um die Zielfunktion zu erreichen und hat die Aufgabe die Ergebnisse der Querschnittsoptimierung auf der Materialebene umzusetzen bzw. eine bestmögliche Ausnutzung des jeweiligen Materials zu definieren.

Ein Entwurfsergebnis der Strukturoptimierung, hinsichtlich einer optimalen Dichteverteilung zur Reduzierung der Bauteilmasse einer Betondecke unter Gleichstreckenlast ist in Abbildung 26 zu erkennen. Zielfunktionen der Optimierung bei Tragwerken sind meistens das minimale Strukturgewicht oder die minimale Verformung unter gegebenen Randbedingungen.

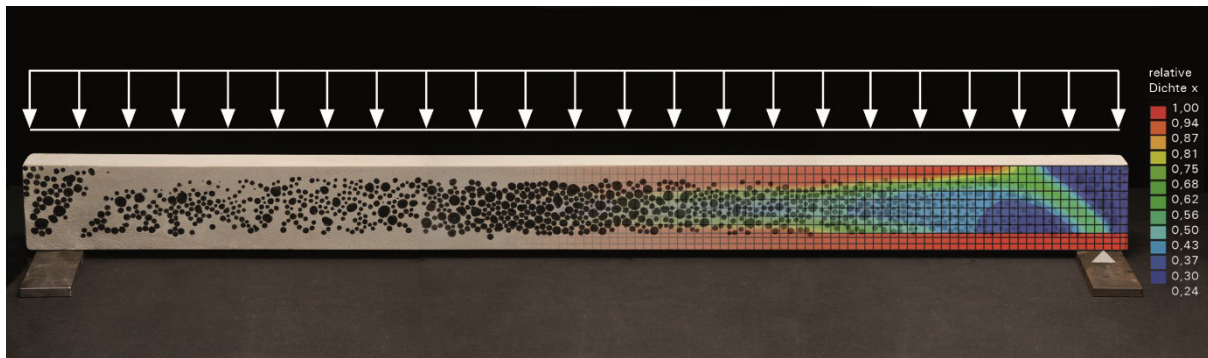


Abbildung 26: Dichteverteilung in einer Betondecke als Entwurfsergebnis einer Strukturoptimierung [34]

Solch ein strukturoptimiertes Bauteil kann aufgrund von diversen Einschränkungen im konventionellen Herstellungsprozess nicht produziert werden. Formende Herstellungsverfahren (wie bspw. Biegen oder Pressen) können zum Teil zwar die Anforderungen hinsichtlich der Material-, Querschnitts- und Formoptimierung erfüllen, jedoch nicht Topologieoptimierung im Inneren des Elements. Die subtraktiven Herstellungsverfahren (wie bspw. Fräsen, Drehen, oder Bohren) erzeugen ihre Geometrien durch Abtragen, wodurch sich ein ähnliches Problem bzgl. der Topologie im Inneren des Bauteils bietet. Ausschließlich die additiven Herstellungsverfahren (wie bspw. das 3DP-, SLM- oder SLS-Verfahren) können den Großteil der geplanten Strukturoptimierung abdecken, um letztendlich die genannten Vorteile wie Funktionalität, Wirtschaftlichkeit sowie Tragfähigkeit in einem Produkt vereinen zu können.

Da die Topologieoptimierung in vielen Industriezweigen bereits als gängiges Entwicklungstool genutzt wird und das Potential im Bauingenieurwesen jedoch bisher weitgehend ungenutzt bleibt [35], kann durch die additive Fertigung mithilfe des 3D-Pulverdruckverfahrens (3DP-Verfahren) sowie die daraus resultierenden Freiheiten bezüglich der Bauteilgeometrie die Topologieoptimierung im Bauwesen zukünftig an Bedeutung gewinnen.

### 3.2.2 Vorberechnung der aufnehmbaren betontechnologischen Kenngrößen innerhalb der FEM-Simulation

Die mechanischen Eigenschaften des Materials Beton sind in ANSYS® über die Dichte, den Elastizitätsmodul ( $E$ ), die Querkontraktionszahl ( $\nu$ ), die maximale Zugfestigkeit ( $f_{ct}$ ) und die Druckfestigkeit ( $f_c$ ) definiert. Das Kompressionsmodul ( $K$ ) sowie das Schubmodul ( $G$ ) werden

von ANSYS® für den linear-elastischen Bereich mittels Querkontraktionszahl und E-Modul, wie in Gl. 3-8 und Gl. 3-9 dargestellt, berechnet. Weiterhin sind der Wärmeausdehnungskoeffizient, die isotrope thermische Leitfähigkeit sowie die spezifische Wärmekapazität i. d. R. im Materialeingabebereich aufgeführt. Eine Anpassung der temperaturabhängigen Parameter wurde nicht durchgeführt, da die Temperatur in der Simulation nicht betrachtet wird. Anhand der Erkenntnisse aus der Versuchsserie hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen dem Wasser-Zement-Wert (w/z-Wert) und der Druckfestigkeit in Abbildung 27 ist bekannt, dass mit einem höheren Feuchtigkeitseintrag im Gegensatz zum konventionellen Herstellungsverfahren höhere Endfestigkeiten erzielt werden können. Des Weiteren konnte neben der Analyse des Verhältnisses von Grob- bzw. Feinkörnigkeit des Compounds zur Druckfestigkeit in Abbildung 28 der positive Einfluss der Wasserglasnachbehandlung festgestellt werden. Infolge ergänzender Versuchsreihen bzgl. der Isotropie in Abbildung 29, der Porosität in Abbildung 30 sowie der Rohdichte konnten weitere Eigenschaften 3D-gedruckter Betonkörper analysiert werden. In Anbetracht der Erkenntnisse aus dem Arbeitspaket I bzw. der notwendigen Vorkehrungen für eine nachträgliche Injektion der Betonelemente wurden weitere Untersuchungen für die Eingabe der betontechnologischen Kenngrößen innerhalb der FEM-Simulation durchgeführt.

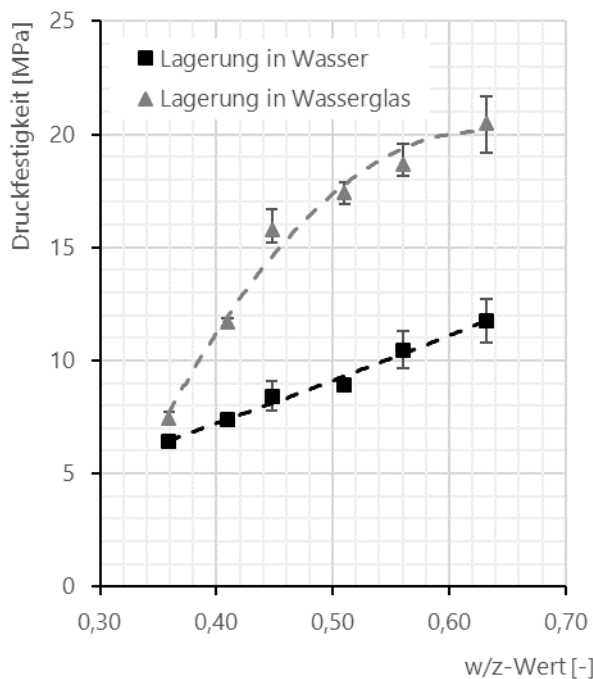


Abbildung 27: Verhältnis vom w/z-Wert zur Druckfestigkeit

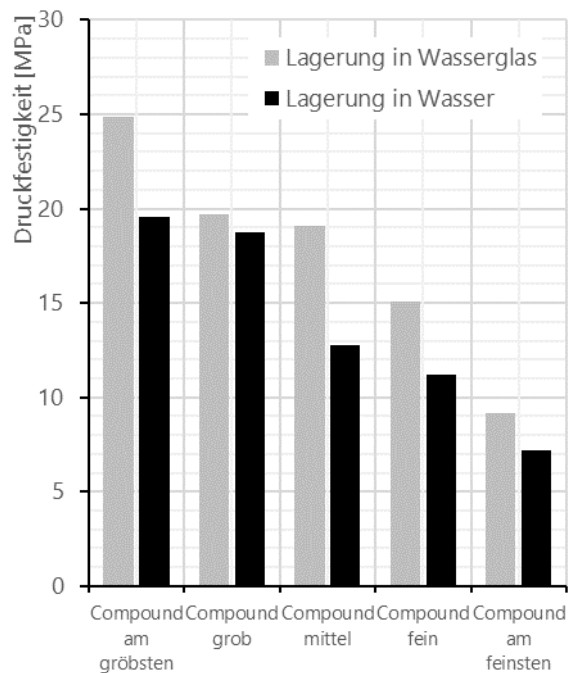


Abbildung 28: Verhältnis von Grob- bzw. Feinkörnigkeit zur Druckfestigkeit

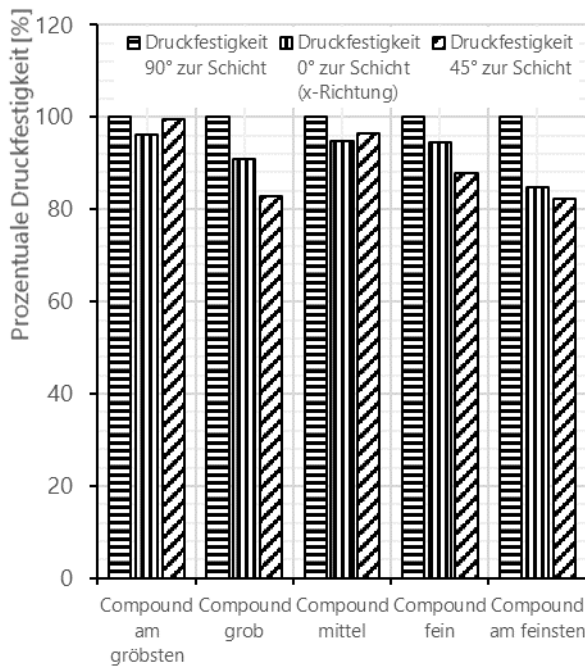


Abbildung 29: Untersuchung der Isotropie 3D-gedruckter Betonkörper

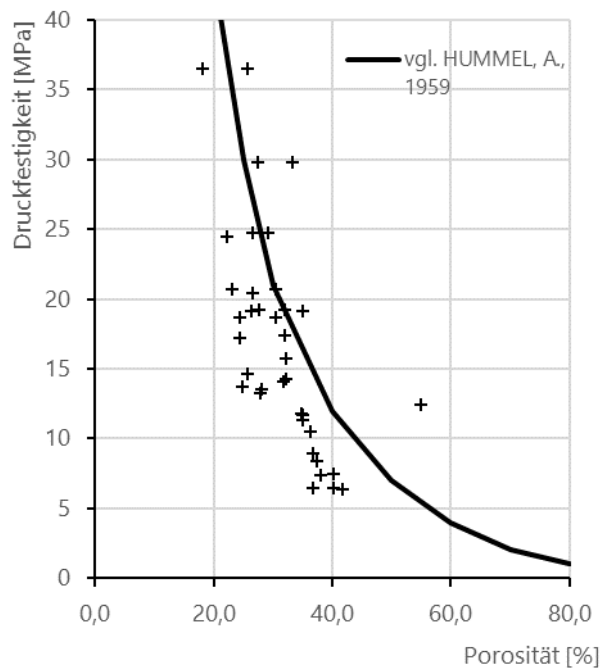


Abbildung 30: Verhältnis von Porosität zur Druckfestigkeit

Aus Materialversuchen am 3D-gedruckten Beton konnten Mittelwerte für die Rohdichte von ca.  $1.700 \text{ kg/m}^3$ , die mit der Rohdichte von Leichtbetonbauteilen ( $800\text{-}2.000 \text{ kg/m}^3$ ) [36] vergleichbar ist, festgestellt werden. Bezüglich der Festbetoneigenschaften wiesen die im 3-Punkt-Biegezugversuch nach DIN EN 196-1 [25] geprüften 3D-gedruckten Betonprismen eine Biegezugfestigkeit im Mittel von  $3,6 \text{ MPa}$  auf und nahmen im Anschluss infolge der Druckfestigkeitsuntersuchung im Durchschnitt noch eine Spannung von  $17,5 \text{ MPa}$  auf. Die zentrische Zugfestigkeit wurde anhand des Zusammenhangs zwischen Druck-, Biegezug-, Spaltzug- und Zugfestigkeit wie folgt berechnet [37]:

$$f_{ct,sp} = \frac{f_c}{8} = \frac{17,5}{8} = 2,1 \text{ MPa} \quad \text{Gl. 3-3}$$

$$f_{ct,sp} = \frac{f_{ct,fl}}{1,7} = \frac{3,6}{1,7} = 2,1 \text{ MPa} \quad \text{Gl. 3-4}$$

$$f_{ct} = 0,9 \cdot f_{ct,sp} = 0,9 \cdot 2,1 = 1,9 \text{ MPa} \quad \text{Gl. 3-5}$$

Dabei ist:

$f_{ct,sp}$  die Spaltzugfestigkeit, in MPa

$f_c$  die Druckfestigkeit, in MPa

$f_{ct,fl}$  die Biegezugfestigkeit, in MPa

$f_{ct}$  die Zugfestigkeit, in MPa

Da sich sowohl die Berechnungsmethode mit der Druckfestigkeit (Gl. 3-3) als auch der Zusammenhang mit der Biegezugfestigkeit (Gl. 3-4) eines empirischen Verhältniswertes bedienen, wurde das Ergebnis der Zugfestigkeit mit der Beziehung zwischen mittlerer Biegezugfestigkeit und dem Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit nach DIN EN 1992-1-1 [38] verglichen:

$$f_{ctm} = \frac{f_{ctm,fl}}{\left(1,6 - \frac{h}{1.000}\right)} = \frac{3,6}{\left(1,6 - \frac{40}{1.000}\right)} = 2,3 \text{ MPa} \quad \text{Gl. 3-6}$$

Dabei ist:

$f_{ctm}$  der Mittelwert der zentrischen Betonzugfestigkeit, in MPa

$f_{ctm,fl}$  der Mittelwert der Biegezugfestigkeit, in MPa

$h$  die Gesamthöhe des Bauteils, in mm

Die aus der Norm berechnete mittlere Zugfestigkeit von 2,3 MPa liegt leicht über der abgeschätzten Zugfestigkeit mithilfe der empirisch ermittelten Verhältniswerten von 1,9 MPa, wobei man berücksichtigen muss, dass sich der Eurocode 2 hauptsächlich auf bewehrte Bauteile bezieht und nur einen maximalen Verhältnisfaktor von 1,6 von mittlerer Biegezugfestigkeit zum Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit veranschlagt. Da die Dichte sowie weitere Materialeigenschaften des 3D-gedruckten Betons mit den Festbetonkennwerten des Leichtbetons praktisch kongruieren, wurden für die anfänglichen Simulationen die berechnete Zugfestigkeit von 1,9 MPa für die Parametereingabe in ANSYS® noch mit dem Anpassungsfaktor  $\eta_1$  für Leichtbeton nach DIN EN 1992-1-1 [38] multipliziert. Hiermit wurde die geringere Dichte des 3D-gedruckten Betons ( $1.700 \text{ kg/m}^3$ ) im Vergleich zum Normalbeton ( $2.200 \text{ kg/m}^3$ ) berücksichtigt:

$$f_{3Dct} = f_{ct} \cdot \eta_1 = f_{ct} \cdot \left(0,40 + 0,60 \cdot \frac{\rho}{2.200}\right) = 1,9 \cdot \left(0,40 + 0,60 \cdot \frac{1.700}{2.200}\right) = 1,7 \text{ MPa} \quad \text{Gl. 3-7}$$

Dabei ist:

$f_{3Dct}$  die Zugfestigkeit für 3D-gedruckten Beton, in MPa

$f_{ct}$  die berechnete Zugfestigkeit, in MPa

$\rho$  die Dichte des 3D-gedruckten Betons, in  $\text{kg/m}^3$

In DIN EN 1992-1-1 [38] ist für Normalbetone der Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Druckfestigkeitsklasse tabelliert. Demnach beträgt der mittlere Elastizitätsmodul eines Betons der Druckfestigkeitsklasse C12/15 27.000 MPa und ein Beton der Klasse C16/20 29.000 MPa. Demzufolge müsste der Elastizitätsmodul des 3D-gedruckten Betonkörpers bei einer Würfeldruckfestigkeit von 17,5 MPa in etwa bei 28.000 MPa liegen. Da das 3D-gedruckte Material allerdings eine Dichte im Bereich der Leichtbetone besitzt, sind auch hier geringere Kennwerte in Form des Elastizitätsmoduls zu erwarten. Dieser sollte sich je nach Zusammensetzung, Nachbehandlung und Trockenrohdichte im Bereich zwischen 9.000 MPa bis 19.000 MPa befinden, was wiederum mit dem gängigen Elastizitätsmodul von Leichtbetonen in der jeweiligen Druckfestigkeitsklasse [39, 40] korreliert.

Die Querkontraktionszahl  $\nu$ , die das Verhältnis von Querdehnung zu Längsstauchung im elastischen Dehnungsbereich angibt, wurde anhand von vergleichbaren Werten der Literatur bestimmt. Für Normalbeton zeigt sich in Abhängigkeit der unterschiedlichen Betone eine Schwankungsbreite von  $0,14 \leq \nu \leq 0,26$  [41]. Bei Leichtbetonen wurden Querdehnzahlen von  $\nu \approx 0,2$  unabhängig von der verwendeten Matrix bestimmt [42]. Für die Simulation des 3D-gedruckten Betons wurde eine Querkontraktionszahl  $\nu = 0,18$  gewählt, die somit sowohl zur Schwankungsbreite der Normalbetone als auch zum Wert für Leichtbetone passt.

Das Kompressionsmodul  $K$  für Festkörper entspricht dem Kehrwert der Kompressibilität und kann aus den Elastizitätskonstanten E-Modul  $E$  und Poisson-Zahl bzw. Querkontraktionszahl  $\nu$  anhand Gl. 3-8 berechnet werden [43]. Das Schubmodul  $G$  bzw. die charakterisierte Gestaltelastizität des Körpers steht ebenfalls nach Gl. 3-9 in einer Beziehung zum E-Modul  $E$  sowie der Querdehnungszahl  $\nu$  und wird ebenfalls von ANSYS® wie folgt ermittelt:

$$K = \frac{E}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu)} = \frac{11.500}{3 \cdot (1 - 2 \cdot 0,18)} = 5.990 \text{ MPa} \quad \text{Gl. 3-8}$$

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = \frac{11.500}{2 \cdot (1 + 0,18)} = 4.870 \text{ MPa} \quad \text{Gl. 3-9}$$

Dabei ist:

K der Kompressionsmodul, in MPa

G der Schubmodul, in MPa

$\nu$  die Querkontraktionszahl

In Tabelle 2 befinden sich zur abschließenden Übersicht die derzeit ermittelten Materialeigenschaften des in ANSYS® definierten 3D-gedruckten Betons. Zur Vergleichbarkeit der Eigenschaften zwischen dem additiv hergestellten Beton im 3DP-Verfahren sowie dem Normal- und Leichtbeton mit jeweils ähnlicher Druckfestigkeit werden die maßgebenden, differierenden Parameter in Tabelle 3 aufgelistet.

Tabelle 2: In ANSYS® definierte Materialeigenschaften des 3D-gedruckten Betons

| Eigenschaften        | Variable   | Wert                    |
|----------------------|------------|-------------------------|
| Dichte               | $\rho$     | 1.700 kg/m <sup>3</sup> |
| Elastizitätsmodul    | E          | 11.500 MPa              |
| Querkontraktionszahl | $\nu$      | 0,18                    |
| Kompressionsmodul    | K          | 5.990 MPa               |
| Schubmodul           | G          | 4.870 MPa               |
| Zugfestigkeit        | $f_{3Dct}$ | 1,7 MPa                 |
| Druckfestigkeit      | $f_c$      | 17,5 MPa                |

Die Eigenschaften des Normalbetons C16/20 entsprechen den Angaben nach DIN EN 1992-1-1 [38] und die Parameter des Leichtbetons C16/18 werden ebenfalls der DIN EN 1992-1-1 in Verbindung mit EN 206-1 [44] entnommen bzw. für den Elastizitätsmodul sowie die aufnehmbare Zugfestigkeit wie folgt berechnet:

$$E_{lcm} = E_{cm} \cdot \eta_E = E_{cm} \cdot \left( \frac{\rho}{2.200} \right)^2 = 28.000 \cdot \left( \frac{1.400}{2.200} \right)^2 \approx 11.300 \text{ MPa} \quad \text{Gl. 3-10}$$

$$f_{lctm} = f_{ctm} \cdot \eta_1 = f_{ctm} \cdot \left( 0,40 + 0,60 \cdot \frac{\rho}{2.200} \right) = 1,9 \cdot \left( 0,40 + 0,60 \cdot \frac{1.400}{2.200} \right) =$$

$$f_{lctm} = 1,5 \text{ MPa} \quad \text{Gl. 3-11}$$

Dabei ist:

$E_{lcm}$  bzw.  $E_{cm}$  der Elastizitätsmodul für Leichtbeton bzw. Normalbeton, in MPa

$f_{lctm}$  bzw.  $f_{ctm}$  die Zugfestigkeit für Leichtbeton bzw. Normalbeton, in MPa

$\rho$  die Dichte des Leichtbetons, in  $\text{kg/m}^3$

Tabelle 3: Vergleich der Materialparameter

| Material               | Druckfestigkeit<br>$f_{c,cube}$<br>[MPa] | Dichte<br>$\rho$<br>[ $\text{kg/m}^3$ ] | E-Modul<br>E<br>[MPa] | Zugfestigkeit<br>$f_{ctm}$<br>[MPa] |
|------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| Normalbeton<br>C16/20  | 20,0                                     | 2.200                                   | 29.000                | 1,9                                 |
| Leichtbeton<br>LC16/18 | 18,0                                     | 1.400                                   | 11.300                | 1,5                                 |
| 3D-Beton               | 17,5                                     | 1.700                                   | 11.500                | 1,7                                 |

### 3.2.3 Definition der Bewehrungseigenschaften für die FEM-Simulation

Zur nachträglichen Verpressung der berechneten Zugstränge eines 3D-gedruckten Betonkörpers wurde für dieses Forschungsvorhaben Epoxidharz als Injektionsmaterial definiert. Das Reaktionsharz wird im Bauwesen in unterschiedlichen Bereichen verwendet. Übliche Einsatzgebiete sind u. a. der Betonschutz, die Instandsetzung, die Rissverfüllung, das nachträgliche Verkleben von Bauteilen oder das Verfugen von Fliesenbelägen sowie die Beschichtung von Böden und Wänden [45]. Epoxidharze zeichnen sich durch eine geringe Rohdichte, sehr hohe Festigkeit, ausgezeichnete Ermüdungseigenschaften und eine hervorragende Korrosionsbeständigkeit aus [46]. Sie gehören zu den Polyadditionsklebstoffen (Kunststoffe) und weisen deren typisches zeit- und umweltabhängiges Materialverhalten auf. Diese Gruppe der Kunststoffe zeichnet sich durch ein ausgeprägt viskoelastisches Materialverhalten, eine im ausgehärteten Zustand hohe Kohäsionsfestigkeit (innere Festigkeit) sowie eine sehr gute Adhäsionsfähigkeit zu den angrenzenden Bauteilen aus [47], was im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens in Bezug auf die Pull-Out-Versuche bzw. die Verbundeigenschaften essentiell sein wird. Des Weiteren bieten sie sich neben den genannten Vorteilen aufgrund ihrer anfänglichen Fließfähigkeit für die nachträgliche Injektion der 3D-

gedruckten, struktur- bzw. topologieoptimierten Betonbauteile mit einem belastungsorientierten Zugstrangverlauf an.

Die Materialeigenschaften von Epoxidharzen sind im Allgemeinen hinsichtlich der Zusammensetzung variabel und können für das jeweilig vorgesehene Einsatzgebiete optimiert werden. In der FEM-Simulation dient das Epoxidharz als Bewehrungsmaterial und erhält zunächst die Materialeigenschaften des speziellen Epoxidharzes von WEBAC-Chemie. Die Auflistung der Eingabeparameter ist in Tabelle 4 dargestellt, wobei das Kompressionsmodul sowie das Schubmodul nach Gl. 3-8 und Gl. 3-9 berechnet wurden. Die Querkontraktions- bzw. Poissonsahl der meisten Epoxidharze weist einen Wert von etwa 0,3 bis 0,35 auf und wurde für diese Simulation zu 0,3 gewählt [48].

Tabelle 4: In ANSYS® definierte Materialeigenschaften des Epoxidharzes

| Eigenschaften                                                                                                                  | Variable | Wert                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-------------------------|
| Dichte bei 20 °C                                                                                                               | $\rho$   | 1.100 kg/m <sup>3</sup> |
| Elastizitätsmodul                                                                                                              | E        | 2.500 MPa               |
| Querkontraktionszahl                                                                                                           | $\nu$    | 0,3                     |
| Kompressionsmodul                                                                                                              | K        | 2.080 MPa               |
| Schubmodul                                                                                                                     | G        | 960 MPa                 |
| Zugfestigkeit                                                                                                                  | $f_t$    | 40,0 MPa                |
| Druckfestigkeit                                                                                                                | $f_c$    | 75,0 MPa                |
| Die Druckfestigkeit entspricht einer orthogonalen Belastung zum Schichtaufbau und wurde nach 28 Tagen geprüft (vgl. [57, 58]). |          |                         |

Zur Optimierung der mechanischen Eigenschaften sollte das Epoxidharz in weiteren Versuchsreihen mit zusätzlichen Werkstoffen bzw. Fasern ergänzt werden, um die konstruktiven Vorteile potenziell steigern zu können. Hierzu wurden zum einen die Zugabe diskontinuierlicher Glasfasern in die Epoxidharzmasse in Betracht gezogen, um in einem Schritt einen optimierten Kompositwerkstoff in den Bewehrungskanal injizieren zu können, und zum anderen wurde die Idee verfolgt, den Kanal zunächst durch Carbonschläuche auszufüllen und nachträglich mit dem Epoxidharz zu verpressen. Die relevanten Eigenschaften der beiden Zusatzstoffe sind in Tabelle 5 aufgeführt, wobei darauf hinzuweisen ist, dass es sich bei den Carbonschläuchen nicht um einzelne Fasern handelt und somit die Angaben zur Faserstärke und -länge unberücksichtigt bleiben.

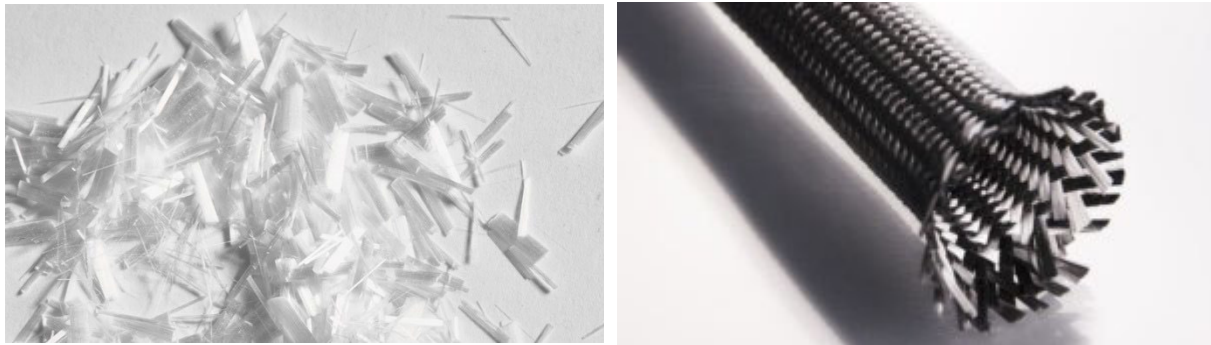


Abbildung 31: Verwendete Verstärkungsmaterialien: diskontinuierliche Glasfasern (links) [49] und Carbonschlauch (rechts) [50]

Tabelle 5: Materialeigenschaften der Glasfasern und Carbonschläuche

| Eigenschaften     | Variable | Glasfaser               | Carbonschlauch          |
|-------------------|----------|-------------------------|-------------------------|
| Dichte            | $\rho$   | 2.700 kg/m <sup>3</sup> | 1.800 kg/m <sup>3</sup> |
| Elastizitätsmodul | E        | 72.000 MPa              | 230.000 MPa             |
| Faserstärke       | $d_F$    | 0,02 mm                 | -                       |
| Faserlänge        | $l_F$    | 12 mm                   | -                       |
| Zugfestigkeit     | $f_t$    | 2.000 MPa               | 3.530 MPa               |

Der Grundgedanke einer Faserverstärkung ist, dass äußere Kräfte über Schubspannungen in der Grenzfläche zwischen Faser und Epoxidharz-Matrix weitergeleitet werden. Hierfür gilt die Modellvorstellung der Shear-Lag-Theorie nach Cox [51]. Diese beruht auf den nachfolgend aufgelisteten Annahmen:

- Bei perfekter Haftung verhalten sich Faser und Epoxidharz-Matrix ideal elastisch
  - Kein Ablösen der Faser aus dem Matrixverbund
- Die Faser hat eine sehr viel größere Steifigkeit als die umgebende Epoxidharz-Matrix
  - Die Bruchdehnung der Epoxidharz-Matrix liegt über der Faser
- Die Epoxidharz-Matrix dient nur zur Übertragung der Schubspannungen
- Die Faser nimmt nur Normalspannungen auf
- An den Faserquerschnittenden ist die Normalspannung gleich 0
  - Keine Lastübertragung an den Faserenden
- Die Gesamtmatrix wird in Form eines Zylinders betrachtet
- Lokale Spannungsüberhöhungen und Spannungen in Radial- sowie Umfangsrichtung werden vernachlässigt
  - Die Poissonzahl (Querdehnungszahl) ist überall gleich

Abbildung 32 veranschaulicht das grundlegende Modell für den Verbund zwischen Faser und Epoxidharz. Im Spannungszustand II liegt die eingebrachte Faser orthogonal zur Zugspannungsrichtung und im Zustand I befindet sie sich parallel zur Zugspannungsrichtung, was hinsichtlich der Lastaufnahme und Verstärkung der Matrix dem Idealzustand entspricht. Je größer der Winkel zwischen Faser und Spannungsrichtung wird, desto geringer ist der positive Einfluss einer diskontinuierlichen Faserverstärkung [52]. Da für die Produktion kein einheitlicher Zustand garantiert werden kann, wird für die nachfolgenden Berechnungen der Spannungszustand I angenommen und im Anschluss an die realen Prüfungen bei Bedarf durch einen Sicherheitsbeiwert adaptiert.

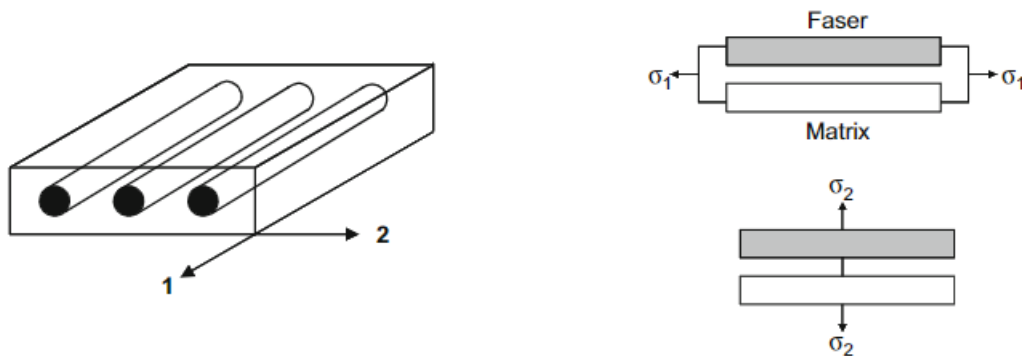


Abbildung 32: Spannungszustände eines unidirektionalen Faser/Matrix-Verbundes und der Einzelkomponenten [52]

Um den Elastizitätsmodul des Verbundwerkstoffes auf das Niveau des 3D-gedruckten Betons zu steigern, bedarf es einer Kalkulation zur Bestimmung der notwendigen Fasermenge. Hierbei ist zu unterscheiden, ob es sich um kontinuierliche oder diskontinuierliche Fasern innerhalb der Matrix handelt. Für kontinuierliche Fasern kann der Elastizitätsmodul der Gesamtmatrix anhand von Gl. 3-12 berechnet werden. Hierbei gehen die Volumenprozent sowie die Elastizitätsmoduln der Faser und der Epoxidharzmatrix ein [52, 53]. Zur Bestimmung der notwendigen Fasermenge wurde Gl. 3-12 nach  $V_F$  (dem Volumenanteil der Faser im Gesamtsystem) umgestellt.

$$E_V = V_F \cdot E_F + (1 - V_F) \cdot E_M \rightarrow V_F = \frac{E_V - E_M}{E_F - E_M} \quad \text{Gl. 3-12}$$

Dabei ist:

$E_V$  der Elastizitätsmodul des Verbundwerkstoffes, in MPa

$E_F$  der Elastizitätsmodul der Faser, in MPa

$E_M$  der Elastizitätsmodul der Matrix, in MPa

$V_F$  der Volumenanteil der Faser im Gesamtsystem, in Prozent

Da es sich hingegen bei der Faserverstärkung um diskontinuierliche Glasfasern handelt, wird das Modell zur Bestimmung der Gesamtsteifigkeit des Verbundwerkstoffes nach Cox [51] noch um den Faserlängeneffizienzfaktor  $\eta_F$  erweitert.

$$E_V = \eta_F \cdot V_F \cdot E_F + (1 - V_F) \cdot E_M \quad \text{Gl. 3-13}$$

Der Faserlängeneffizienzfaktor setzt sich nach Gl. 3-15 aus der Faserlänge sowie dem Parameter der Spannungsübertragung zusammen. Letzterer Parameter bestimmt sich nach Gl. 3-14 und resultiert aus dem dargestellten Modell in Abbildung 32 sowie den getroffenen Annahmen unter Berücksichtigung des Faserradius, dem Elastizitätsmodul der Faser, dem Epoxidharz-Matrix-Schubmodul sowie dem Radius des faserumgebenden Matrix-Zylinders [53]. Da sich innerhalb des Verbundwerkstoffes unterschiedliche Abstände zwischen den einzelnen Fasern einstellen, wird für den Radius des faserumgebenden Matrix-Zylinders ein Abstand von 1 mm angenommen.

$$\beta = \frac{1}{r_F} \cdot \left[ \frac{2 \cdot G_M}{E_F \cdot \ln\left(\frac{R}{r_F}\right)} \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{0,01} \cdot \left[ \frac{2 \cdot 0,96}{72.000 \cdot \ln\left(\frac{1}{0,01}\right)} \right]^{\frac{1}{2}} = 0,24 \quad \text{Gl. 3-14}$$

Dabei ist:

$\beta$  der Parameter der Spannungsübertragung

$r_F$  der Radius der Faser, in mm

$E_F$  der Elastizitätsmodul der Faser, in MPa

$G_M$  das Schubmodul des Epoxidharzes, in MPa

$R$  der Radius des umgebenden Matrixzylinders bzw. der mittlere Abstand zur Nachbarfaser, in mm

Da der mittlere Abstand zur Nachbarfaser vom Faseranteil in der Gesamtmatrix abhängig ist, gilt es diesen in einem iterativen Prozess jeweils sinnvoll abzuschätzen bzw. nach Abschluss der realen Prüfungen für die Simulation anzupassen.

$$\eta_F = 1 - \frac{\tanh\left(\frac{\beta \cdot l_F}{2}\right)}{\frac{\beta \cdot l_F}{2}} = 1 - \frac{\tanh\left(\frac{0,24 \cdot 12}{2}\right)}{\frac{0,24 \cdot 12}{2}} = 0,38 \quad \text{Gl. 3-15}$$

Dabei ist:

$\eta_F$  der Faserlängeneffizienzfaktor

$\beta$  der Parameter der Spannungsübertragung

$l_F$  die Faserlänge, in mm

Somit ergibt sich nach Umstellung der Gl. 3-16 sowie den ermittelten Faktoren ein notwendiges Faservolumen für die diskontinuierlichen Glasfasern von rund 36 V.-%.

$$V_F = \frac{E_V - E_M}{\eta_F \cdot E_F - E_M} = \frac{11.500 - 2.500}{0,38 \cdot 72.000 - 2.500} = 0,36 \quad \text{Gl. 3-16}$$

Anhand der Gegenüberstellung der Gl. 3-12 und Gl. 3-13 sowie den nachfolgenden Berechnungen wird verdeutlicht, dass durch die Verwendung von diskontinuierlichen Fasern eine geringere Festigkeit sowie Steifigkeit des Verbundwerkstoffes im Gegensatz zu Systemen mit kontinuierlichen Fasersträngen zu erwarten ist. Dennoch kann mithilfe diskontinuierlicher Fasern im Epoxidharz der Elastizitätsmodul theoretisch auf das notwendige Maß gesteigert werden und die Möglichkeit das Faserverbundsystem in einem Ablauf in die vorgefertigten Bewehrungskanäle injizieren zu können, kann sich im Herstellungsprozess komplexerer Tragwerksysteme als bevorzugte Variante herausstellen.

### 3.2.4 Exemplarische Topologieoptimierung mittels FEM-Simulation

Im ersten Arbeitsschritt wurden die erbrachten Erkenntnisse aus dem Arbeitspaket I in Bezug auf ein umsetzbares Herstellungsverfahren in die FEM-Simulation implementiert. Des Weiteren erfolgte, wie in Abbildung 33 veranschaulicht, zur Verifizierung der betontechnologischen Kennwerte bzgl. der Biegezugfestigkeit mit und ohne einer nachträglichen Bewehrung der 3D-gedruckten Betonstrukturen eine Simulation des normierten 3-Punkt-Biegezugversuchaufbaus nach DIN EN 196-1 [25].

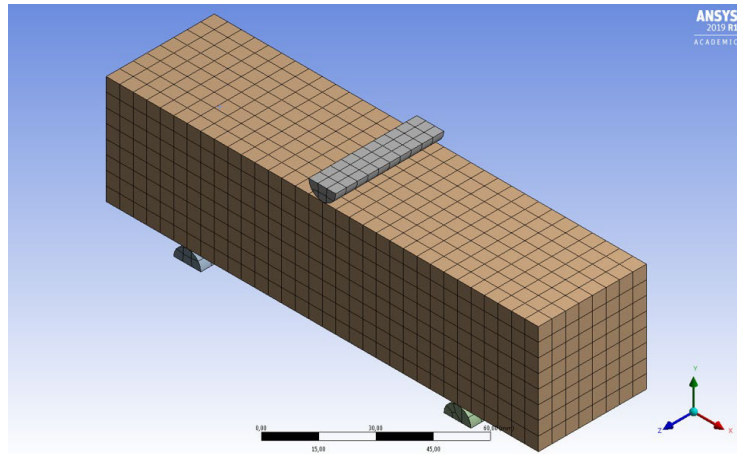


Abbildung 33: Simulation des 3-Punktbiegezugversuchaufbaus inkl. Vernetzung der Startgeometrie

Nachdem die Materialeigenschaften aus dem Abschnitt 3.2.2 zugewiesen, die Kontaktflächen definiert und das FEM-Netz zur Berechnung erzeugt wurde, mussten alle Randbedingungen für den Simulationsprozess festgelegt werden. Zu den Randbedingungen der Analyse gehören die einwirkenden Lasten, die Lagerungen sowie ggf. weitere Randbedingungen wie bspw. die thermischen Einflüsse, die aufgrund des Laborklimas von  $20\text{ °C} \pm 2\text{ K}$  für diese Analyse vernachlässigt werden können. Als fixierte Lagerung wurden die rechteckigen Flächen der Lagerhalbzylinder unterhalb des Betonkörpers gewählt und die Lasteinleitung erfolgte schrittweise über den Halbzyylinder auf der Oberseite.

Nach Abschluss der Geometrie- und Randbedingungeingabe wurden die maximalen Hauptspannungen sowie die Hauptspannungsvektoren des unbewehrten 3D-gedruckten Betonkörpers, wie in Abbildung 34 und Abbildung 35 exemplarisch dargestellt, ermittelt. Anhand der maximalen Hauptspannungen kann die Tragfähigkeit des definierten Bauteils überprüft werden. Die Ausgabe der Hauptspannungsvektoren ist maßgebend für die spätere Bestimmung des nachträglich zu injizierenden Bewehrungskanals. Die Zugspannungsvektoren bilden den gewünschten, gradierten Bewehrungsverlauf ab und werden im weiteren Simulationsprozess zur optimierten STL-Datei als Kanäle modelliert. Mit dieser gradierten Bewehrungsführung kommt neben der noch folgenden Strukturoptimierung einer der genannten, wesentlichen Vorteile der additiven Fertigung zum Tragen.

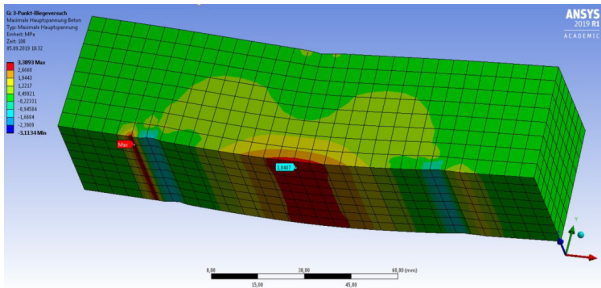


Abbildung 34: Darstellung der maximalen Hauptspannungen eines exemplarischen 3-Punkt-Biegezugversuchs

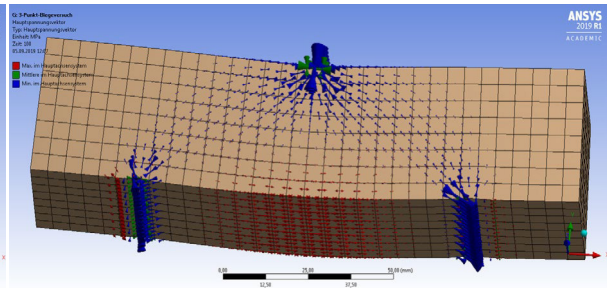


Abbildung 35: Darstellung der Hauptspannungsvektoren eines exemplarischen 3-Punkt-Biegezugversuchs

Mithilfe der durchgeführten statisch-mechanischen Analyse des Probekörpers kann im Anschluss die Strukturoptimierung in Form einer Topologieoptimierung in ANSYS® erfolgen. Hierzu wird in einem iterativen Prozess die Masse reduziert und anschließend die Tragfähigkeit validiert. Der statisch erforderliche Bestandteil der Ausgangsstruktur wird daraufhin in einer Gegenüberstellung (siehe Abbildung 36) skizziert und steht folglich für die Modellierung der Bewehrungskanäle, wie in Abbildung 37 final veranschaulicht, bereit. Für diesen simplen Belastungsfall eines 1-Feldträgers, der infolge des 3-Punkt-Biegezugversuchaufbaus nur eine zentrale Lasteinleitung erfährt, ergibt sich, wie in Abbildung 37 dargestellt, ein linearer Bewehrungsverlauf, der sich mithilfe des definierten Injektionsverfahrens aus Arbeitspaket I herstellen lässt. Für weitere Untersuchungen wird in Arbeitspaket III noch das statische System verändert und neben der geradlinigen Bewehrungsführung eine dem Lastfluss entsprechende Bewehrung für einen Vollträger sowie einen topologieoptimierten Probekörper modelliert, simuliert sowie anschließend unter realen Bedingungen untersucht.

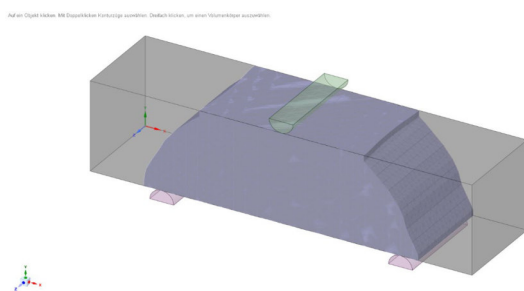


Abbildung 36: Gegenüberstellung der topologieoptimierten Struktur und der Ausgangsgeometrie in ANSYS®

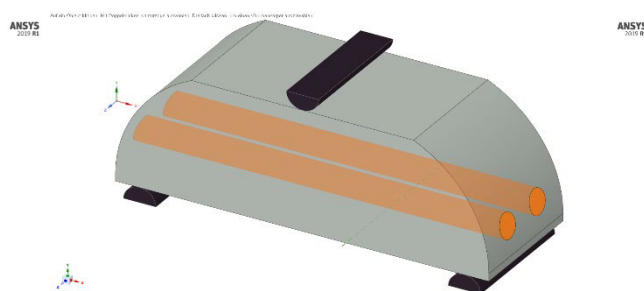


Abbildung 37: Modellierte Bauteilgeometrie eines topologieoptimierten Probekörpers mit innenliegender Epoxidharzbewehrung in ANSYS®

Für diesen ersten Versuchsaufbau einer 3-Punkt-Biegezugprüfung konnte die erwartete Verbesserung des Tragwerksystems bestätigt werden. Eine Gegenüberstellung des 3D-gedruckten Betonkörpers mit den normierten Abmessungen von  $l/b/h=160/40/40$  mm und dem topologieoptimierten Probekörper befindet sich in Tabelle 6. Signifikant ist die Reduzierung des Volumens bzw. der Masse im Gegensatz zur gleichbleibenden aufnehmbaren Belastung und der dabei entstehenden maximalen Zugspannung zwischen den Auflagern in Feldmitte. Zu berücksichtigen ist bei diesem Ergebnis hingegen, dass infolge des gewählten statischen Systems eine solch große Massenreduktion begünstigt wurde und dies nicht auf alle Systeme übertragen werden kann, sondern stets individuell zu berechnen ist.

Tabelle 6: Vergleich der Massen bei gleichbleibender Belastung

| Probekörper                      | Belastung | Max. Zugspannung<br>zwischen den<br>Auflagern | Volumen                 |        |
|----------------------------------|-----------|-----------------------------------------------|-------------------------|--------|
|                                  | F<br>[kN] | $\sigma$<br>[MPa]                             | V<br>[mm <sup>3</sup> ] |        |
| Ausgangsgeometrie                | -1,35     | ca. 2,0                                       | 256.000                 | 100 %  |
| Topologieoptimierte<br>Geometrie | -1,35     | ca. 2,0                                       | 164.116                 | 64,1 % |

### **3.3 Arbeitspaket III**

#### **3.3.1 Allgemeines**

Das Arbeitspaket III umfasst die Produktion optimierter Probekörper inklusive einer injizierten Bewehrung. Die wesentlichen Arbeitsschritte des Arbeitspaketes III sind zum einen die Entwicklung belastungsorientierter Probekörper und zum anderen die Analyse der Korrelation zwischen der injizierten Bewehrung und dem 3D-gedruckten Tragwerksystem. In diesem interessanten Spannungsfeld gilt es noch das Bewehrungsmaterial, wie in Abschnitt 3.2.3 erläutert, hinsichtlich seiner statischen Kenngrößen zu optimieren, um das Tragverhalten 3D-gedruckter Betonkörper signifikant zu steigern.

Bei der Entwicklung belastungsorientierter Probekörper werden die in Arbeitspaket I erforschten Definitionsgrößen zur Verarbeitungstemperatur und Viskosität der injizierten Bewehrung berücksichtigt. Des Weiteren sollen neben einem gradlinigen Bewehrungsverlauf die Möglichkeit einer dem Lastfluss entsprechenden Bewehrungsführung untersucht werden, um das Tragverhalten der unterschiedlichen Probekörper analysieren sowie das Potenzial eines ressourcenschonenderen Tragwerksystems optimal ausnutzen zu können.

#### **3.3.2 Entwicklung belastungsorientierter Probekörper**

Aufbauend auf der ersten Studie in Arbeitspaket II wird in Arbeitspaket III ein Unterzugmodell mit einer konstanten Flächenlast simuliert, um einen typischen Lastfall nachstellen zu können. Da die Probekörper aufgrund der vorhandenen Dimensionen des 3D-Druckers im Kleinformat gedruckt werden, ist das Einsparpotenzial des Materials geringer zu erwarten. Dennoch bieten diese Machbarkeitsstudien maßgebende Erkenntnisse in Bezug auf die Herstellung großformatiger Betonbauteile im 3D-Pulverdruckverfahren mit einer nachträglich eingebrachten Bewehrung, die dem Lastfluss entsprechend injiziert werden kann.

Der Versuchsaufbau basiert auf dem 3-Punkt-Biegezugversuch nach DIN EN 196-1 [25]. Zur Modifizierung der zentrischen Lasteinleitung in eine Flächenlast wurde ein Adapter mithilfe des FDM-Verfahrens gedruckt. Bedingt durch geometrische Unebenheiten und zur Sicherstellung einer gleichmäßigen Auflast wurden, wie in Abbildung 38 schematisch veranschaulicht, zur Kompensation zwei Gummimatten mit einer Stärke von 1 cm zwischen den lasteinleitenden Adapter und das 3D-gedruckte Bauteil positioniert.

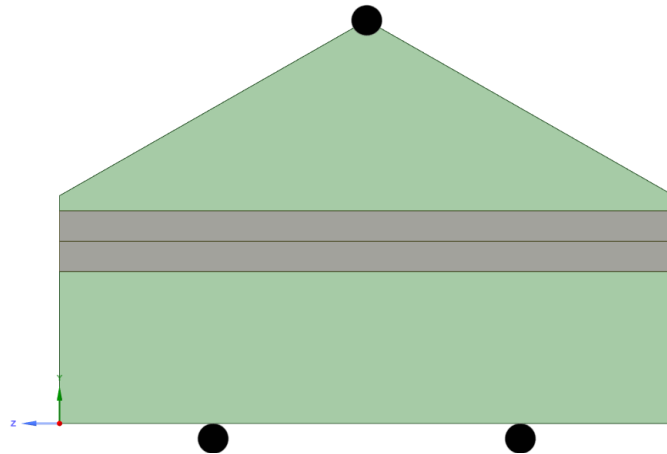


Abbildung 38: Schematischer Versuchsaufbau

Um gezielt ein differierendes Bruchverhalten zum 3-Punkt-Biegezugversuch zu erreichen, wurden zusätzlich zur Belastungsart die geometrischen Dimensionen geändert. Hierzu wurde die Länge des Versuchskörpers auf beiden Seiten um 20 mm erhöht. Somit wurde folgendes statische System als Grundlage für die Simulation verwendet:

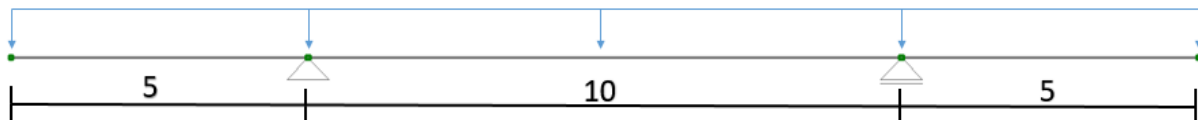


Abbildung 39: Statisches System des Versuchsaufbaus

Anhand des Momentenverlaufs in Abbildung 40 wird deutlich, dass infolge der Veränderungen des statischen Systems im Vergleich zum normierten 3-Punkt-Biegezugversuchsaufbaus nun das maximale Biegemoment nicht in Feldmitte, sondern über den beiden Auflagern entsteht. Da weiterhin mit einem Versagen des 3D-gedruckten Betonkörpers infolge zu hoher Zugspannungen zu rechnen ist, werden demnach die ersten Risse oberhalb der Auflager erwartet.

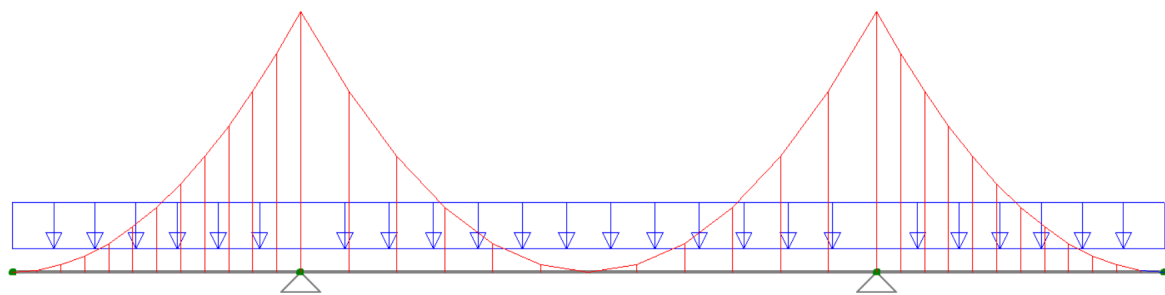


Abbildung 40: Biegemomentenverlauf des Versuchsaufbaus

Um ausreichend Gestaltungsraum für eine sinnvolle Bewehrung zu erreichen und trotz der geringen Abmessungen einen sichtbaren Effekt infolge der Topologieoptimierung darstellen zu können, wurde die Höhe des Prüfkörpers auf 50 mm und die Breite auf 30 mm festgelegt (siehe Abbildung 41). Das fertige Modell wurde im Anschluss an die Modellierung in die s. g. statisch-mechanische Analyse von ANSYS® übertragen. Für das FEM-Netz wurde eine Elementgröße von 2 mm festgelegt, um bei der Simulation neben einer hohen Genauigkeit eine gleichzeitig angemessene Rechenzeit zu erreichen.

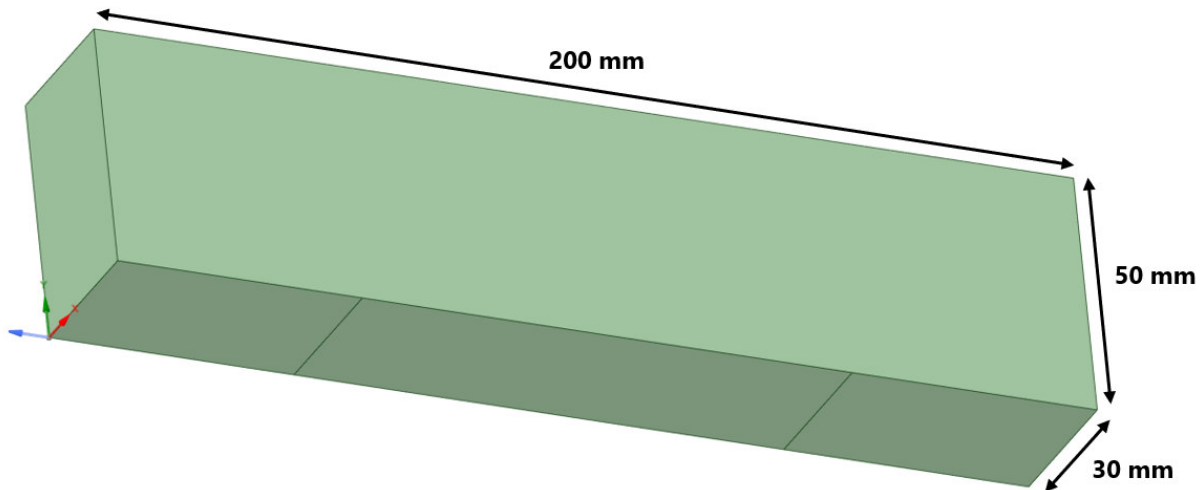


Abbildung 41: Ausgangsobjekt für spätere Optimierungen: Vollträger

Die anschließende FEM-Berechnung bestätigte die zu erwartenden Zugspannungsspitzen an der Oberseite der Probekörper über den beiden Auflagern sowie die zulaufenden Druckspannungen zum jeweiligen Auflager (siehe Abbildung 42 und Abbildung 43). Des Weiteren sind überproportional große Zugspannungen direkt am Auflager zu erkennen, die als Singularitäten in der Analyse auftreten können. Singularitäten sind bedingt durch die Methodik der FEM und zeigen sich im Allgemeinen in einem begrenzten Bereich durch eine Konzentration der spannungsabhängigen Ergebniswerte. Theoretisch betrachtet konzentrieren sich dabei die Steifigkeit und/oder die Beanspruchung in unendlicher Größe auf einen infinitesimal kleinen Bereich [54]. In der späteren realen Prüfung treten diese Singularitäten bzw. die daraus resultierenden Spannungskonzentrationen nicht in dem Maße auf, jedoch gilt es grundsätzlich die Ergebnisauswertung im Bereich von Singularitätsstellen zu hinterfragen und gegebenenfalls das Modell in diesem Bereich zu adaptieren, da Singularitätsstellen auf Probleme beim realen Probekörper hindeuten können.

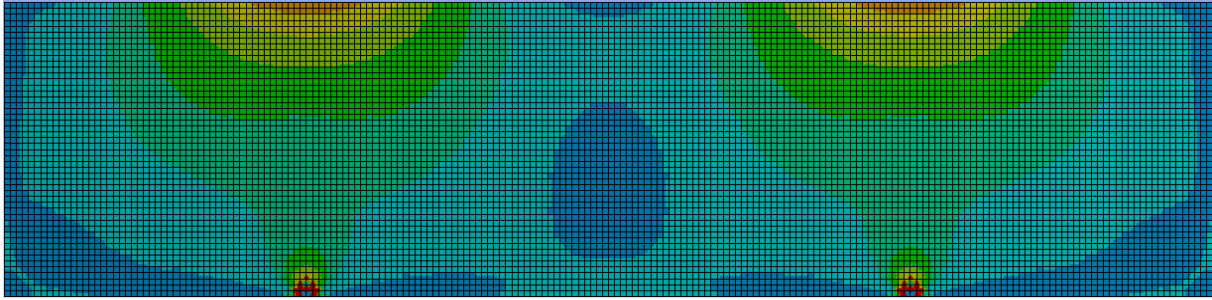


Abbildung 42: Hauptspannungsverteilung in der Seitenansicht

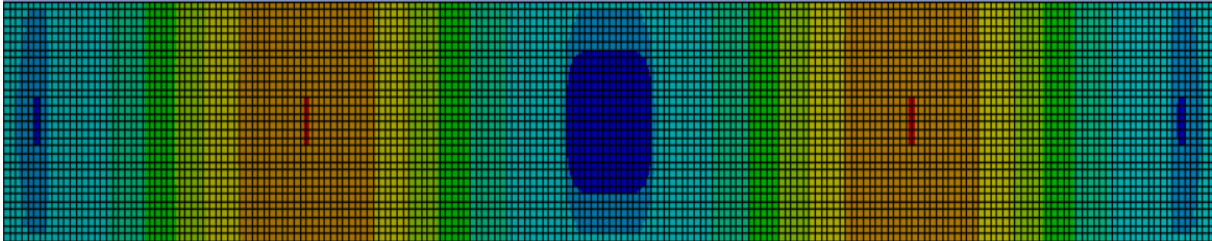


Abbildung 43: Hauptspannungsverteilung in der Draufsicht

Da der definierte Beton eine Grenzzugspannung von 1,7 MPa aufweist, wurde im ersten Analyseschritt die maximale Auflast ermittelt. Hierzu wurde die Flächenlast kontinuierlich bis zum Versagen des Betonkörpers gesteigert. Diese lag bei ca. 746 kN/m<sup>2</sup>. Zur Kontrolle des Simulationsergebnisses in der realen Prüfung dient die nach Gl. 3-17 berechnete Kraft, da aufgrund der speziellen Lasteinleitung der Grenzwert nicht als Flächenlast, sondern nur als Kraft abgelesen werden kann.

$$F = \sigma \cdot A = 746 \cdot (0,2 \cdot 0,03) = 4,476 \text{ kN} \cong 447,6 \text{ kg}$$

Gl. 3-17

Ziel der anschließenden Optimierung war es wiederum, einen Träger zu entwickeln, der grundsätzlich auf den geometrischen Parametern des definierten Bauteils beruht, eine reduzierte Masse aufweist und dabei mindestens der identischen Belastung im Vergleich zum Vollträger standhält. In diesem iterativen Rechenprozess mussten für die Simulation die Randbedingungen wie bspw. die Auflagerdefinitionen aus Arbeitspaket II übernommen und die Belastungssituation entsprechend angepasst werden. Demnach wurden bei der Strukturoptimierung des dargestellten Tragwerksystems die Auflagerfläche sowie die Lasteinleitungsfläche von einer Massenreduktion ausgeschlossen.

Um dem Ideal der vollständigen Ausnutzung des Gesamtsystems möglichst nahezukommen, wurde eine Massenreduktion je Iterationsschritt von 5 % zur vorangegangenen Analyse vorgenommen. Bei der 5 %-igen Massenreduktion wurden zunächst die unwesentlichen Bestandteile für den Lastabtrag bzw. die Elemente mit einem geringen Ausnutzungsgrad entfernt, die in der Analyse zur Hauptspannungsverteilung in Blau gekennzeichnet wurden

(siehe Abbildung 44). Ausgenommen waren in diesem Optimierungsprozess ungeachtet des Ausnutzungsgrades die Bereiche, die hinsichtlich der definierten Randbedingungen nicht reduziert werden konnten. Zur weiteren Analyse des maximalen Lastaufnahmevermögens unterschiedlicher Reduktionsgrößen wurde die Masse schrittweise bis auf 10 % der Ausgangsmasse verringert. Abbildung 45 veranschaulicht den finalen Zustand eines Tragwerkssystems, das ausschließlich noch aus organisch geformten Druck- und Zugsträngen besteht. Da diese Konstruktion jedoch nur zwei der drei definierten Anforderungen erfüllt bzw. im Vergleich zum Vollträger der ermittelten Grenzlast von ca. 746 kN/m<sup>2</sup> nicht standhält, wurde für die anschließende Form- und Querschnittsoptimierung die Struktur der 10 %-igen Massenreduktion (= 90 % des Vollträgers) verwendet.

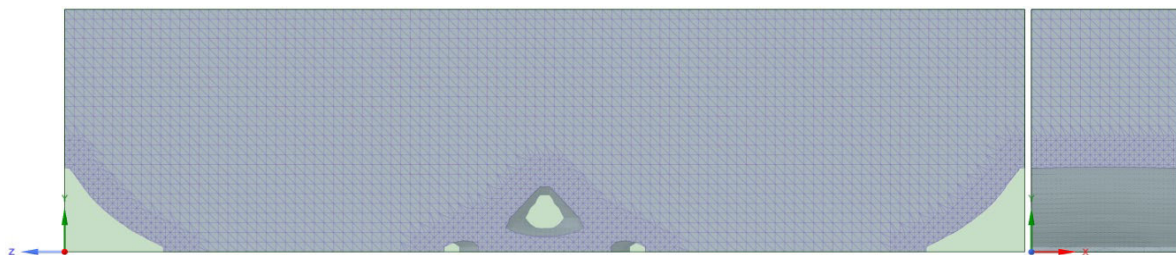


Abbildung 44: Ergebnis der 5 %-igen Massenreduktion in der Seitenansicht  
(x-Richtung: links und z-Richtung: rechts)

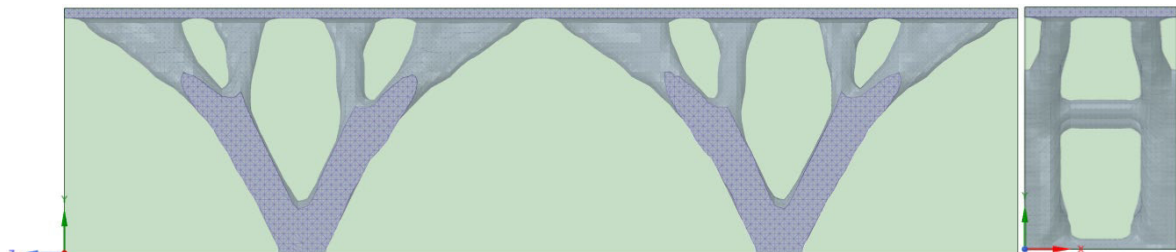


Abbildung 45: Ergebnis der 90 %-igen Massenreduktion in der Seitenansicht  
(x-Richtung: links und z-Richtung: rechts)

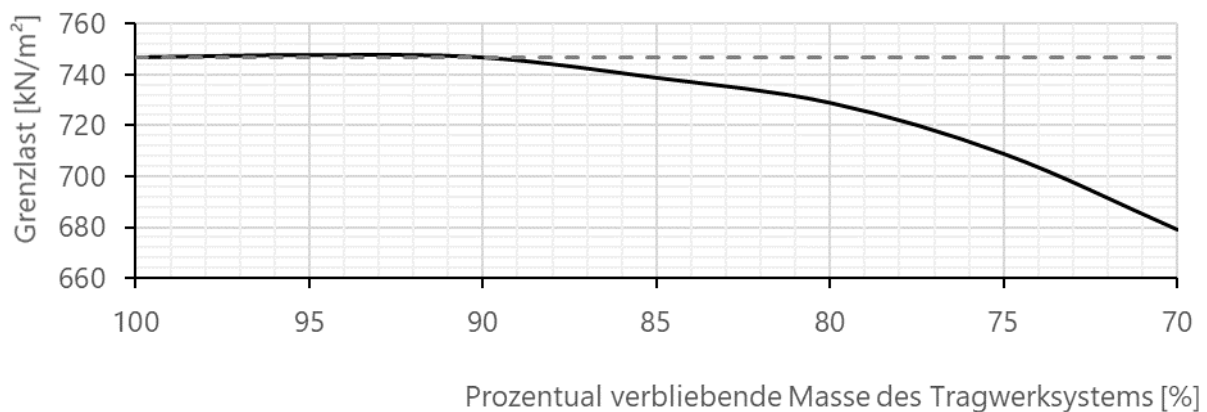


Abbildung 46: Grenzlast des kleinen Simulationskörpers bei unterschiedlichen Tragwerkssystemen

Da mit diesem Tragwerksystem neben der praktischen Umsetzung der Topologieoptimierung noch der Einfluss einer dem Lastfluss entsprechenden Bewehrungsführung analysiert werden sollte, wurden die Hauptspannungsvektoren für das resultierende Tragwerksystem ermittelt. Die Bestimmung der Bewehrungsposition im Bauteil richtete sich dabei anhand der Zugspannungsvektoren sowie der verbliebenen Geometrie des topologieoptimierten Bauteils. Da sowohl die Belastung als auch das Tragwerksystem symmetrisch sind, konnten mehrere Randbedingungen (RB) zur Berechnung einer Funktion definiert werden, die an der Mittelachse des Probekörpers gespiegelt und folglich dem Zugspannungsverlauf resp. dem nachträglichen Bewehrungskanal entsprach:

$$f(x) = \frac{3}{2500} x^4 - \frac{1}{50} x^3 + \frac{3}{100} x^2 + \frac{6}{10} x \quad \text{Gl. 3-18}$$

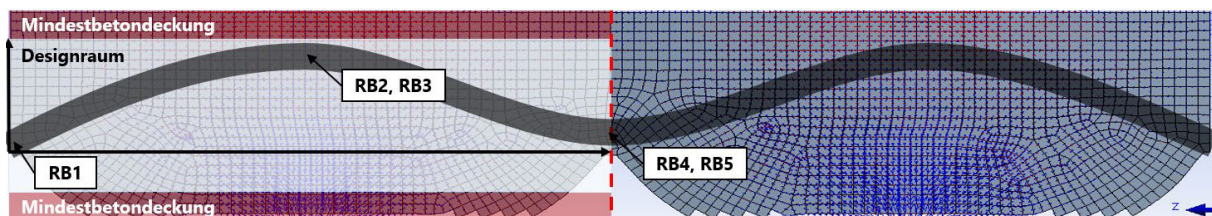
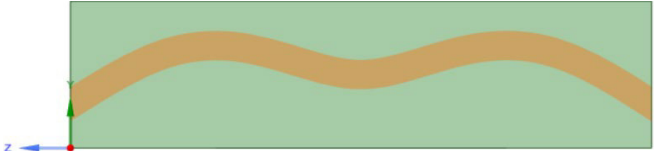
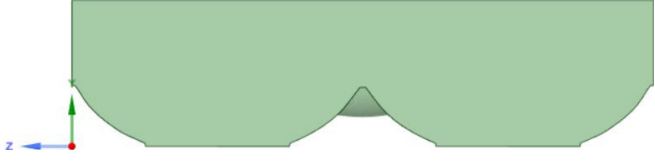
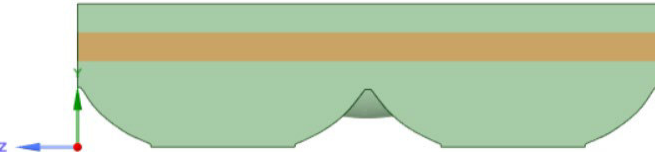
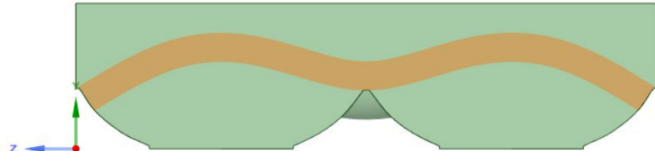


Abbildung 47: Bestimmung des Bewehrungsverlaufs anhand der Hauptspannungsvektoren beim topologieoptimierten Tragwerksystem

Da die nachträgliche Bewehrung in einen vom trockenen Compound befreiten Kanal injiziert werden sollte, musste eine Mindestbetondeckung definiert werden. Diese wurde aus Sicherheitsgründen auf 10 mm festgelegt, sodass beim Nachbearbeitungsprozess infolge eines zu starken Luftdrucks der vorgefertigte Kanal nicht durchbricht. In Feldmitte konnte bei der Bestimmung der Bewehrungsposition die Mindestbetondeckung nicht eingehalten werden, sodass in diesem Bereich um den Kanal eine zylindrische Verstärkung im Anschluss modelliert wurde. Durch den Form- und Querschnittsoptimierungsprozess verringerte sich die Massenreduktion minimal von 10 % auf 8,5 %.

Zur Quantifizierung des zu erwartenden, positiven Einflusses eines optimierten Bewehrungsverlaufs sowie eines topologieoptimierten Tragwerksystems wurden sechs verschiedene Modelle, wie in Tabelle 7 aufgeführt, generiert. Der Vollträger ohne Bewehrung stellt dabei das Ausgangsmodell dar und wurde für die zweite Variante mit einer geraden Bewehrung im oberen Bereich des Bauteils ergänzt, da die maximalen Zugspannungen aufgrund des statischen Systems über den Auflagern entstehen. In der dritten Variante wurde das Tragwerksystem mit der belastungsorientierten Bewehrung verstärkt. Zur Untersuchung, ob sich das Traglastvermögen des topologieoptimierten Systems in Gegenüberstellung zum vergleichbaren Vollträgersystem unterscheidet, erhielten die strukturoptimierten Modelle die identischen Bewehrungsverläufe.

Tabelle 7: Unterschiedliche FEM-Simulationsvarianten

| Variante                                                         | Simulationsmodell                                                                    |
|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Vollträger ohne Bewehrung                                        |    |
| Vollträger mit gerader Bewehrung                                 |    |
| Vollträger mit belastungsorientierter Bewehrung                  |    |
| Topologieoptimierter Träger ohne Bewehrung                       |   |
| Topologieoptimierter Träger mit gerader Bewehrung                |  |
| Topologieoptimierter Träger mit belastungsorientierter Bewehrung |  |

Für die Materialeigenschaften des 3D-gedruckten Betons wurden die ermittelten Kennwerte aus Arbeitspaket II verwendet. Die Bewehrungseigenschaften wurden in der Simulation in zwei Varianten analysiert. Zum einen wurde das reine Epoxidharz als Bewehrungsmaterial definiert und zum anderen kam der Verbundwerkstoff aus Epoxidharz inklusive Carbonschläuche zum Einsatz. Anhand der Auswertung in Tabelle 8 wird deutlich, dass durch die reine Epoxidharzbewehrung keine Optimierung der Grenzlast erzielt werden kann, da der Elastizitätsmodul des Epoxidharzes geringer ist, als die Steifigkeit des 3D-gedruckten Betons. Folglich führt der Bewehrungskörper aus reinem Epoxidharz sogar zu einer leichten Schwächung des Tragwerksystems. Mit den Carbonschläuchen konnte in der Simulation die zu erwartende Verbesserung der Grenzlast realisiert werden. Des Weiteren bestätigte sich die Annahme eines gesteigerten Lastaufnahmevermögens bei einer belastungsorientierten Bewehrungsführung. Für die Modelle mit einer Verbundwerkstoffbewehrung konnte bspw. eine Verbesserung von 4,0 bzw. 4,3 % erreicht werden. Im direkten Vergleich zwischen dem

Vollträger mit einem geraden Bewehrungsverlauf und dem topologieoptimierten Probekörper mit einer gradierten Bewehrungsführung konnte trotz des kleinen Tragwerksystems eine Laststeigerung von 4,0 % bei gleichzeitiger Massenreduktion von rund 8,5 % erreicht werden. Diese Simulationsergebnisse galt es im Anschluss in realen Untersuchungen zu verifizieren.

Tabelle 8: Vergleich der maximalen Auflast anhand der FEM-Simulation

| Variante                                                                 | Maximale Auflast<br>ohne Bewehrung<br>[kN]<br>(Flächenlast<br>[kN/m <sup>2</sup> ]) | Maximale Auflast<br>mit reiner<br>Epoxidharz-<br>bewehrung [kN]<br>(Flächenlast<br>[kN/m <sup>2</sup> ]) | Maximale Auflast<br>mit<br>Verbundwerkstoff-<br>bewehrung [kN]<br>(Flächenlast<br>[kN/m <sup>2</sup> ]) |
|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Vollträger ohne<br>Bewehrung                                             | 4,47<br>(746)                                                                       | -                                                                                                        | -                                                                                                       |
| Vollträger mit gerader<br>Bewehrung                                      | -                                                                                   | 4,45<br>(742)                                                                                            | 6,32<br>(1053)                                                                                          |
| Vollträger mit<br>belastungsorientierter<br>Bewehrung                    | -                                                                                   | 4,46<br>(743)                                                                                            | 6,59<br>(1098)                                                                                          |
| Topologieoptimierter<br>Träger ohne Bewehrung                            | 4,47<br>(746)                                                                       | -                                                                                                        | -                                                                                                       |
| Topologieoptimierter<br>Träger mit gerader<br>Bewehrung                  | -                                                                                   | 4,44<br>(740)                                                                                            | 6,32<br>(1053)                                                                                          |
| Topologieoptimierter<br>Träger mit belastungs-<br>orientierter Bewehrung | -                                                                                   | 4,45<br>(742)                                                                                            | 6,57<br>(1095)                                                                                          |

### 3.3.3 Produktion belastungsorientierter Probekörper

Die Produktionsschritte bis zur Entnahme der Probekörper aus dem Bauraum gleichen dem Ablaufschema nach Abschnitt 3.1.2.2. Relevante Untersuchungsparameter waren während des Druckprozesses der Druck- und Schichtauftrag sowie der Absorptionseffekt der angrenzenden Partikel. Zur Generierung eines Bewehrungskanal, der den vorab modellierten Abmessungen entspricht, wurden die Erkenntnisse aus Abschnitt 3.1.3 herangezogen. Abbildung 48 sowie die Detailaufnahme in Abbildung 49 veranschaulichen wie gering der Absorptionseffekt letztendlich aufgrund der festgelegten Einstellungsparameter am 3D-Drucker ausgefallen ist. Ein wesentlicher Aspekt in Bezug auf ein optimales Druckergebnis war zudem die gewählte Trockenmörtelzusammensetzung. Diese ist neben der Bindemittelflüssigkeitsparameter

maßgebend für die additiven Fertigungsparameter sowie die Festbetonkenngrößen. Bei einer unzureichend abgestimmten Flüssigkeitsmenge bezogen den Compound wären die Bewehrungskanäle, wie in Abschnitt 3.1.3 dargestellt, nicht vollständig realisierbar gewesen.



Abbildung 48: Aufnahme eines Druckauftrags während dem Herstellungsprozess eines Probekörpers mit belastungsorientierter Bewehrungsführung



Abbildung 49: Detailausschnitt aus Abbildung 48

Da die Kanäle der unterschiedlichen Exponate länger waren als die Öffnungen der Würfel aus Abschnitt 3.1.3, nahm der Nachbearbeitungsprozess mehr Zeit in Anspruch. Folgende Arbeitsschritte erwiesen sich zum Ausblasen der Bewehrungskanäle schließlich als zielführend:

- 1) Zur Vorbereitung zunächst den Kanalansatz freiblasen
- 2) Einführen und fixieren der Düse am Kanalansatz (siehe Abbildung 50)
- 3) Kanal mit geringem Druck ausblasen, bis eine erste Durchgängigkeit zu erkennen ist
- 4) Mit höherem Luftdruck den Kanal freiblasen, bis alle trockenen bzw. unbenetzten Partikel aus dem Kanal entfernt wurden



Abbildung 50: Ausblasen des Kanals durch Einführen des Druckluftschlauchs

Wesentlich bei dieser Methode war, dass die Fixierung des Ventils am Kanalanschluss nicht vollständig abschloss, damit Luft und Partikel an dieser Stelle gleichzeitig austreten konnten. Als Folge zeigte sich ein andauernder geringer Spüleffekt, der sich nach einiger Zeit bis zur Austrittsöffnung an der gegenüberliegenden Seite vorarbeitete und letztlich den Kanal ohne Beschädigung vom trockenen Compound befreite.

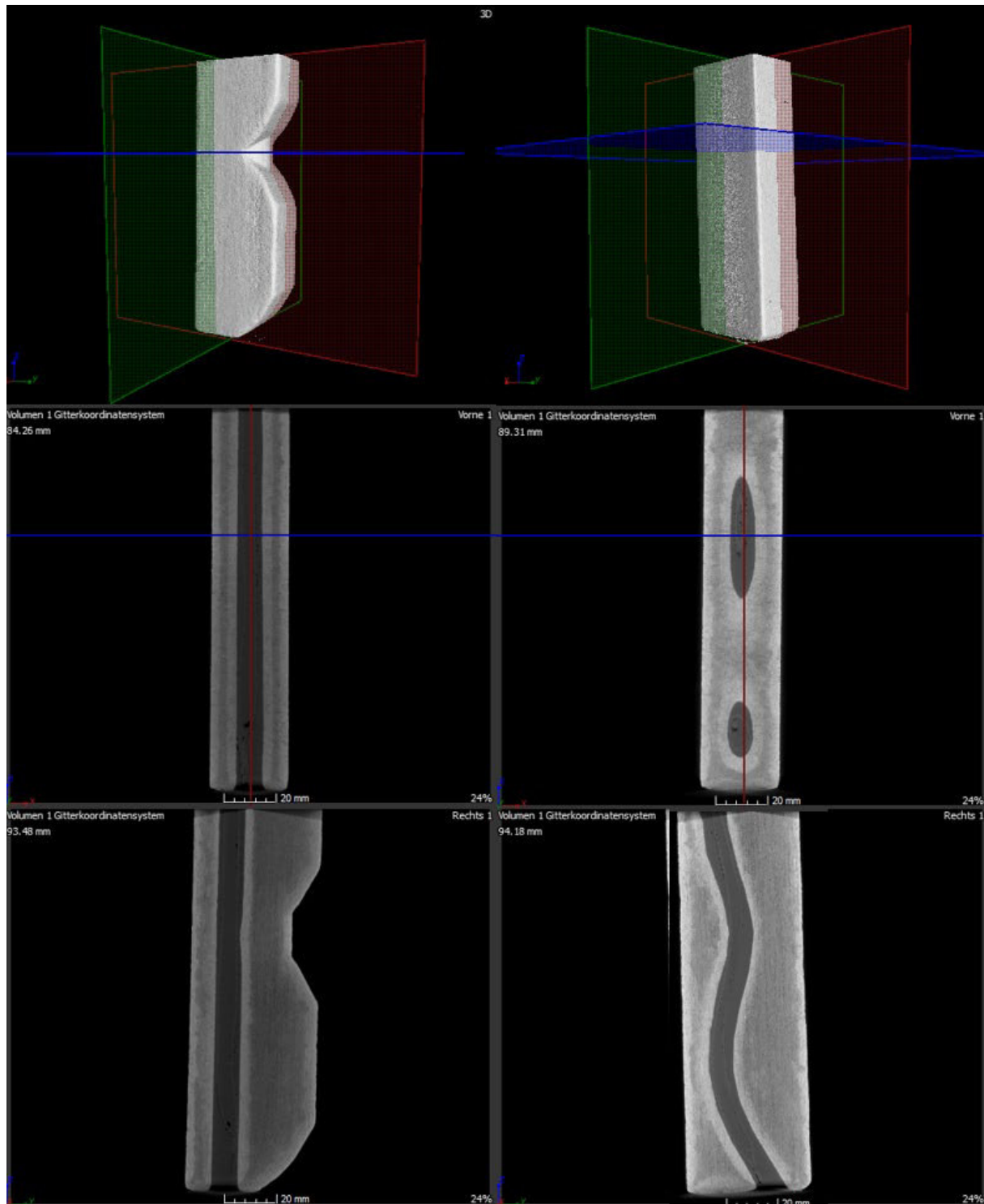


Abbildung 51: Exemplarische CT-Aufnahmen bewehrter Betonkörper

Im Anschluss an die Lagerung in Wasserglas wurden in die Kanäle der Probekörper zunächst zwei ineinandergeschobene Carbonschläuche gelegt und anschließend mit Epoxidharz verfüllt. Die zuvor angenommene Notwendigkeit einer thermischen Vorbehandlung des Betonkörpers sowie des Injektionsmaterials wurde nach den Erkenntnissen aus Arbeitspaket I vernachlässigt. Nachdem das injizierte Harz ausgehärtet war, wurden die Exponate in der CT-Anlage zerstörungsfrei auf Fehlstellen untersucht. Abbildung 51 veranschaulicht exemplarisch zwei unterschiedliche Bewehrungs- und Tragwerksformen. Anhand der CT-Aufnahmen ist zu erkennen, dass innerhalb des Bewehrungskanals jeweils nur minimale Querschnittsänderungen vorhanden sind. Dieses positive Ergebnis spricht für die zukünftige Realisierbarkeit gerader sowie geschwungener bzw. dem Lastfluss entsprechender Bewehrungsverläufe bei additiv gefertigten Betonkörpern im 3D-Pulverdruckverfahren. Die helleren Graustufen an den Oberflächen bzw. Kanalwänden deuten auf die nachträgliche Verdichtung der Betonstruktur durch die Wasserglasnachbehandlung hin und bestätigten somit die Erkenntnisse aus Abschnitt 3.1.5. Des Weiteren konnten bei keinem Probekörper deutliche Lufteinschlüsse festgestellt werden, sodass potentiell von einer konstanten Lastübertragung bzw. einem stetigen Verbund zwischen 3D-gedrucktem Beton und Bewehrungsmaterial ausgegangen werden kann. Ob die Bewehrung folglich einem Pull-Out-Versuch widerstehen kann und inwieweit die Simulationsergebnisse in realen Prüfungen bestätigt werden können, ist Bestandteil des Arbeitspakets IV.

### 3.4 Arbeitspaket IV

#### 3.4.1 Allgemeines

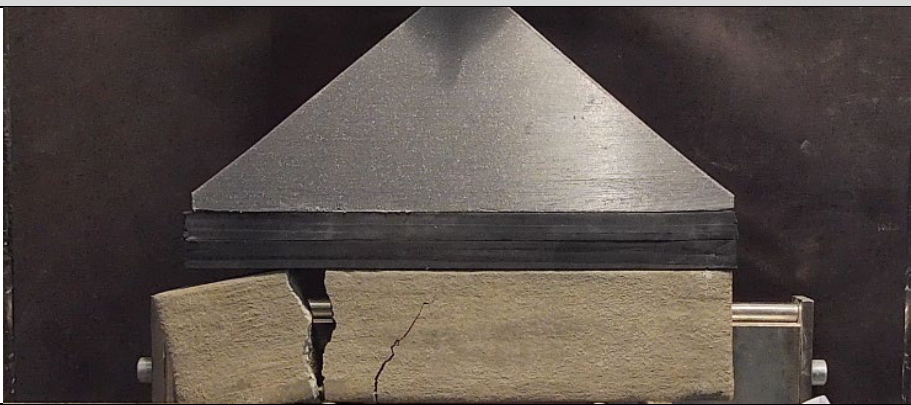
Im Rahmen des Arbeitspakets IV werden nachfolgend u. a. die betontechnologischen Kenngrößen in Bezug auf die unterschiedlichen Versuchsreihen analysiert sowie die Auswertungen der Probekörper mit und ohne injizierter Bewehrung verglichen. Des Weiteren soll anhand von Pull-Out-Versuchen eine Auswertung der Verbundeigenschaften zwischen Beton und Bewehrung folgen. Zusätzlich wird mithilfe einer computertomografischen Untersuchung die Bewehrungsstruktur innerhalb des Pull-Out-Versuchskörpers auf Fehlstellen untersucht, um etwaige Schwachstellen in Bezug auf Verankerungsvarianten feststellen zu können. Die erbrachten Ergebnisse werden schließlich in die FEM-Simulation implementiert und sollen zur Konkretisierung der realisierbaren fasensorientierten Belastungstheorie 3D-gedruckter Betonstrukturen beitragen. Durch die Modifikation der FEM-Simulation soll abschließend noch exemplarisch ein bautypisches Modell generiert werden, dass die wesentlichen Erkenntnisse aus den vorangegangenen Arbeitspaketen berücksichtigt, das Potenzial des innovativen Tragwerksystems veranschaulicht und einen Ausblick für weitere Anwendungsgebiete bietet.

#### 3.4.2 Analyse der Versuchsreihen aus Arbeitspaket III

##### 3.4.2.1 Analyse des Bruchzustands sowie der Grenzlast

Die Prüfung der unterschiedlichen Tragwerksysteme erfolgte, wie in Arbeitspaket III beschrieben, in Anlehnung an DIN EN 196-1 [25]. Zur Übertragung der zentrischen Einzellast wurde wie vorgesehen ein Adapter verwendet sowie zwei Gummimatten zum Ausgleich von Unebenheiten eingelegt. Die nachfolgenden Aufnahmen in Tabelle 9 dokumentieren exemplarische Bruchzustände unmittelbar nach dem Versagen des Tragwerksystems.

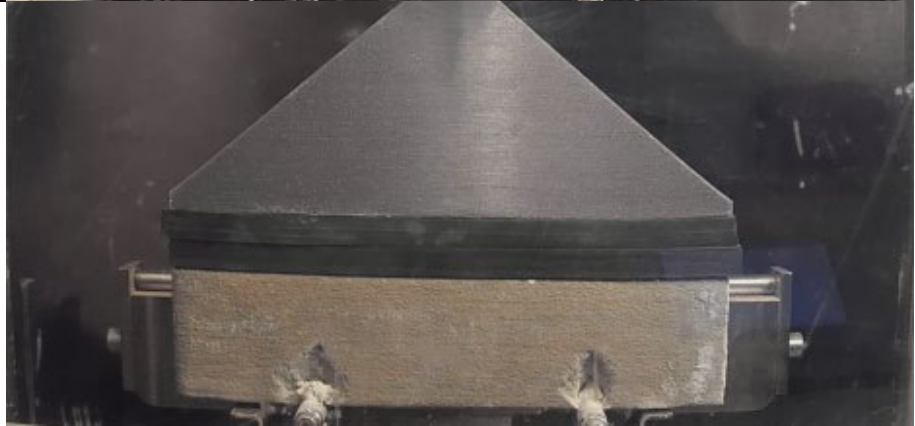
Tabelle 9: Exemplarische Bruchzustände unterschiedlicher Tragwerksysteme

| Variante                  | Versagensaufnahme                                                                    |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Vollträger ohne Bewehrung |  |

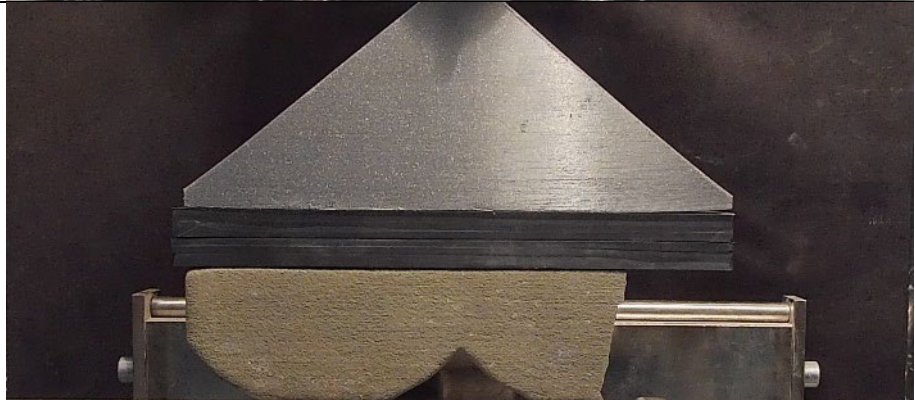
Vollträger mit  
gerader Bewehrung



Vollträger mit  
belastungs-  
orientierter  
Bewehrung

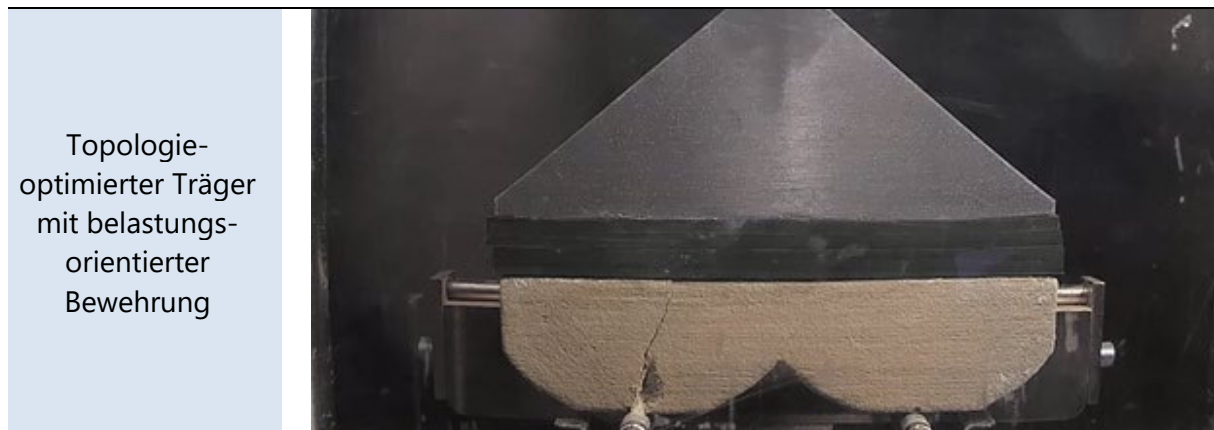


Topologie-  
optimierter Träger  
ohne Bewehrung



Topologie-  
optimierter Träger  
mit gerader  
Bewehrung





Die exemplarischen Aufnahmen der Bruchzustände zeigen, dass die Probekörper ohne Bewehrung, wie zu erwarten, nach überschreiten der Zugfestigkeit des Betons über einem der beiden Auflager gebrochen sind. Aufgrund der fehlenden Bewehrung sind die Bauteilenden links oder rechts vom Auflager abgefallen. In Bezug auf das Versagen der bewehrten Tragwerkstrukturen konnte bei den Probekörpern mit einer geraden Bewehrungsführung ein vergleichsweise stärkeres Schadensbild (z. B. größere Abplatzungen, mehr und stärkere Risse) festgehalten werden. Dies deutet auf die optimierte Spannungsverteilung der Probekörper mit einer belastungsoptimierten Bewehrungsführung hin. Anhand der durchschnittlichen Bruchlasten in Tabelle 10 konnte das verbesserte Lastaufnahmevermögen der Probekörper mit einer belastungsorientierten Bewehrungsführung ebenfalls bestätigt werden. Des Weiteren belegten die erreichten Bruchlasten sowie das dazugehörige Bruchverhalten, dass die überproportional großen Zugspannungen direkt am Auflager, wie in Abschnitt 3.3.2 erläutert, nicht die realen Spannungsspitzen widerspiegeln und entsprechend als Singularitäten deklariert wurden.

Hinsichtlich der Vergleichsanalyse zwischen den realen und simulierten Grenzlaster konnten bei den realen Untersuchungen höhere Kräfte bis zum Versagen des Tragwerksystems aufgebracht werden. Im Adaptionsprozess der Simulationsergebnisse wurde demzufolge die Zugfestigkeit des 3D-gedruckten Betons wieder von 1,7 MPa auf 1,9 MPa erhöht, da die Berücksichtigung der Dichte wie beim Leichtbeton (siehe Gl. 3-7) in Anbetracht der realen Untersuchungen vernachlässigt werden kann.

Mit den adaptierten Betoneigenschaften reduzieren sich, wie in Abbildung 52 dargestellt, die Abweichungen der Simulationsergebnisse zu den realen Grenzlaster im Durchschnitt von ca. 17 % auf 9 %. Dabei liegen die simulierten Grenzlaster jeweils auf der konservativen Seite und bieten demzufolge eine gewisse Sicherheit in Bezug auf weitere statische Berechnungen. Auffällig war in diesem Zusammenhang, dass die Simulationsergebnisse der bewehrten Tragwerksysteme einen größeren Unterschied zu den realen Grenzwerten aufzeigten, was potenziell mit den konservativen Annahmen der Bewehrungseigenschaften sowie dem Verbundverhalten zusammenhängt. Dies bietet für anschließende Analysen weiteres Optimierungspotenzial, um die Differenzen auf ein Minimum zu reduzieren.

Tabelle 10: Vergleich der maximalen Auflast anhand der realen Prüfungen

| Variante                                                            | Maximale Auflast<br>ohne Bewehrung [kN]<br>(Flächenlast [kN/m <sup>2</sup> ]) | Maximale Auflast<br>mit Verbundwerkstoff-<br>bewehrung [kN]<br>(Flächenlast [kN/m <sup>2</sup> ]) |
|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Vollträger ohne Bewehrung                                           | 5,24<br>(873)                                                                 | -                                                                                                 |
| Vollträger mit gerader Bewehrung                                    | -                                                                             | 8,03<br>(1338)                                                                                    |
| Vollträger mit<br>belastungsorientierter Bewehrung                  | -                                                                             | 9,00<br>(1500)                                                                                    |
| Topologieoptimierter Träger ohne<br>Bewehrung                       | 5,31<br>(885)                                                                 | -                                                                                                 |
| Topologieoptimierter Träger mit<br>gerader Bewehrung                | -                                                                             | 8,40<br>(1400)                                                                                    |
| Topologieoptimierter Träger mit<br>belastungsorientierter Bewehrung | -                                                                             | 8,83<br>(1472)                                                                                    |

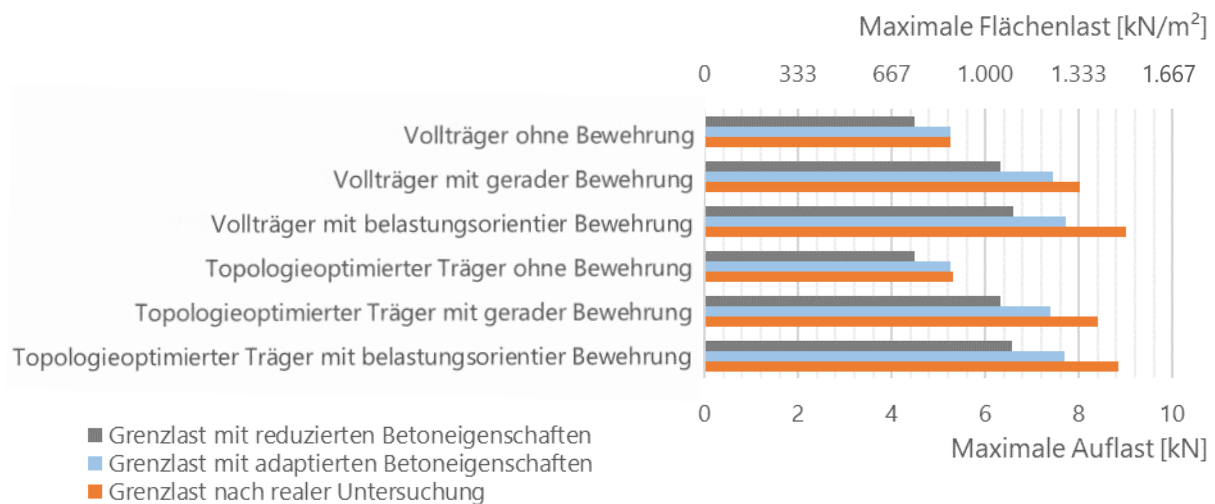


Abbildung 52: Gegenüberstellung der Grenzlasten

### 3.4.2.2 Gewichtsanalyse

Zur Verifizierung der simulierten bzw. geplanten Massenreduktion wurde das Gewicht der differierenden Probekörper über die einzelnen Arbeitsschritte hinweg dokumentiert und in einem Diagramm (siehe Abbildung 53) zusammengefasst. Zunächst wurden die Probekörper direkt nach dem Druckprozess gewogen (grauer Balken). Hieraus geht hervor, dass der 3D-gedruckte Beton mit den vorgenommenen Einstellungen direkt nach dem Druckvorgang eine Dichte von ca.  $1,33 \text{ g/cm}^3$  aufweist. Wie zu erwarten, war das Gewicht des Vollträgers ohne den Bewehrungskanal am schwersten. Durch das Freiblasen der Bewehrungskanäle reduzierte sich die Gesamtmasse jeweils um ca. 5 %. Der topologieoptimierte Träger ohne den Bewehrungskanal wies im Durchschnitt eine prozentuale Gewichtsreduktion von 8,31 % auf und bestätigt damit mit einer minimalen Abweichung von 0,14 % die berechnete Masse aus der vorangegangenen Simulation. Die weiteren Tragwerkvarianten mit einer topologieoptimierten Struktur inklusive eines freien Kanalverlaufs zeigten wiederum eine Verringerung der Gesamtmasse von rund 5 % zum topologieoptimierten Träger ohne Bewehrung.

Nach Abschluss der Lagerung im Wasserglas wurden die Probekörper getrocknet und erneut gewogen. Die Dichte der nachbehandelten Betonkörper lag bei rund  $1,7 \text{ g/cm}^3$  und die Porosität bei ca. 32 %. Die Proben der Variante „Topologieoptimierter Träger“ nahmen im Zuge der Nachbehandlung ca. 94 g an Masse zu. Die Vollträger steigerten ihre Gesamtmasse im Durchschnitt von 103 g. Die geringfügig höhere Gewichtszunahme ist auf das größere Volumen der Vollträger im Vergleich zum topologieoptimierten Träger zurückzuführen. Das größere Volumen bietet im Hinblick auf die relativ offenporige Betonmatrix der frisch gedruckten Betonkörper das Potenzial mehr Feuchtigkeit binden bzw. aufnehmen zu können. Im direkten Vergleich der Tragwerksvarianten mit und ohne Bewehrungskanal wiesen die Probekörper mit Kanal im Durchschnitt eine 1-2 % höhere Gewichtszunahme auf.

Für die Probekörper inklusive einer Bewehrung ergab sich nach Abschluss der Verfüllung mit den Carbonschläuchen sowie dem Epoxidharz noch eine letzte Messung. Die Gewichtszunahme konnte im Mittel mit 17,5 g festgestellt werden. Somit ergab sich abschließend für die topologieoptimierten Probekörper in der Gegenüberstellung mit dem vergleichbaren Pendant des Vollträgers im Durchschnitt eine Gewichtsreduktion von ca. 8,58 %. Dies kongruiert mit den simulierten FEM-Modellen und bestätigt zugleich die Detailgenauigkeit der 3D-gedruckten Betonkörper.

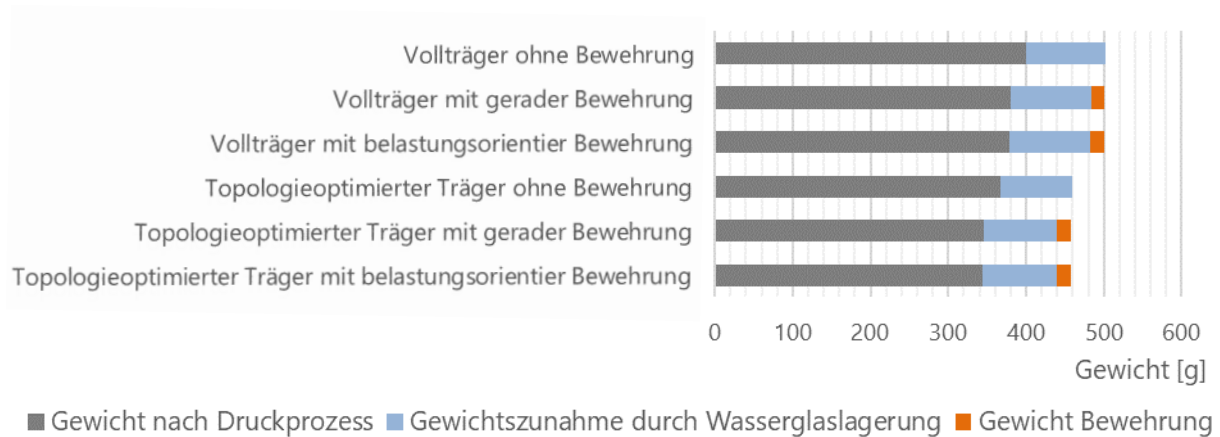


Abbildung 53: Durchschnittliches Gewicht der unterschiedlichen Tragwerksvarianten

Ein weiterer Bestandteil der Gewichtsanalyse ergab sich durch die Thematik des Recyclings im Anschluss an die Untersuchungen zur Tragfähigkeit der diversen Probekörper. Zur Ermittlung des recycelbaren Anteils wurde der 3D-gedruckte Beton mechanisch vom Bewehrungsmaterial getrennt (siehe Abbildung 54 links). Diese relativ simple Form der Auftrennung erwies sich als praktikable Methode, da das Bewehrungsmaterial eine deutlich höhere Festigkeit aufweist und somit nur der 3D-gedruckte Beton gebrochen ist. Durch diese Methode konnten bereits rund 90 % des Betons von der Bewehrung gelöst werden, sodass nur noch der Bewehrungsstrang mit den anhaftenden Partikeln, wie in Abbildung 54 rechts exemplarisch veranschaulicht, zu erkennen war. Eine weitere Auftrennung der Bestandteile wurde zum jetzigen Zeitpunkt nicht verfolgt und bietet daher noch Entwicklungspotenzial in anschließenden Forschungsvorhaben, um die letzten Prozent des 3D-gedruckten Betons ebenfalls recyceln zu können und den ressourcenschonenden Grundgedanken weiter zu forcieren.



Abbildung 54: Auftrennung vom 3D-gedruckten Beton und Bewehrungsmaterial

### 3.4.3 Auswertung der Verbundeigenschaften zwischen Beton und Bewehrung

#### 3.4.3.1 Allgemeines

Die Bestimmung der Verbundeigenschaften zwischen dem 3D-gedruckten Beton und der injizierten Bewehrung wurde in Anlehnung an den Pull-Out-Versuch nach RILEM RC6 [55] durchgeführt. Abbildung 55 veranschaulicht schematisch den Aufbau und Ablauf des Pull-Out-Versuchs. Wesentlicher Unterschied bei der Produktion zwischen konventionell und additiv hergestellten Exponaten ist, dass sich bei der konventionellen Produktion der Beton um die Bewehrung und den isolierten Bereich legt und beim 3D-gedruckten Beton die Geometrie der nachträglichen Bewehrung im Vorhinein definiert und anschließend verfüllt wird.

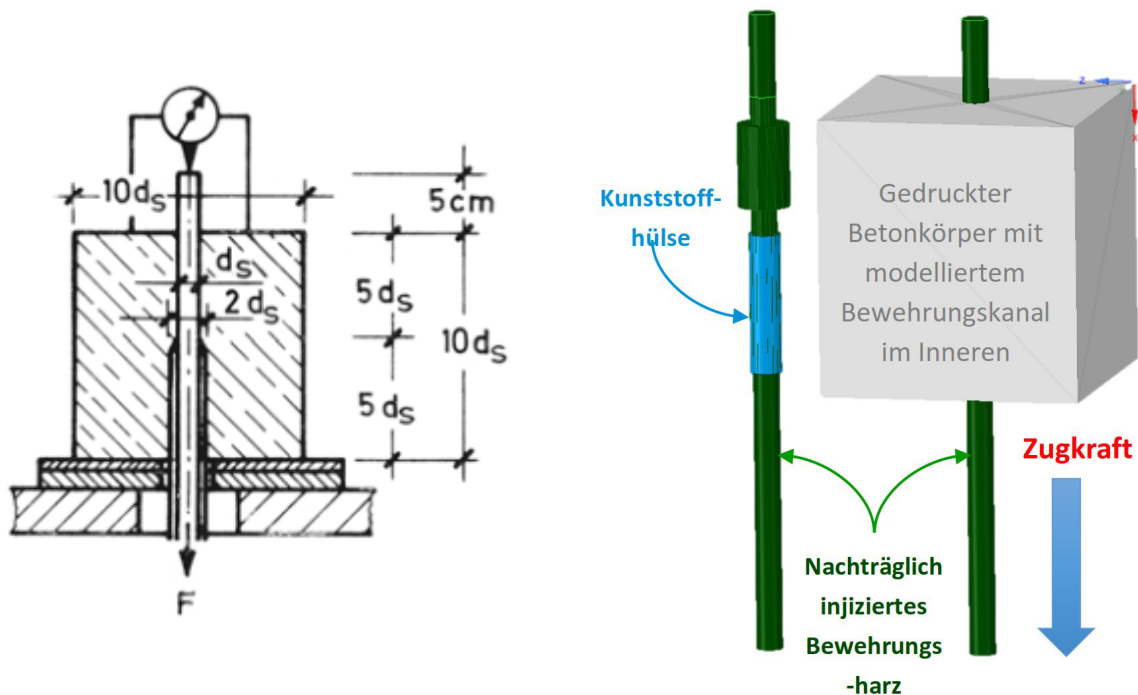


Abbildung 55: Versuchskörper für Ausziehversuche in Anlehnung an RILEM RC6 [55]

Während der Pull-Out-Versuche wird am langen Ende des Bewehrungsstabes eine Zugkraft aufgebracht und konstant bis zum Systemversagen gesteigert. Dabei treten in der Regel zwei Versagensformen auf. Zum einen kann die Bewehrung aus dem Beton gezogen werden (Pull-Out), was eine zu geringe Verbundfestigkeit implizieren würde, und zum anderen kann der Beton bei entsprechend hoher Schubkraft sowie einer daraus resultierenden Druckspannung versagen. Dieses Szenario würde eine ausreichend hohe Verbundfestigkeit darlegen. Eine weitere Möglichkeit, die sich im Zuge einer zu geringen Zugfestigkeit der Bewehrung ergeben kann, ist der Bruch des Stabs.

Damit sich der 3D-gedruckte Betonkörper während des Versuchsvorgangs nicht verschiebt, wird er entgegen der Zugrichtung mithilfe eines Widerlagers gehalten. Zum Ausgleich minimaler Unebenheiten wird zwischen Probekörper und Auflagerfläche eine dünne Polsterschicht eingelegt.

Die Verbundfestigkeit  $\tau$  kann nach Abschluss des Pull-Out-Versuchs über die aufgebrachte Last  $P$ , die Verbundlänge  $l_a$  und den Bewehrungsdurchmesser  $d_s$  nach Gl. 3-19 für Probekörper nach RILEM bestimmt werden. Da im Zuge der additiven Fertigung nicht nur die Bewehrungsführung individuell und dem Lastfluss entsprechend modelliert werden kann, sondern auch die Geometrie der Bewehrungsoberfläche optimiert werden soll, werden zusätzlich zwei weitere Varianten in einem Pull-Out-Versuch analysiert.

$$\tau = \frac{P}{\pi \cdot l_a \cdot d_s} \quad \text{Gl. 3-19}$$

Dabei ist:

- $\tau$  die Verbundfestigkeit, in MPa
- $P$  die Lasteinleitung, in N
- $l_a$  die Verbundlänge, in mm
- $d_s$  der Bewehrungsdurchmesser, in mm

#### 3.4.3.2 Simulation und Produktion der Pull-Out-Versuchskörper

Die Modellierung der Exponate erfolgte ebenfalls mit der Software „SpaceClaim“ von ANSYS® und orientierte sich an der grundlegenden Form nach RILEM RC6 [55]. Der Durchmesser des Bewehrungskanal wurde hinsichtlich der Erkenntnisse aus Abschnitt 3.1.3 mit 10 mm definiert, wodurch nach Norm eine Kantenlänge der Betonkörper von jeweils 100 mm ( $= 10 \cdot d_s$ ) resultierte. Die Verbundzone wurde für alle Bewehrungsvarianten mit 50 mm ( $= 5 \cdot d_s$ ) festgelegt, wobei die Kontaktfläche zwischen 3D-gedrucktem Beton und injizierter Bewehrung aufgrund der unterschiedlichen Bewehrungsgeometrie variieren kann. Für den isolierten Bereich musste der Kanaldurchmesser an das eingesetzte Rohr mit 12 mm angepasst werden, sodass während der nachträglichen Injektion das Epoxidharz nicht hinter das Rohr fließen und eine ausschließlich 5 cm lange Verbundzone gewährleistet werden konnte. Ein weiterer, elementarer Aspekt bei der Produktion der Exponate war die vollständige Verfüllung der unterschiedlichen Bewehrungsgeometrien, um einen garantierten Verbund zwischen dem Bewehrungsmaterial sowie dem 3D-gedruckten Beton sicherzustellen. Zur Kontrolle der vollständigen Verfüllung sowie der Überprüfung etwaiger Lufteinschlüsse wurden wie für die Probekörper aus Abschnitt 3.4.3.3 vor der Tragfähigkeitsprüfung CT-Aufnahmen erstellt.

Folgende Modelle wurden in dieser Versuchsserie generiert, simuliert, produziert und anschließend geprüft:

Das Modell 1 ist angelehnt an den klassischen Baukörper nach RILEM. Auf der linken Seite der Abbildung 56 ist der modellierte Betonkörper zu sehen und im rechten Bildteil ist ein Modell der inneren Kanalführung zu erkennen. Hierbei ist nochmals darauf zu achten, dass der Bewehrungsstrang nicht zwei unterschiedliche Radien besitzt, sondern letztendlich durch das nachträglich eingeschobene Rohr einen konstanten Durchmesser von 10 mm aufweist.

Der Spannungsverlaufs aus Abbildung 57 verdeutlicht, dass die Zugspannung aus der Bewehrung erst ab der Verbundzone über Schubspannungen in den Beton eingeleitet werden (rot bis gelber Bereich). Aus dieser Spannungsübertragung entsteht ein Druckkegel (blauer Bereich), der bis zur Auflagefläche ausläuft.

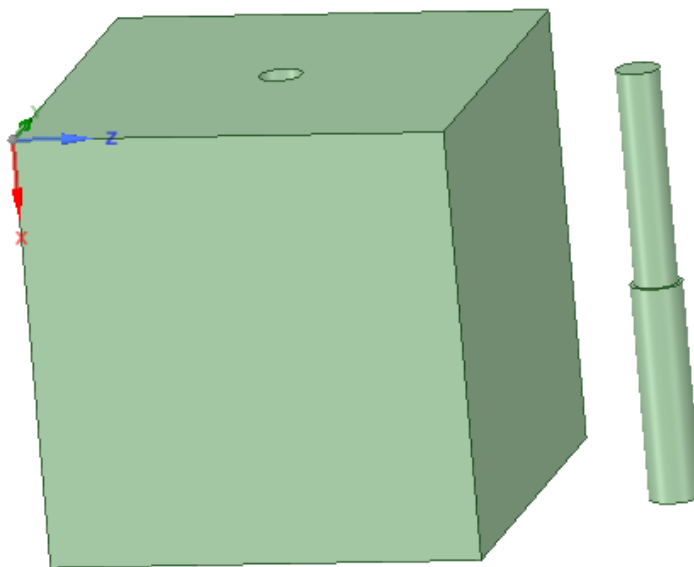


Abbildung 56: Modell 1: Angelehnt an den klassischen RILEM Versuchskörper

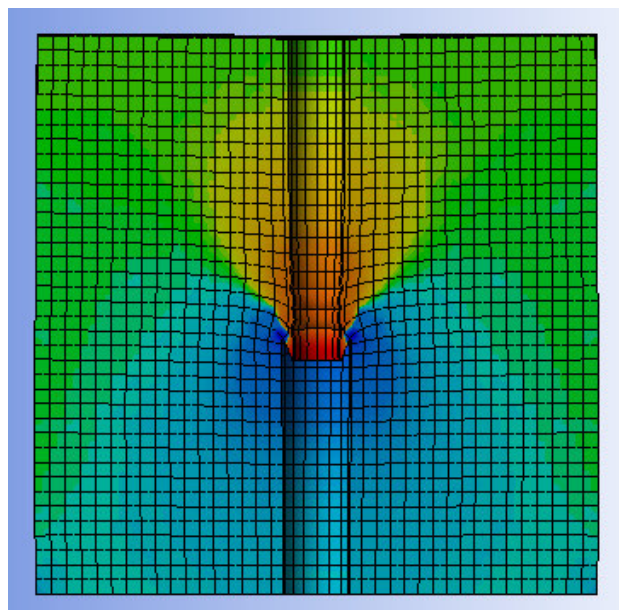


Abbildung 57: Spannungsverteilung im Betonkörper für Modell 1

Das Modell 2 wurde im Bereich der Verbundzone verstärkt, um neben der lastübertragenden Schubspannung zusätzlich Druckspannungen in den Betonkörper einleiten zu können und folglich die Verbundfestigkeit zu optimieren. Des Weiteren sollte anhand des Modells untersucht werden, ob sich neben den gradlinigen oder geschwungenen Kanalverläufen (wie bspw. bei den Probekörpern aus Arbeitspaket III) ebenfalls etwas komplexere Strukturen herstellen lassen bzw. ob der trockene Compound aus dem Inneren des 3D-gedruckten Baukörpers komplett ausgeblasen werden kann.

Die Verstärkung weist einen Durchmesser von 30 mm auf und zieht sich mit einer Höhe von 40 mm fast über die gesamte Verbundzonenlänge. Die verbliebenen 10 mm der Verbundzonenlänge wurden zu je 5 mm zur Oberfläche des Exponates und zum isolierten Bereich aufgeteilt. Der Durchmesser der verbliebenen 5 mm ober- und unterhalb der Verstärkung wurde mit jeweils 10 mm an den Bewehrungsdurchmesser im isolierten Bereich angepasst (siehe Abbildung 58).

Die Spannungsverteilung in Abbildung 59 zeigt einen ähnlichen Verlauf zum vorangegangenen Modell. Über die Mantelfläche der Verstärkung werden die Schubspannungen in den Beton eingeleitet und unterhalb der Verbundzone resultiert ein Druckkegel, der ebenfalls bis zur Auflagefläche ausläuft. Wesentlicher Unterschied ist, wie zu erwarten, dass direkt unter der Verstärkung höhere Druckspannungen entstehen, da der größere Zylinderquerschnitt als Widerlager in diesem statischen System wirkt. Somit bietet diese Geometrie der Bewehrung einen optimierten Verbund zum Beton und stellt eine alternative Bewehrungsform dar, sofern sich in den realen Untersuchungen herausstellt, dass die Verbundfestigkeit bei Modell 1 nicht ausreicht und die Bewehrung aus dem 3D-gedruckten Beton ausgezogen wird.

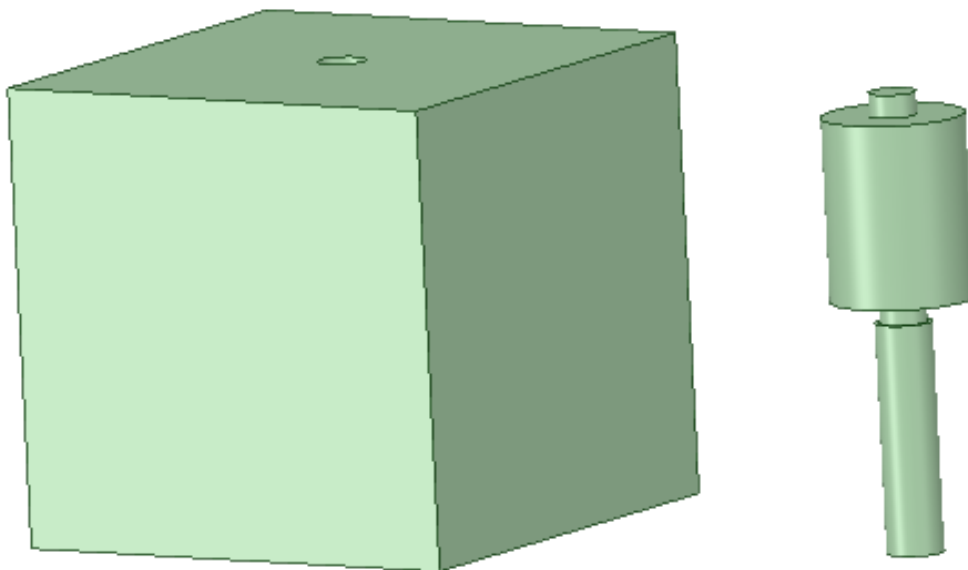


Abbildung 58: Modell 2: Verstärkung innerhalb der Verbundzone

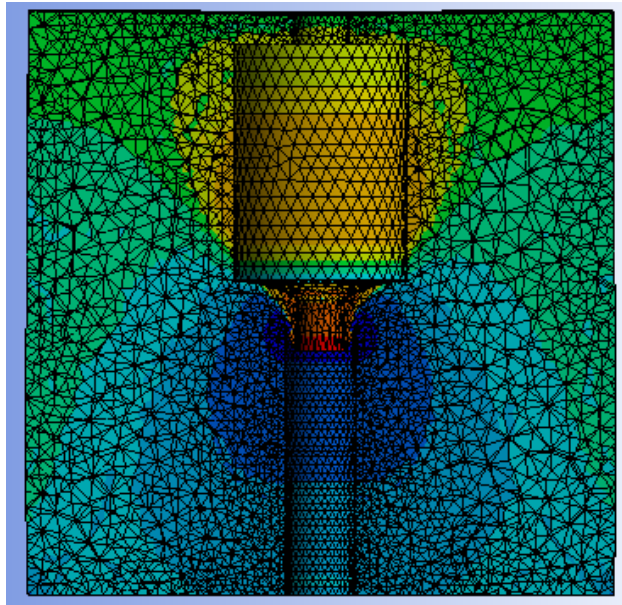


Abbildung 59: Spannungsverteilung im Betonkörper für Modell 2

Das Modell 3 ist einem Spreizdübel nachempfunden und soll durch seine vier abzweigenden Stränge eine verbesserte Verankerung im Bauteil bieten. Jeder dieser Abzweigungen weist den gleichen Durchmesser von 10 mm wie der Hauptstrang auf und verläuft in einen Winkel von 65 Grad zur Lasteinleitungsrichtung.

Anhand der beiden Schnittbilder in Abbildung 61 ist ersichtlich, dass die Spannungsverteilung durch die um 90 Grad verdrehten Bewehrungsstränge wesentlich komplexer ist und die Zugspannungen nicht nur über Mantelfläche der Bewehrung in den Beton übertragen werden, sondern ebenfalls durch Druckspannungen unterhalb der Abzweigungen auf den Beton wirken.

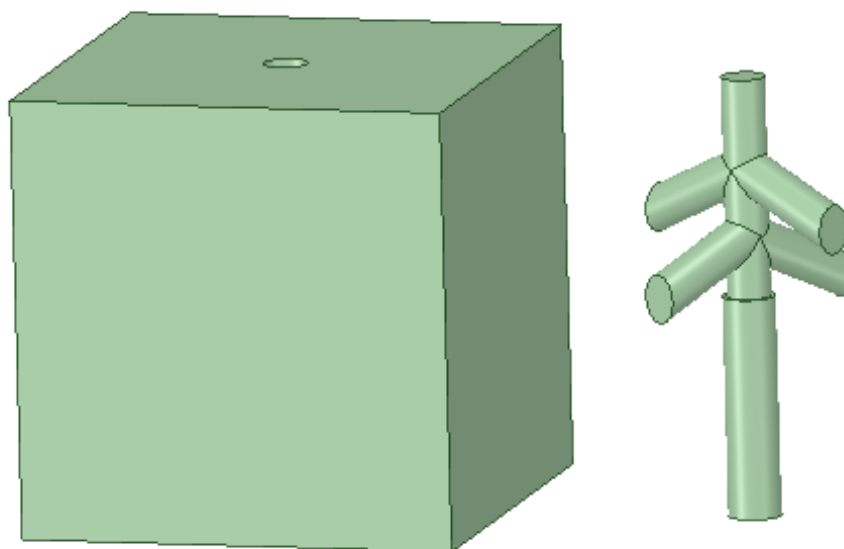


Abbildung 60: Modell 3: Angelehnt an den Aufbau eines Spreizdübels

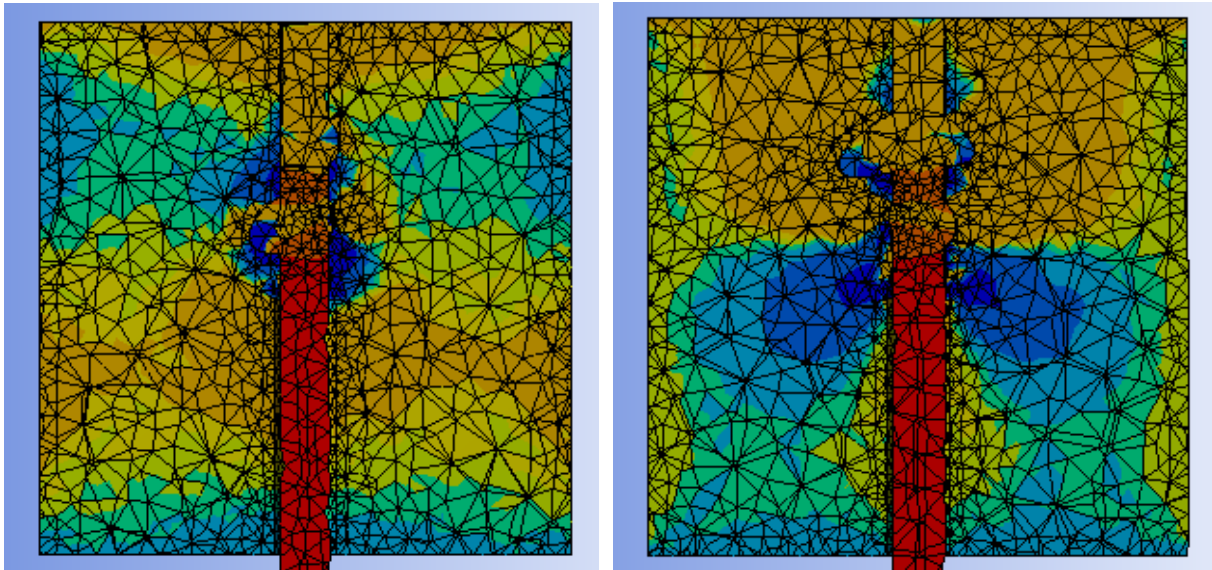


Abbildung 61: Spannungsverteilung im Betonkörper für Modell 3

Die Produktion der unterschiedlichen Versuchsreihen erfolgte nach den gleichen Schritten, wie in Abschnitt 3.1.2.2 dargestellt. Wesentlicher Untersuchungsparameter war während des Druckprozesses, wie bereits in Abschnitt 3.1.3 thematisiert, der Druckauftrag, um die gewünschte Geometrie sowohl an den Seitenflächen als auch im Inneren des Exponates gewährleisten zu können. Abbildung 62 veranschaulicht exemplarisch die Problematik bei einem zu hohen Bindemittelflüssigkeitsauftrag (rechts) gegenüber einem ideal gewählten Feuchtigkeitseintrag (links).

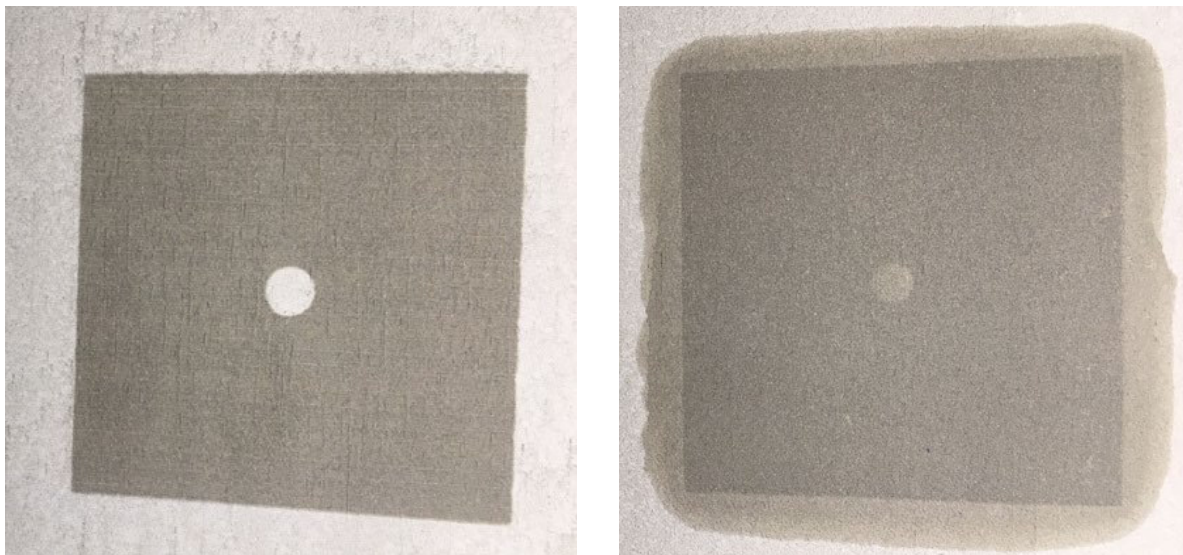


Abbildung 62: Druckauftrag bei idealem Feuchtigkeitseintrag (links) und bei zu hohem Bindemittelflüssigkeitsauftrag (rechts)

Im Anschluss an den Herstellungsprozess sowie die 28-tägige Lagerung in Wasserglas wurde das Kunststoffrohr, wie geplant, in den vordefinierten Isolierbereich eingedrückt und abgedichtet. Somit konnte bei der Injektion gewährleistet werden, dass kein Epoxidharz hinter

das Kunststoffrohr fließt und die Bewehrung ausschließlich Spannungen im Verbundzonenbereich in den 3D-gedruckten Beton einleiten kann. Für die Probekörper mit der reinen Epoxidharzbewehrung wurde der Kanal bzw. Bewehrungsstrang unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus den Vorversuchen gefüllt. Bei der zweiten Bewehrungsvariante sollten, wie in Abschnitt 3.2.3 erläutert, die diskontinuierlichen Fasern während dem Mischvorgang der Epoxidharzmatrix eingerührt und anschließend als kombinierte Masse in die vorgefertigten Kanäle injiziert bzw. verpresst werden. Da die Viskosität selbst bei einem relativ geringen Volumenanteil von 36 % stark zunahm und eine Verarbeitung bzw. ein anschließendes Verpressen des Verbundwerkstoffs sehr erschwert wurde, konnte eine vollständige Verfüllung der Bewehrungskanäle nicht mehr gewährleistet werden. Folglich musste diese Variante aufgrund von Produktionsschwierigkeiten verworfen werden und Variante drei mit den kontinuierlichen Fasern bzw. Carbonschläuchen stellte sich vorab als adäquate Methode zur Steigerung der Steifigkeit und Festigkeit des Epoxidharzes heraus. Diese konnten, wie bereits in Abschnitt 3.3.3 erläutert, in die Kanäle geschoben und nachträglich mit dem Epoxidharz verfüllt werden.

#### 3.4.3.3 CT-Analyse der Pull-Out-Versuchskörper

Nachdem das Epoxidharz ausgehärtet war, wurden die Probekörper, wie in Abbildung 63 exemplarisch veranschaulicht, mithilfe der CT-Anlage zerstörungsfrei auf Fehlstellen untersucht. Hierbei stellte sich heraus, dass die Produktion der unterschiedlichen Exponate nicht bei allen optimal verlaufen ist. Prägnante Fehlstellen werden in Abbildung 64 bis Abbildung 66 dargestellt und bieten relevante Erkenntnisse zur Umsetzbarkeit der Bewehrungsführung innerhalb des 3D-gedruckten Betons sowie für die nachträgliche Bewehrung der vorgefertigten Strukturen.



Abbildung 63: Exemplarische Aufnahme eines Probekörpers in der CT-Anlage

Bei den Exponaten mit einer geradlinigen Bewehrungsführung konnten kaum bis keine Fehlstellen identifiziert werden, was die Erfahrungen zu den topologieoptimierten Probekörpern bestätigte. Ausschließlich bei einer unzureichenden Nachbearbeitung des Exponates konnte, wie in Abbildung 64 veranschaulicht, eine deutliche Abweichung zum definierten Kanaldurchmesser festgestellt werden. Zudem zeigte sich, dass mit einer zu schnellen Injektion des Epoxidharzes die Luft nicht wie vorgesehen aus dem Bewehrungskanal entweichen kann und folglich Fehlstellen in der Matrix verursachte.

Ein durchgängig positives Resultat konnte hingegen bei den geradlinigen Bewehrungsverläufen mit einem langsamen Injektionsvorgang sowie leichter Schwenkbewegungen des Exponates beobachtet werden. Des Weiteren bestätigte sich, wie bereits in Abschnitt 3.3.3 zu den topologieoptimierten Probekörpern dargestellt, dass die Injektion in den Bewehrungskanal zuzüglich der Carbonschläuche funktioniert.



Abbildung 64: CT-Aufnahme eines Probekörpers mit gerader Bewehrungsführung

Für die Exponate mit einem verstärkten Bewehrungskanal offenbarten sich ähnliche Probleme in Bezug auf eine unzureichende Nachbearbeitung sowie einer zu schnellen Injektion (siehe Abbildung 65). Des Weiteren konnten bei vereinzelt Probekörpern Lufteinschlüsse zwischen dem Übergang vom breiten zum schmalen Bewehrungsquerschnitt festgestellt werden. Zur Prävention dieser Problematik sollten demnach zukünftige Bewehrungsverläufe das Entweichen der Luft stärker berücksichtigen.

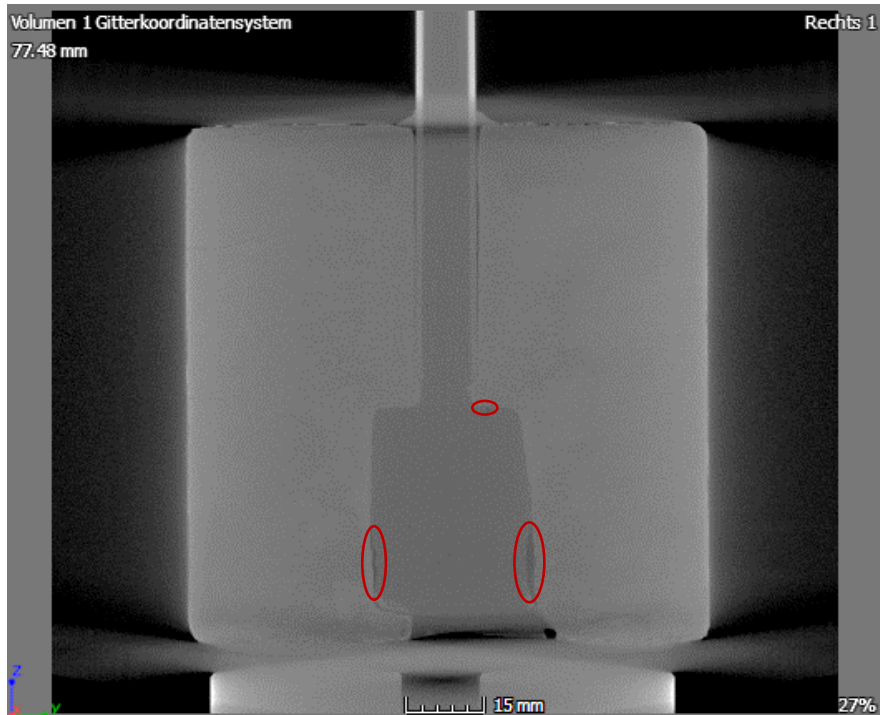


Abbildung 65: CT-Aufnahme eines Probekörpers mit verstärktem Bewehrungsquerschnitt

Bei der dritten Variante der Bewehrungsführung konnte die Thematik der notwendigen Luftentweichung konkret dokumentiert werden. Obwohl der Kanal langsam mit dem Epoxidharz befüllt und der Probekörper zudem zwischendurch geschwenkt wurde, konnte die Luft aus dem definierten Widerhaken nicht vollständig entweichen. Dies veranschaulicht der Schnitt in Abbildung 66 deutlich. Des Weiteren zeigten sich erhebliche Unterschiede zwischen den Exponaten in Bezug auf die Widerhaken, da trotz verstärkter Nachbearbeitung die definierte Geometrie nicht konstant produziert werden konnte. Aus diesem Grunde bieten sich solche Strukturen für eine nachträgliche Bewehrung nicht an.



Abbildung 66: CT-Aufnahme eines Probekörpers mit Widerhaken

#### 3.4.3.4 Analyse der Pull-Out-Versuche

Im Anschluss an die CT-Aufnahmen wurden die Exponate, wie in Abschnitt 3.4.3.1 erläutert, in Anlehnung an den Pull-Out-Versuch nach RILEM RC6 [55] geprüft. Die Pull-Out-Versuche wurden dabei mithilfe einer weggesteuerten Prüfmaschine durchgeführt. Da differierende freie Weglängen aufgrund des elastischen Verhaltens der Bewehrung unterschiedlich große potentielle Energien während des Ausziehvorgangs implizieren können und deren Einfluss auf die maximalen Auszugkräfte nicht eindeutig bekannt ist [56], wurde beim Einrichten der Exponate in die Zugpresse die freie Weglänge zwischen der Oberkante des 3D-gedruckten Probekörpers und dem Spannzeug der Zugpresse konstant gehalten.

Die Durchschnittswerte der Untersuchungen sind in Tabelle 11 aufgeführt. Die Ergebnisse bestätigen einerseits, dass der Verbundwerkstoff aus Epoxidharz und Carbonschläuchen eine wesentlich höhere Belastbarkeit aufweist und andererseits, dass ausschließlich mithilfe der zusätzlichen Verstärkung des Epoxidharzes ein Versagen des 3D-gedruckten Betons forciert werden konnte.

Die durchschnittliche Versagenslast der Probekörper mit einer geradlinigen Bewehrung ohne Carbon-Verstärkung betrug 2,9 kN bzw. ca. 290 kg. Die durchschnittliche Bruchlast liegt somit unterhalb der zu erwartenden Belastbarkeit des Epoxidharzes von rund 3,1 kN bei einem Bewehrungsdurchmesser von 1 cm. Dies ist auf die dargestellte Problematik der Lufteinschlüsse innerhalb der Epoxidharzmatrix bei den ersten Exponaten zurückzuführen. In Abbildung 67 werden die Fehlstellen nochmals im Detail unter einem digitalen Auflichtmikroskop dokumentiert. Die gelb umrandeten Bereiche kennzeichnen größere Lufteinschlüsse und mit den roten Kreisen wurden noch kleinere Fehlstellen markiert. Insgesamt offenbart die Bruchkante die Lufteinschlüsse, die bereits bei den CT-Aufnahmen zu erkennen waren, und bestätigt den geschwächten Querschnitt in diesem Bereich.

Die weiteren Exponate mit einer reinen Epoxidharzbewehrung wiesen infolge der beschriebenen Maßnahmen keine bis kaum sichtbare Lufteinschlüsse im geraden Zugstrang auf, sodass die Bruchlast sogar leicht oberhalb der berechneten Belastbarkeit des Epoxidharzes lag und die Schwankungen deutlich geringer ausfielen. Die Geometrie der Bewehrung im Bereich der Verbundzone war in Bezug auf die Bruchlast bei den Exponaten ohne Verstärkung nicht von Relevanz, da die Verbundfestigkeit zum einen bereits bei den Probekörpern mit einer geradlinigen Bewehrungsführung größer war als die Zugfestigkeit der Epoxidharzmatrix und zum anderen die Druckfestigkeit des 3D-gedruckten Betons noch nicht überschritten wurde. Demnach ist die Bewehrung jeweils unterhalb der Probekörper gebrochen.

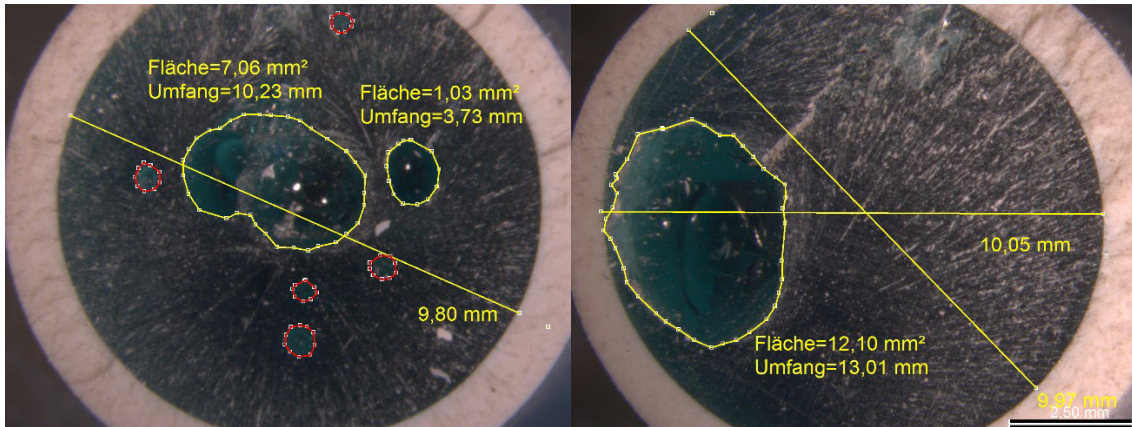


Abbildung 67: Ansicht der Bruchkanten unter dem Mikroskop

Bei den Versuchsreihen mit einer Carbonverstärkung konnten neben einer Veränderung der Versagensart auch teilweise Korrelationen der Bruchlast zur Bewehrungsgeometrie festgestellt werden. Beispielsweise bestätigten die Probekörper der zweiten Variante mit einer dickeren Bewehrungsgeometrie, dass sich die Spannungsverteilung im Vergleich zur ersten Variante positiver auf das Traglastvermögen auswirkt. Für die dritte Variante konnten hingegen keine klaren Rückschlüsse auf die Wirkungsweise der Widerhaken gezogen werden, da die Geometrien im Inneren der 3D-gedruckten Struktur zum einen nicht einheitlich produziert und zum anderen nicht gänzlich verfüllt werden konnten, was folglich durch die verschiedenen Lufteinschlüsse zu keiner gleichmäßigen Spannungsübertragung führen konnte.

Da jedoch die Verbundfestigkeit bei allen Versuchsreihen mit einer Carbonverstärkung höher als die Druckfestigkeit des 3D-gedruckten Betons war, besteht die Notwendigkeit komplexer Bewehrungsstrukturen zur Optimierung des Verbunds nach dem aktuellen Stand der Analyse nicht. Die Oberfläche des Betons weist demnach aufgrund der Körnung des Compounds sowie der daraus resultierenden Rauigkeit ein hohes Potenzial auf, um die einleitende Zugbelastung über Schubspannungen in den Beton übertragen zu können und folglich einen ausreichenden Verbund zu gewährleisten.

Tabelle 11: Durchschnittliche Ergebnisse der Pull-Out-Versuche

| Variante                                                           | Versagensart    | Versagenslast |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------|
| Gerade Bewehrungsführung<br>- Epoxidharz                           | Bewehrungsbruch | 2,9 kN        |
| Gerade Bewehrungsführung<br>- Epoxidharz + Carbonschläuche         | Betonversagen   | 10,4 kN       |
| Verstärkte Bewehrungsführung<br>- Epoxidharz                       | Bewehrungsbruch | 3,3 kN        |
| Verstärkte Bewehrungsführung<br>- Epoxidharz + Carbonschläuche     | Betonversagen   | 12,7 kN       |
| Bewehrungsführung mit Widerhaken<br>- Epoxidharz                   | Bewehrungsbruch | 3,4 kN        |
| Bewehrungsführung mit Widerhaken<br>- Epoxidharz + Carbonschläuche | Betonversagen   | 9,2 kN        |

### 3.4.4 Implementierung der erbrachten Ergebnisse in die FEM-Simulation einer anwendungsbezogenen Tragwerkskonstruktion

#### 3.4.4.1 Allgemeines

Zur Demonstration des Potenzials topologieoptimierter Betonbauteile zuzüglich einer belastungsorientierten Bewehrung wird im nachfolgenden Modell ein Träger mit praxisüblichen Dimensionen analysiert. Die Modifikation der FEM-Simulation basiert maßgeblich auf den Erkenntnissen aus Abschnitt 3.4.2 und 3.4.3. Hierbei ist hervorzuheben, dass die Festbetonparameter aus vorangegangenen Untersuchungen zu diesem Forschungsvorhaben größtenteils bestätigt wurden. In Bezug auf die getroffenen Annahmen wurde zur weiteren Annäherung der realen und simulierten Auswertungen die maximale Zugfestigkeit  $f_{3Dct}$  des 3D-gedruckten Betons von 1,7 MPa auf 1,9 MPa angehoben. Dies entspricht dem berechneten Wert aus Gl. 3-5. Demnach ist die Reduzierung der berechneten Zugfestigkeit mit dem Anpassungsfaktor  $\eta_1$  für Leichtbeton nach DIN EN 1992-1-1 [38] unter Berücksichtigung der erbrachten Ergebnisse zu vernachlässigen.

#### 3.4.4.2 Analyse einer anwendungsbezogenen Tragwerkskonstruktion

Die Querschnittsabmessungen des Unterzugs wurden mit einer Höhe von 50 cm sowie einer Breite von 30 cm definiert. Als statisches System für die Tragwerkskonstruktion wurde ein Zweifeldträger mit drei Auflagern und einer Gesamtlänge von 10 m festgelegt. Die in Abbildung 68 orange dargestellten Felder symbolisieren die Auflagerflächen (z. B. von Wänden) und weisen die Maße von  $l/b = 30/30$  cm auf. Infolge der konstanten Gleichstreckenlast sowie durch das zu berücksichtigende Eigengewicht des Unterzugs entsteht der in Abbildung 69 veranschaulichte Momentenverlauf.

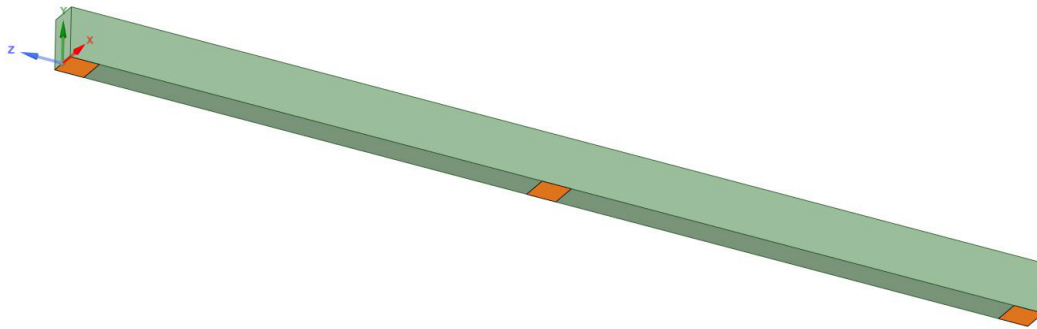


Abbildung 68: Ausgangssituation des praxistypischen Simulationsmodells

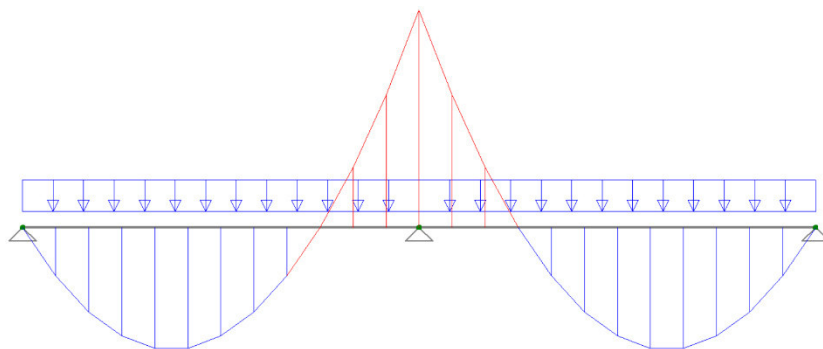


Abbildung 69: Statisches System und Momentenverlauf des 2-Feldträgers

In Bezug auf die geplante Strukturoptimierung wurde zunächst untersucht, wie viel Masse eingespart werden kann, ohne dabei nennenswert an Tragfähigkeit zu verlieren. Hierzu wurde die Geometrie analog zu den numerischen Simulationen in Arbeitspaket II und III zunächst topologieoptimiert sowie im Anschluss noch im Detail form- bzw. querschnittsoptimiert.

Dieser iterative Berechnungsprozess erfolgte wiederum in kleinen Schritten, um sich dem Optimum der maximalen Auslastung in jedem Kubikmillimeter anzunähern. Im ersten Iterationsschritt zeichnete sich wiederum ab, in welchen Bereichen die Spannung bzw. der Ausnutzungsgrad sehr gering ist, sodass diese hinsichtlich eines leichteren sowie effizienteren Tragwerksystems entfernt werden konnten (siehe Abbildung 70).



Abbildung 70: Ergebnis der 5 %-igen Massenreduktion in der Seitenansicht

Entsprechend der definierten Randbedingungen blieben die Lasteinleitungs- sowie Auflagerflächen bei der Topologieoptimierung unberücksichtigt. Dies verdeutlicht sich je mehr

Volumen bzw. Masse in der Simulation reduziert wurde. Bei einer exemplarischen Massenreduktion von 90 % (siehe Abbildung 71) entstand ähnlich zum Modell aus Arbeitspaket III ein organisches Fachwerksystem bestehend aus Zug- und Drucksträngen, die einerseits die Druckspannungen von der Lasteinleitungsfläche in die Auflagerbereiche leiten und andererseits werden in Anlehnung an den Momentenverlauf oder auch Biegelinienvverlauf die Zugstränge von der FEM-Software modelliert.



Abbildung 71: Ergebnis der 90 %-igen Massenreduktion in der Seitenansicht

Nach Abschluss der diversen Iterationsschritte zeigte sich zunächst, dass ab einer Massenreduktion von ca. 25 % die Zugspannungen des 3D-gedruckten Betons verstärkt überschritten wurden. Demnach wurde die Geometrie des rund 637 kg leichteren Tragwerksystems als Grundlage für die weitere Nachbearbeitung gewählt. Anhand der Hauptspannungsvektoren konnte anschließend der Verlauf der Bewehrungskanäle bestimmt werden. Berücksichtigt wurden bei der Modellierung, wie bereits bei den Exponaten aus Arbeitspaket III, die Mindestbetondeckung sowie die Realisierbarkeit der Kanäle hinsichtlich der Erkenntnisse aus den vorangegangenen Untersuchungen. Demnach wurde aufgrund der großen Kanallänge ein Bewehrungsdurchmesser von 3 cm als notwendig angesehen, um in einer realen Produktion die nachträgliche Befreiung des Kanals von trockenen Compound-Partikeln gewährleisten zu können.

Eine Problematik, die mit jedem weiteren Iterationsschritt verstärkt zu beobachten war, ist, dass durch die Software-Fehler infolge der Konvertierung des Facettenkörpers in einen Volumenkörper der Nachbearbeitungsaufwand zunimmt. Folglich steigt die Abweichung zwischen der berechneten Volumen- bzw. Massenreduktion und der tatsächlichen Gewichtsminimierung, da infolge von Ausbesserungsarbeiten in Eckbereichen und Rundungen bei der Form- und Querschnittsoptimierung immer ein paar Prozent hinzuaddiert werden. Im Vergleich zu den kleineren Tragwerksystemen aus Arbeitspaket II und III konnte dies ebenfalls in geringem Maße festgestellt werden, jedoch ergibt sich bedingt durch den wesentlich größeren Probekörper ein gesteigertes Potenzial an Fehlerquellen. Für das nachbearbeitete Modell (Iterationsschritt: -25 %) konnte letztlich eine rund 20 %-ige Massenreduktion erzielt werden, was einer Gewichtsminimierung von über 500 kg für dieses einzige Bauteil entspricht.

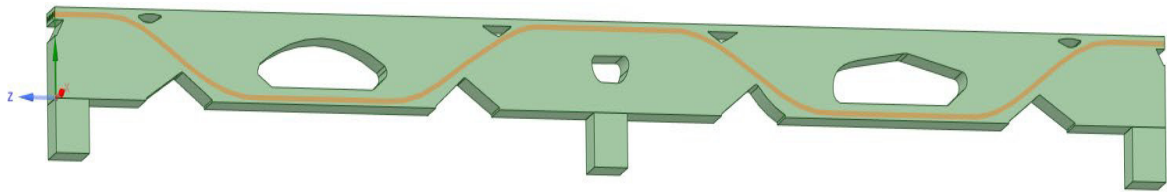


Abbildung 72: Topologieoptimierter Zweifeldträger mit belastungsorientierter Bewehrung und 20 %-iger Massenreduktion im Vergleich zum Vollträger

Die Auswertung der iterativen FEM-Analyse in Abbildung 73 dokumentiert, dass der topologieoptimierte Probekörper mit einer verbliebenen Masse von 80 % auf einem nahezu identischen Niveau der Grenzlast liegt wie der eigentliche Vollträger. Dies bestätigt die Annahme, dass innerhalb des Bauteils einige Bereiche nicht vollständig ausgenutzt werden und somit im Hinblick auf ein ressourcenschonendes Tragwerksystem reduziert werden können. Da dies im konventionellen Herstellungsverfahren nicht in dieser Genauigkeit erfolgen kann, stellt das 3D-Pulverdruckverfahren von Beton eine adäquate Lösung dar.

Eine unerwartete Erkenntnis brachten einige Iterationsschritte zwischen der fünf bis 20 %igen Massereduktion, da die Modelle in der Simulation sogar eine geringfügig höhere Belastung aufnehmen konnten. Dies ist rückblickend potenziell darauf zurückzuführen, dass mit der Massereduktion weniger Eigengewicht abgetragen werden muss und folglich gewisse Kapazitäten im Bauteil für eine zusätzliche Spannungsaufnahme frei werden.

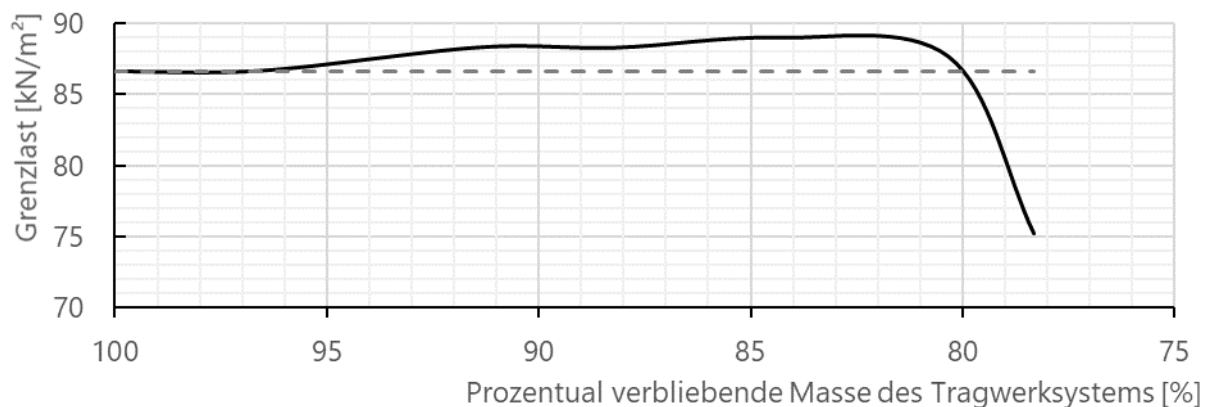


Abbildung 73: Grenzlast des großen Simulationskörpers bei unterschiedlichen Tragwerksystemen

Neben der Massereduktion dieser typischen Tragwerkstruktur besteht noch das Potenzial weitere Bestandteile in einem Gebäude, wie bspw. Säulen oder Wände, in Bezug auf den Ausnutzungsgrad und letztlich für einen geringeren Verbrauch an Ressourcen zu optimieren. Des Weiteren gilt es bei diesem Modell im Vergleich zur Simulation des kleinen Probekörpers aus Arbeitspaket III zu beachten, dass aufgrund der großen Dimensionen des Unterzugs zur Reduzierung des Rechenaufwands für die FEM-Netzgenerierung eine Elementgröße von

25 mm festgelegt und für die Simulation eine linear-elastische Berechnung vorgenommen wurde. Somit bietet dieses Modell noch weitere Kapazitäten, um hinsichtlich einer noch feineren FEM-Netzgenerierung sowie einer Ausreizung der plastischen Systemreserven das Optimum aus dieser Tragwerkstruktur herausholen zu können.

### **3.4.5 Fazit und Ausblick**

Im vorliegenden Forschungsvorhaben wurde eine Möglichkeit der nachträglichen Bewehrung additiv gefertigter Betonkörper im 3D-Pulverdruckverfahren entwickelt. Die formulierten Ziele konnten dabei erfolgreich umgesetzt werden. Im Vorfeld der Untersuchungen wurde eine ausführliche Zusammenstellung der wichtigsten Grundlagen für das Forschungsvorhaben erarbeitet. Dies umfasste bspw. die Abstimmung der Einstellungsparameter des 3D-Pulverdruckers sowie die Entwicklung eines druckfähigen Compounds, der eine Tragfähigkeit von mindestens 15 MPa aufweist.

Des Weiteren musste zur Umsetzung dieses Vorhabens eine Produktionsweise entwickelt werden, die eine nachträgliche Bewehrung in die vordefinierten Zugstränge ermöglicht und zugleich eine Infiltrierung (Infiltration) des Injektionsmaterials in den gesamten Betonkörper verhindert. Hierbei wurde u. a. untersucht, ob der trockene, nicht ausgehärtete Compound im Bewehrungskanal verbleiben und mitverpresst werden kann oder ob der Kanal zunächst komplett freigelegt werden muss, um eine vollständige Injektion in die belastungsorientierten Zugstränge zu gewährleisten. Anhand der durchgeführten Untersuchungen konnte dokumentiert werden, dass im Nachbearbeitungsprozess des 3D-gedruckten Betonkörpers die Freilegung des Bewehrungskanals für eine gezielte Injektion unerlässlich ist.

Wesentlicher Bestandteil einer gezielten Injektion des Reaktionsharzes in die vordefinierten Bewehrungskanäle war im Anschluss an den Druckvorgang die Abdichtung der Betonoberfläche mittels Wasserglas. Durch die Wasserglasnachbehandlung konnte neben einer abriebfesteren Oberflächenstruktur die Abdichtung im Randbereich bzw. die Porositätsminimierung der Probekörper für eine gezielte Injektion der freigelegten Kanäle gewährleistet werden. Ein weiterer positiver Effekt, der sich mit der Lagerung bzw. Nachbehandlung der additiv gefertigten Betonkörper in Wasserglas ergab, ist die chemische sowie physikalische Verfestigung der Betonmatrix. Die Optimierung der Festbetonparameter konnte sowohl in Quecksilberporosimetrieanalysen sowie Druckfestigkeitsprüfungen quantifiziert werden als auch mithilfe von REM- und CT-Aufnahmen identifiziert werden.

Basierend auf der grundlegenden Konzeption der nachträglichen Bewehrung 3D-gedruckter Betonstrukturen erfolgte neben der Bestimmung einer anwendbaren Injektionstechnik zunächst eine messtechnische Untersuchung des zeit- und ortsabhängigen Strukturierungszustandes des Reaktionsharzes. Dies beinhaltete primär die Interaktion zwischen Viskosität, Verarbeitungstemperatur, Topfzeit sowie das Schwindverhalten für die vorherrschenden Umgebungsbedingungen. In Anbetracht der praktischen Untersuchungen

stellte sich heraus, dass die Verarbeitbarkeit des reinen Reaktionsharzes bei einer Raumlufttemperatur von  $20\text{ °C} \pm 2\text{ K}$  während der gesamten Produktion gewährleistet werden konnte. Da die Eigenschaften des reinen Reaktionsharzes nicht zur Tragfähigkeitssteigerung des Gesamtsystems beitragen konnte, wurden zwei weitere Bewehrungsvarianten analysiert. Zum einen wurde das Injektionsmaterial bestehend aus Epoxidharz und diskontinuierlichen Glasfasern untersucht, das sich aufgrund einer zu hohen Viskosität nicht für die nachträgliche Bewehrung 3D-gedruckter Betonstrukturen eignete. Zum anderen wurde ein Verbundwerkstoff aus Epoxidharz zuzüglich kontinuierlicher Carbonfasern verwendet, der sich hinsichtlich der Verarbeitbarkeit und Materialeigenschaften als zielführendes Bewehrungssystem erwies. Dies bestätigte sich sowohl in der numerischen FEM-Simulation als auch in den anschließenden Bauteiluntersuchungen durch die Steigerung des Lastaufnahmevermögens mithilfe des Carbonfaserverbundsystems. In Bezug auf das Schwindverhalten konnten angesichts der Bauteildimensionen nur geringe Verkürzungen an den Injektionseingängen festgestellt werden. Weiterhin ließen sich in den CT-Aufnahmen keine Schäden aufgrund des Schwindverhaltens im jeweiligen Tragwerkssystem identifizieren, sodass in Bezug auf die additive Fertigung von größeren Betonkörpern inklusive einer nachträglichen Bewehrung Potenzial für weitere Untersuchungen gegeben ist.

Für die Produktion der Bewehrungskanäle galt es ebenfalls zu eruieren, welche Kanaldurchmesser zielsicher zu realisieren sind und welche Mindestbetondeckung aus Stabilitäts Gesichtspunkten beim Nachbearbeitungsprozess mit der Druckluftpistole zu berücksichtigen ist. In den unterschiedlichen Bauteilversuchen zeigte sich, dass die Herstellung eines Bewehrungsverlaufs mit einem Durchmesser von mindestens einem Zentimeter konstant gewährleistet werden konnte. Hierbei konnten keine Nachteile in der Produktion belastungsorientierter Bewehrungsverläufe festgestellt werden. Zu beachten galt es hingegen, dass mit der Modellierung des Bewehrungskanals die Luftströmung beim Nachbearbeitungsprozess berücksichtigt wurde, um eine exakte Fertigung des gewünschten Querschnitts zu ermöglichen.

Ein weiterer signifikanter Bestandteil der experimentellen Untersuchung lag neben der Realisierung bzw. Produktion topologieoptimierter Betonstrukturen in der Verifizierung der Berechnungsergebnisse sowie in der anschließenden Adaption der numerischen FEM-Simulation. Anhand der differierenden Tragwerkssysteme konnte nicht nur die Traglaststeigerung einer additiv gefertigten Betonstruktur mit belastungsorientierter Bewehrung im Vergleich zu einem geraden Bewehrungsverlauf dokumentiert werden, sondern auch eine Massereduktion bei nahezu identischem Traglastvermögen realisiert werden. Um das Potenzial topologieoptimierter Betonbauteile zuzüglich einer belastungsorientierten Bewehrung darstellen zu können, wurden die erbrachten Erkenntnisse aus den Kleinbauteilversuchen in einem praxisüblichen FEM-Modell analysiert. Aufgrund der gesteigerten Bauteildimensionen verdeutlichte sich mit der abschließenden Simulation das ressourcentechnische Einsparpotenzial additiv gefertigter Betonelemente im 3D-Pulverdruckverfahren.

Trotz der gewonnenen Erkenntnisse sowie der Realisierung topologieoptimierter Betonelemente mit einer nachträglich injizierten Bewehrung, die dem Lastfluss entsprechend modifiziert werden kann, ergibt sich für die additive Fertigung großformatiger Bauteile im 3D-Pulverdruckverfahren weiterer Forschungsbedarf. Mit der Strukturoptimierung praxisüblicher Bauwerksdimensionen bieten sich neben dem dargestellten Praxisbeispiel eines Unterzugs eine ganzheitliche Optimierung des Bauwerks in weiteren Tragwerkselementen an. Hierdurch könnte in einer abschließenden Bilanz die Attraktivität des 3D-Pulverdruckverfahren gegenüber weiterer Betondruckverfahrensarten gesteigert werden und neben der bereits bekannten detailgetreueren Herstellungsmöglichkeit zusätzlich der ressourcenschonende Mehrwert 3D-gedruckter Betonstrukturen stärker zum Tragen kommen.

## Literaturverzeichnis

- [1] BOSOLD, D.; GRÜNEWALD, A.: Was ist Beton?: Wissenswertes über den Jahrhundertbaustoff. In: InformationsZentrum Beton (2016), Nr. 09
- [2] FROMM, A.: 3-D-Printing zementgebundener Formteile: Grundlagen, Entwicklung und Verwendung. Kassel, Universität Kassel, Architektur, Stadtplanung und Landschaftsplanung. Dissertation. 2014
- [3] BUNDESANSTALT FÜR STRAßENWESEN: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING): Teil 3 Massivbau, Abschnitt 5: Füllen von Rissen und Hohlräumen in Betonbauteile. Köln: FGSV-Verl., 2014
- [4] STEIN, D.; STEIN, R.: Instandhaltung von Kanalisationen. 4. Auflage. Bochum: Stein & Partner Germany, 2014
- [5] BAUMANN, H.: Zement-Merkblatt Betontechnik B26 - Füllen von Rissen. Köln, 2003
- [6] DESOI GMBH: Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton: Abdichtung mit Injektionsverfahren Lösungen auch für schwierige Fälle (2013)
- [7] STEIN, D.; STEIN, R.: EP-Harze (Epoxidharze). URL <https://www.unitracc.de/know-how/fachbuecher/instandhaltung-von-kanalisationen/sanierung/renovierung/beschichtungsverfahren/stoffe-fuer-die-moertelbeschichtung/reaktionsharzmoumlrtel-und-betone/ep-harze-epoxidharze> – Überprüfungsdatum 2019-05-14
- [8] DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (DAfStb) (Hrsg.); Kurt B. (Mitarb.): Verbundverhalten von Klebebewehrung unter Betriebsbedingungen. 1. Aufl. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2009 (Heft 575)
- [9] DIN V 18028:2006-06 Rissfüllstoffe nach DIN EN 1504-5:2005-03 mit besonderen Eigenschaften
- [10] DIN EN 1504-5:2005-03 Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Definitionen, Anforderungen, Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität – Teil 5: Injektion von Betonbauteilen
- [11] DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (DAfStb) (Hrsg.): Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen: Instandsetzungs-Richtlinie:2001-10 RL SIB:2001-10. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2001
- [12] RUFFERT, G.: Instandhaltung von Industrie- und Verwaltungsbauten aus Beton. Düsseldorf: Beton-Verlag, 1986

- [13] GRUBE, H.; KERN, E.; QUITMANN, H. D.: Instandhaltung von Betonbauwerken. 1990
- [14] DIN EN ISO 3521:1999-10 Kunststoffe - Ungesättigte Polyester und Epoxidharze
- [15] SHIMBO, M.; OCHI, M.; SHIGETA, Y.: Shrinkage and internal stress during curing of epoxide resins. In: Journal of Applied Polymer Science 26 (1981), Nr. 7, S. 2265–2277
- [16] HOLST, M.: Reaktionsschwindung von Epoxidharz-Systemen. Darmstadt, Technischen Universität Darmstadt. Dissertation. 2001
- [17] ROTH, E.: Schwindung von ungesättigten Polyesterharzen. Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Dissertation. 1977
- [18] BRADY, R. F.: Volume Change in the Polymerization of Spirocyclic Monomers: Causes, Effects, and Applications. In: Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews 32 (1992), Nr. 2, S. 135–181
- [19] ANSYS® ACADEMIC RESEARCH MECHANICAL: ANSYS Discovery SpaceClaim, Version 2019 R1
- [20] VDI 3405:2014-12. Additive Fertigungsverfahren Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen
- [21] GREGORY, P.: High-technology applications of organic colorants: Springer Science & Business Media, 2012
- [22] NYMAN, D.; BREIT, W.: 3D-PowderPrinting - Next Level. In: CPT Worldwide - Construction Printing Technology (2020), Nr. 03, S. 14–22
- [23] VAEZI, M.; CHUA, C. K.: Effects of layer thickness and binder saturation level parameters on 3D printing process. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 53 (2011), 1-4, S. 275–284
- [24] POLZIN, H.: Anorganische Binder: Zur Form- und Kernherstellung in der Gießerei. 1. Aufl. s.l. : Fachverlag Schiele Schön, 2013
- [25] DIN EN 196-1:2016-11 Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit
- [26] WEBAC-CHEMIE GMBH: EP Injektionsharze : Epoxidharz – Kraftschlüssige Verbindungen mit den Injektionsharzen von WEBAC. URL <https://www.webac.de/loesungen/classic-line/ep-injektionsharze/> – Überprüfungsdatum 2019-05-14
- [27] NYMAN, D.; BREIT, W.: Entwicklung eines zementgebundenen Werkstoffs zum 3D-Drucken von Beton im Pulverdruckverfahren. In: 4. Grazer Betonkolloquium (2018), S. 177–184

- [28] DIN EN 12390-2:2009-08 Prüfung von Festbeton – Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen
- [29] SMARSLIK, M.; KÄMPER, C.; FORMAN, P.; STALLMANN, T.; MARK P.; SCHNELL, J.: Topologische Optimierung von Betonstrukturen. In: Festschrift zu Ehren von Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach. Dresden, 2016
- [30] SCHUMACHER, A.: Optimierung mechanischer Strukturen: Grundlagen und industrielle Anwendungen. 2., aktual. u. erg. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013
- [31] HARZHEIM, L.: Strukturoptimierung: Grundlagen und Anwendungen. 1. Aufl. Frankfurt am Main: Deutsch, 2008
- [32] OTTNAD, J.: Topologieoptimierung von Bauteilen in dynamischen und geregelten Systemen. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Maschinenbau. Dissertation
- [33] LIPKA, A.: Verbesselter Materialeinsatz innovativer Werkstoffe durch die Topologieoptimierung. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss, 2007 (Bericht / Institut für Baustatik der Universität Stuttgart 47)
- [34] HERRMANN, M.; SOBEK, W.: Gradientenbeton - Numerische Entwurfsmethoden und experimentelle Untersuchung gewichtsoptimierter Bauteile. In: Beton- und Stahlbetonbau 110 (2015), Nr. 10, S. 672–686
- [35] SCHEERER, S. (Hrsg.); VAN STIPRIAAN, U. (Hrsg.): Festschrift zu Ehren von Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach, 2016
- [36] BOSOLD, D.; BECK, M.: Zement-Merkblatt Betontechnik B13 - Leichtbeton. Erkrath, 2014
- [37] KÜCHLIN, D.; HERSEL, O.; BACHMANN, R. (Mitarb.); RIFFEL, S. (Mitarb.); BOOS, P. (Mitarb.); DIETERMANN, M. (Mitarb.); LÖSCHNIG, P. (Mitarb.) : Betontechnische Daten. Leimen: HeidelbergCement AG, 2017
- [38] DIN EN 1992-1-1:2011-01 Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau
- [39] LIAPOR GMBH & CO. KG (Hrsg.): Liapor-Leichtbeton: Für Hoch-, Ingenieur- und Brückenbau. 2009
- [40] THIENEL, C.: Materialtechnologische Eigenschaften der Leichtbetone aus Blähton. 1996
- [41] DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (DAfStb) (Hrsg.); ZILCH, K. (Mitarb.); ROOS, F. (Mitarb.): Betonkennwerte für die Bemessung und das Verbundverhalten von Beton mit rezykliertem Zuschlag. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2000 (Heft 507)

- [42] FAUST, T.: Leichtbeton im Konstruktiven Ingenieurbau. Berlin: Ernst & Sohn, 2003 (Bauingenieur-Praxis)
- [43] HOFMANN, P.; KRIEGER-HAUWEDE, M.: Einführung in die Festkörperphysik. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013 (Lehrbuch Physik)
- [44] DIN EN 206-1:2001-07 Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- [45] DEUTSCHE BAUCHEMIE E.V.: Epoxidharze in der Bauwirtschaft und Umwelt: Sachstandsbericht. 2. Ausg., Januar 2009. Frankfurt am Main: Deutsche Bauchemie e.V., 2009
- [46] KAISER, H.: Bewehren von Stahlbeton mit kohlenstoffaserverstärkten Epoxidharzen. Zürich, ETH Zürich. Dissertation. 1989
- [47] NIEDERMEIER, R.; ZILCH, K.: Massivbau in ganzer Breite : Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof.Dr.-Ing. Konrad Zilch ; [Schriftfassungen der Vorträge zum Jubiläums-Seminar, das am 15. Oktober 2004 an der Technischen Universität München stattfindet]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005
- [48] JOHN P. KUMMER GMBH: Verstehen von mechanischen Eigenschaften von Epoxid-Kleber für die Modellierung, Finite-Elemente-Analyse (FEA) - JPK (2019), Tech Tip 19
- [49] SCHWARZWÄLDER TEXTIL-WERKE HEINRICH KAUTZMANN GMBH: Diskontinuierliche Glasfasern. URL <https://stw-faser.de/de/produkte/kurzschnitte/> – Überprüfungsdatum 2021-03-25
- [50] CARBON-WERKE WEIßGERBER GMBH & CO KG: Carbonschlauch. URL <https://www.carbon-werke.com/carbon-fasern/> – Überprüfungsdatum 2021-03-25
- [51] COX, H. L.: The elasticity and strength of paper and other fibrous materials. In: British journal of applied physics (1952), Nr. 3, S. 72–79
- [52] BONNET, M.: Kunststofftechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016
- [53] STELZER, G.: Zum Faser- und Eigenschaftsabbau bei Verarbeitung und Recycling diskontinuierlich faserverstärkter Kunststoffe: Anwendung des Mikrobiegeversuchs zur Faserfestigkeitsbestimmung am Beispiel methodischer Untersuchungen des Eigenschaftsabbaus. Kaiserslautern, Technische Universität Kaiserslautern. Dissertation. 2002
- [54] ROMBACH, G.: Anwendung der Finite-Elemente-Methode im Betonbau: Fehlerquellen und ihre Vermeidung. 2. Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 2006 (Bauingenieur-Praxis)

- 
- [55] RILEM TC: RC 6 Bond test for reinforcement steel. 2. Pull-out test, 1983. RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials: E & FN SPON, 1994
- [56] HARTWICH, K.: Zum Riss-und Verformungsverhalten von stahlfaserverstärkten Stahlbetonstäben unter Längszug. Braunschweig, Technische Universität Braunschweig. Dissertation. 1986
- [57] NYMAN, D.; BREIT, W.: Architektonische Freiheit im Detail: Betondrucken. In: BFT INTERNATIONAL (2019), Vol. 2, S. 57

## Abbildungsverzeichnis

|               |                                                                                                                                                                         |    |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1:  | v.l.n.r. Viskosität von Epoxidharz, Polyurethanharz und Polyurethanharz (SPUR) bei 20 °C [13] .....                                                                     | 16 |
| Abbildung 2:  | Schematische Darstellung der Dichteänderungen eines Epoxidharz-Systems während des Aufheizens, der Härtung und des Abkühlens (vgl. [15]). .....                         | 18 |
| Abbildung 3:  | Material- und verarbeitungsspezifische Einflussgrößen auf die Reaktionsschwindung [17] .....                                                                            | 19 |
| Abbildung 4:  | Modellierter Verzweigungskörper – SpaceClaim von ANSYS® [19] .....                                                                                                      | 20 |
| Abbildung 5:  | Ablaufschema des 3D-Druckprozesses .....                                                                                                                                | 21 |
| Abbildung 6:  | Erzeugen eines gleichmäßigen, homogenen Untergrunds im „Build“-Behälter .....                                                                                           | 21 |
| Abbildung 7:  | Schematische Darstellung des Druckprozesses [22] .....                                                                                                                  | 23 |
| Abbildung 8:  | v.l.n.r. schrittweiser Nachbearbeitungsprozess .....                                                                                                                    | 24 |
| Abbildung 9:  | REM-Analyse: .....                                                                                                                                                      | 25 |
| Abbildung 10: | Verzweigungskörper mit freigeblasenen Bewehrungskanälen .....                                                                                                           | 26 |
| Abbildung 11: | Verzweigungskörper mit freigeblasenen Bewehrungskanälen eingefasst in der vorgefertigten Injektionsapparatur .....                                                      | 26 |
| Abbildung 12: | Mit Wasserglas nachbehandelter Probekörper zzgl. freigeblasener Bewehrungskanäle eingefasst in der vorgefertigten Injektionsapparatur und mit Silikon abgedichtet ..... | 27 |
| Abbildung 13: | Mit Wasserglas nachbehandelter Probekörper zzgl. eines nachträglich injizierten Bewehrungsharzes .....                                                                  | 27 |
| Abbildung 14: | Computertomografisch Analyse eines verpressten Verzweigungskörpers (Drehung um die z-Achse) .....                                                                       | 28 |
| Abbildung 15: | Fragile Struktur bei zu geringen Wandstärken .....                                                                                                                      | 30 |
| Abbildung 16: | Modellierte Probekörper zur Untersuchung des Ausblutungsgrades bzw. des Absorptionsgrades der angrenzenden Partikel .....                                               | 31 |
| Abbildung 17: | Druckaufträge der unterschiedlichen Shell/Core-Einstellungen (v.l.n.r. 110/220, 130/260, 150/300) .....                                                                 | 31 |
| Abbildung 18: | Lagerung 3D-gedruckter Betonkörper mit innenliegendem Trockencompound in Wasserglas .....                                                                               | 33 |

|                                                                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 19: Strukturierungszustand 3D-gedruckter Probekörper infolge der Nachbehandlung im Klimaschrank.....                                                                                                     | 35 |
| Abbildung 20: Exemplarische Injektion eines geschnittenen Probekörper mit innenliegendem Trockenmörtel.....                                                                                                        | 37 |
| Abbildung 21: Aufgeschnittener Probekörper vor und nach der Injektion.....                                                                                                                                         | 37 |
| Abbildung 22: Exemplarischer Injektions-vorgang eines 3D-gedruckten Prismenkörpers ohne innenliegendem Trocken-compound im Bewehrungs-strang und einer Nachbe-handlung in Wasserglas bei 20 °C.....                | 39 |
| Abbildung 23: Exemplarischer Injektions-vorgang eines 3D-gedruckten Prismenkörpers mit innen-liegendem Trocken-compound im Bewehrungs-strang und einer Nachbe-handlung im Klimaschrank bei 20 °C und 85 % r.F..... | 39 |
| Abbildung 24: Computertomografische Analyse 3D-gedruckter Probekörper:.....                                                                                                                                        | 40 |
| Abbildung 25: Probekörper ohne Trockencompound im Kanal zzgl. einer nachträglichen Injektion.....                                                                                                                  | 41 |
| Abbildung 26: Dichteverteilung in einer Betondecke als Entwurfsergebnis einer Strukturoptimierung [34].....                                                                                                        | 43 |
| Abbildung 27: Verhältnis vom w/z-Wert zur Druckfestigkeit.....                                                                                                                                                     | 44 |
| Abbildung 28: Verhältnis von Grob- bzw. Feinkörnigkeit zur Druckfestigkeit.....                                                                                                                                    | 44 |
| Abbildung 29: Untersuchung der Isotropie 3D-gedruckter Betonkörper.....                                                                                                                                            | 45 |
| Abbildung 30: Verhältnis von Porosität zur Druckfestigkeit.....                                                                                                                                                    | 45 |
| Abbildung 31: Verwendete Verstärkungsmaterialien: diskontinuierliche Glasfasern (links) [49] und Carbonschlauch (rechts) [50].....                                                                                 | 51 |
| Abbildung 32: Spannungszustände eines unidirektionalen Faser/Matrix-Verbundes und der Einzelkomponenten [52] .....                                                                                                 | 52 |
| Abbildung 33: Simulation des 3-Punktbiegezugversuchaufbaus inkl. Vernetzung der Startgeometrie.....                                                                                                                | 55 |
| Abbildung 34: Darstellung der maximalen Hauptspannungen eines exemplarischen 3-Punkt-Biegezugversuchs.....                                                                                                         | 56 |
| Abbildung 35: Darstellung der Hauptspannungsvektoren eines exemplarischen 3-Punkt-Biegezugversuchs .....                                                                                                           | 56 |
| Abbildung 36: Gegenüberstellung der topologieoptimierten Struktur und der Ausgangsgeometrie in ANSYS® .....                                                                                                        | 56 |

|                                                                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 37: Modellierte Bauteilgeometrie eines topologieoptimierten Probekörpers mit innenliegender Epoxidharzbewehrung in ANSYS® .....        | 56 |
| Abbildung 38: Schematischer Versuchsaufbau.....                                                                                                  | 59 |
| Abbildung 39: Statisches System des Versuchsaufbaus.....                                                                                         | 59 |
| Abbildung 40: Biegemomentenverlauf des Versuchsaufbaus.....                                                                                      | 59 |
| Abbildung 41: Ausgangsobjekt für spätere Optimierungen: Vollträger .....                                                                         | 60 |
| Abbildung 42: Hauptspannungsverteilung in der Seitenansicht.....                                                                                 | 61 |
| Abbildung 43: Hauptspannungsverteilung in der Draufsicht.....                                                                                    | 61 |
| Abbildung 44: Ergebnis der 5 %-igen Massenreduktion in der Seitenansicht (x-Richtung: links und z-Richtung: rechts).....                         | 62 |
| Abbildung 45: Ergebnis der 90 %-igen Massenreduktion in der Seitenansicht (x-Richtung: links und z-Richtung: rechts).....                        | 62 |
| Abbildung 46: Grenzlaster des kleinen Simulationskörpers bei unterschiedlichen Tragwerksystemen.....                                             | 62 |
| Abbildung 47: Bestimmung des Bewehrungsverlaufs anhand der Hauptspannungsvektoren beim topologieoptimierten Tragwerkssystem .....                | 63 |
| Abbildung 48: Aufnahme eines Druckauftrags während dem Herstellungsprozess eines Probekörpers mit belastungsorientierter Bewehrungsführung ..... | 66 |
| Abbildung 49: Detailausschnitt aus Abbildung 48 .....                                                                                            | 66 |
| Abbildung 50: Ausblasen des Kanals durch Einführen des Druckluftschlauchs .....                                                                  | 66 |
| Abbildung 51: Exemplarische CT-Aufnahmen bewehrter Betonkörper.....                                                                              | 67 |
| Abbildung 52: Gegenüberstellung der Grenzlaster.....                                                                                             | 72 |
| Abbildung 53: Durchschnittliches Gewicht der unterschiedlichen Tragwerksvarianten.....                                                           | 74 |
| Abbildung 54: Auftrennung vom 3D-gedruckten Beton und Bewehrungsmaterial .....                                                                   | 74 |
| Abbildung 55: Versuchskörper für Ausziehversuche in Anlehnung an RILEM RC6 [55].....                                                             | 75 |
| Abbildung 56: Modell 1: Angelehnt an den klassischen RILEM Versuchskörper.....                                                                   | 77 |
| Abbildung 57: Spannungsverteilung im Betonkörper für Modell 1.....                                                                               | 77 |
| Abbildung 58: Modell 2: Verstärkung innerhalb der Verbundzone.....                                                                               | 78 |
| Abbildung 59: Spannungsverteilung im Betonkörper für Modell 3.....                                                                               | 79 |
| Abbildung 60: Modell 3: Angelehnt an den Aufbau eines Spreizdübels .....                                                                         | 79 |
| Abbildung 61: Spannungsverteilung im Betonkörper für Modell 3.....                                                                               | 80 |

|                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 62: Druckauftrag bei idealem Feuchtigkeitseintrag (links) und bei zu hohem Bindemittelflüssigkeitsauftrag (rechts) .....                    | 80 |
| Abbildung 63: Exemplarische Aufnahme eines Probekörpers in der CT-Anlage.....                                                                         | 81 |
| Abbildung 64: CT-Aufnahme eines Probekörpers mit gerader Bewehrungsführung .....                                                                      | 82 |
| Abbildung 65: CT-Aufnahme eines Probekörpers mit verstärktem Bewehrungsquerschnitt .....                                                              | 83 |
| Abbildung 66: CT-Aufnahme eines Probekörpers mit Widerhaken.....                                                                                      | 83 |
| Abbildung 67: Ansicht der Bruchkanten unter dem Mikroskop.....                                                                                        | 85 |
| Abbildung 68: Ausgangssituation des praxistypischen Simulationsmodells.....                                                                           | 87 |
| Abbildung 69: Statisches System und Momentenverlauf des 2-Feldträgers.....                                                                            | 87 |
| Abbildung 70: Ergebnis der 5 %-igen Massenreduktion in der Seitenansicht .....                                                                        | 87 |
| Abbildung 71: Ergebnis der 90 %-igen Massenreduktion in der Seitenansicht.....                                                                        | 88 |
| Abbildung 72: Topologieoptimierter Zweifeldträger mit belastungsorientierter Bewehrung und 20 %-iger Massenreduktion im Vergleich zum Vollträger..... | 89 |
| Abbildung 73: Grenzlast des großen Simulationskörpers bei unterschiedlichen Tragwerksystemen.....                                                     | 89 |

## Tabellenverzeichnis

|             |                                                                          |    |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 1:  | 3D-Pulverdrucker Einstellungen.....                                      | 22 |
| Tabelle 2:  | In ANSYS® definierte Materialeigenschaften des 3D-gedruckten Betons..... | 48 |
| Tabelle 3:  | Vergleich der Materialparameter.....                                     | 49 |
| Tabelle 4:  | In ANSYS® definierte Materialeigenschaften des Epoxidharzes.....         | 50 |
| Tabelle 5:  | Materialeigenschaften der Glasfasern und Carbonschläuche .....           | 51 |
| Tabelle 6:  | Vergleich der Massen bei gleichbleibender Belastung .....                | 57 |
| Tabelle 7:  | Unterschiedliche FEM-Simulationsvarianten.....                           | 64 |
| Tabelle 8:  | Vergleich der maximalen Auflast anhand der FEM-Simulation .....          | 65 |
| Tabelle 9:  | Exemplarische Bruchzustände unterschiedlicher Tragwerksysteme .....      | 69 |
| Tabelle 10: | Vergleich der maximalen Auflast anhand der realen Prüfungen.....         | 72 |
| Tabelle 11: | Durchschnittliche Ergebnisse der Pull-Out-Versuche.....                  | 86 |