

BBSR-
Online-Publikation
55/2023

ConSPrint

Kontinuierliches Beton-3D-Drucken von Überhangstrukturen mittels wiederverwendbarer Stützmaterialien

von

Prof. Viktor Mechtcherine
Slava Markin
Dr. Christof Schröfl
Paul Blankenstein
Johannes Kohl
Ronny Lang



ConSPrint

Kontinuierliches Beton-3D-Drucken von Überhangstrukturen mittels
wiederverwendbarer Stützmaterialien

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: 10.08.18.7-18.53

Projektlaufzeit: 03.2019 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 und Innovation im Bauwesen“
Dr.-Ing. Arnd Rose
arnd.rose@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

Technische Universität Dresden, Institut für Baustoffe
Prof. Viktor Mechtcherine (Projektleitung)
viktor.mechtcherine@tu-dresden.de

Technische Universität Dresden, Institut für Baustoffe
Slava Markin
slava.markin@tu-dresden.de

Technische Universität Dresden, Institut für Baustoffe
Dr. Christof Schröfl
christof.schroefl@tu-dresden.de

Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH
Paul Blankenstein
Johannes Kohl
Ronny Lang
ronny.lang@ihd-dresden.de

Redaktion

Technische Universität Dresden, Institut für Baustoffe
Christof Schröfl

Stand

März 2022

Gestaltung

Technische Universität Dresden, Institut für Baustoffe
Christof Schröfl

Bildnachweis

Titelbild: Markus Peter Taubert (Technische Universität Dresden, Institut für Baustoffe)
Alle weiteren Abbildungen: Technische Universität Dresden, Institut für Baustoffe, und Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH

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

Mechtcherine, Viktor; Markin, Slava; Schröfl, Christof; Blankenstein, Paul; Kohl, Johannes; Lang, Ronny, 2023: ConSPrint: Kontinuierliches Beton-3D-Drucken von Überhangstrukturen mittels wiederverwendbarer Stützmaterialien. BBSR-Online-Publikation 55/2023, Bonn.

Inhalt

<u>Kurzfassung</u>	6
<u>Abstract</u>	6
<u>1 Einleitung</u>	7
1.1 <u>Ausgangssituation</u>	7
1.2 <u>Zielstellung</u>	7
<u>2 Anforderungsspezifikation</u>	8
2.1 <u>Bestimmung des Anforderungsprofils für den Aufbauprozess des Stützmaterials</u>	8
2.1.1 <u>Einsatzgebiete für das Stützmaterial</u>	8
2.1.2 <u>Ermittlung der Lasteinwirkungen</u>	12
2.2 <u>Bestimmung des Anforderungsprofils an die Anlagentechnik zum kontinuierlichen Drucken von Beton und Stützmaterial</u>	15
2.3 <u>Bestimmung des Anforderungsprofils für die Entfernung und Wiederverwendbarkeit des Stützmaterials</u>	20
<u>3 Stoffliche Optimierung des Stützmaterials und Untersuchung konstruktiver Aufbauvarianten</u>	23
3.1 <u>Anpassung der Rezeptur an die Fördertechnologie</u>	23
3.1.1 <u>Referenzrezeptur</u>	24
3.1.2 <u>Stoffliche Optimierung</u>	26
3.2 <u>Untersuchung zur Austragbarkeit des Stützmaterials bei verschiedenen Düsengeometrien</u>	35
3.3 <u>Untersuchung des Quell- und Schwindverhaltens sowie der Oberflächenbeschaffenheit des Stützmaterials während des Konsolidierungsvorgangs</u>	38
3.4 <u>Untersuchung der Lagerfähigkeit des Stützmaterials</u>	41
3.4.1 <u>Stützmaterial mit Zugabe von Stärke</u>	41
3.4.2 <u>Stützmaterial mit Zugabe von Calciumsulfat</u>	42
3.5 <u>Untersuchung des Zusammenhangs zwischen verschiedenen konstruktiven Stützmaterialgestaltungen, den erreichbaren Festigkeiten und dem Konsolidierungsverhalten</u>	45
<u>4 Prozess- und Anlagenentwicklung für kontinuierliches Betondrucken mit Stützmaterial</u>	49
4.1 <u>Entwicklung und Aufbau einer Fördereinheit für das Stützmaterial, integriert in einen Betondruckprozess</u>	49
4.1.1 <u>Kolbenextruder</u>	51
4.1.2 <u>Schnecken- und Exzentrerschneckenextruder</u>	53
4.2 <u>Entwicklung und Aufbau einer Austrageinheit mit angepasster Düsengeometrie für das Stützmaterial, integriert in einen Betondruckprozess</u>	57
4.3 <u>Entwicklung und Aufbau einer Konsolidierungseinheit zur Verfestigung des ausgetragenen Stützmaterials, integriert in einen Betondruckprozess</u>	59

<u>5</u>	<u>Untersuchungen zu Entfernbarkeit und Wiederverwendbarkeit des Stützmaterials</u>	65
	
5.1	<u>Untersuchung der mechanischen Entfernbarkeit des Stützmaterials</u>	65
5.2	<u>Untersuchung der Lösbarkeit im Grenzflächenbereich zwischen Beton und Stützmaterial</u>	67
5.3	<u>Untersuchung der Wiederverwendbarkeit des Stützmaterials</u>	70
	5.3.1 <u>Herangehensweise und Ablauf der Experimente</u>	70
	5.3.2 <u>Experimentelle Ergebnisse</u>	71
<u>6</u>	<u>Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zur Prozess- und Materialgestaltung</u>	74
6.1	<u>Wirtschaftlichkeitsuntersuchung zu Prozesszeiten, -energien und -kosten</u>	74
	6.1.1 <u>Herangehensweise und Methodik</u>	74
	6.1.2 <u>Bewertung der Ergebnisse</u>	77
6.2	<u>Wirtschaftlichkeitsuntersuchung zu Materialkosten unter Berücksichtigung der Wiederverwendbarkeit</u>	79
	6.2.1 <u>Herangehensweise und Methodik</u>	79
	6.2.2 <u>Analyse der Einflussfaktoren</u>	80
	6.2.3 <u>Kalkulation der Prozess- und Materialkosten</u>	85
	6.2.4 <u>Bewertung der Prozess- und Materialkosten</u>	88
6.3	<u>Gesamtwirtschaftlichkeitsbetrachtung der Herstellung von Fenster- und Türstrukturen</u>	89
<u>7</u>	<u>Prozesstest im Labormaßstab und Aufbau von Demonstratorstrukturen</u>	90
7.1	<u>Herstellung von gestützten Betondruckteilen im Labormaßstab</u>	90
7.2	<u>Prüfung der Entfernbarkeit des Stützmaterials im Labormaßstab</u>	93
7.3	<u>Prüfung der Bauteileigenschaften und Charakterisierung der Mikrostruktur der gedruckten Betonbauteile, insbesondere in den Grenzbereichen zum entfernten Stützmaterial</u>	95
7.4	<u>Herstellung einer Demonstratorstruktur</u>	97
<u>8</u>	<u>Zusammenfassung und Ausblick</u>	99
<u>9</u>	<u>Literaturverzeichnis</u>	100
<u>10</u>	<u>Abbildungsverzeichnis</u>	105
<u>11</u>	<u>Tabellenverzeichnis</u>	109
<u>12</u>	<u>Anhang</u>	105
	<u>A.1 Klimadiagramm Bewitterungsdauer</u>	112
	<u>A.2 Untersuchte Rezepturen</u>	113
	<u>A.3 Aufgenommene Messdaten</u>	114
	<u>A.4 Mengenermittlung</u>	118

Kurzfassung

Im Vorhaben sollten die prozess- und anlagentechnischen Voraussetzungen für die Generierung stark geneigter, auskragender bzw. horizontal freitragender Bauteilstrukturen in einem kontinuierlichen, extrusionsbasierten Beton-3D-Druckverfahren geschaffen werden. Der Lösungsweg beinhaltete die Nutzung von Stützmaterialien, wie es bei anderen extrusionsbasierten Drucktechnologien möglich ist, da rein mit Beton derartige Geometrien nicht in 3D-Druckverfahren darstellbar sind. An das Stützmaterial werden hohe Anforderungen gestellt: förder- und austragbar, schnell erhärtend, formstabil, Aufnahme der Drucklasten, kostengünstig, umweltfreundlich, wiederverwendbar und lagerfähig.

Im Projekt BioConSupport (gefördert durch Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., FKZ 22010917) waren vielversprechende Stützmaterialien auf Basis des natürlichen Bindemittels Stärke entwickelt worden. Holzpartikel dienten als Füllstoffe und zur Unterstützung von Austragbarkeit, Formstabilität und Festigkeit. Ziel und Zweck des nunmehr vorliegenden Projekts ConSPrint war, derartige Holz-Stärke-Komposite in den Beton-3D-Druckprozess zu integrieren. Ein gemeinsamer Prozess mit aufeinander abgestimmter Anlagentechnik für Beton- und Stützmaterial-3D-Druck im Labormaßstab sollte geschaffen werden. Die Materialzusammensetzungen wurden hinsichtlich Fördertechnik, Lagerfähigkeit, Entfernbarkeit und Wiederverwendbarkeit weiterentwickelt. Konstruktive Aufbaumöglichkeiten wurden eingehend untersucht, um das Material für die industrielle Anwendung nutzbar zu machen. Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen flankierten das Vorhaben.

Abstract

This project aims to create the prerequisites for integration of a support material in a continuous, extrusion-based 3D concrete printing process. The use of such support material will allow the generation of strongly inclined, cantilevered and even horizontally self-supporting structures. Such geometries cannot be produced by means of 3D printing purely with concrete nowadays. The support material should fulfil the following requirements: easily conveyable and removable, quick structural build-up and form stability, sufficiently high load bearing capacity, low cost, environmentally friendly, reusable as well as storable.

In the project BioConSupport (funded by Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., FKZ 22010917), promising support materials based on starch as a natural binder were developed. Wood particles were used as a filler. Application of the wood particles contributed to the dimensional stability and load bearing capacity of the support material. The main purpose of the project ConSPrint is integration of such wood starch composites into the continuous 3D concrete printing process. The continuous 3D concrete printing must be synchronized with the production of the support structures. Material compositions of the support material were thus adjusted with respect to extrusion technique, determined shelf life as well as requirements on removability and reusability. To facilitate the industrial applicability of the support material were production techniques of the support structures analyzed. Economic and environmental considerations accompanied the project.

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

3D-Druck zementbasierter Baustoffe wird seit einigen Jahren intensiv erforscht, sowohl aus material- als auch prozesstechnologischer Sicht. Jedoch existieren keine wirtschaftlich praktikablen Lösungen für Überhangstrukturen.

Konzepte für Stützmaterialien existieren bislang kaum, sind jedoch für baustellenpraktikable Technologien unabdingbar, um auskragende und Überhangstrukturen bzw. Fenster- und Türöffnungen ohne Einlegen eines vorgefertigten Sturzes zu realisieren. Einen Lösungsansatz stellt ein biobasiertes Stützmaterial auf Basis von Holzpartikelverbänden dar. Bisherige Untersuchungen zu Holz-Stärke-basierten Stützmaterialrezepturen hatten vielversprechende Ergebnisse gezeigt. Nun galt es, diese Komposite für die Entwicklung eines kontinuierlichen, kombinierten Beton-/Stützmaterial-3D-Druck zu adaptieren und derartige Prozessabläufe zu etablieren. Das vorliegende Projekt führte dazu das Beton-3D-Druckprojekt ConPrint3D® und das Stützmaterialprojekt BioConSupport zusammen. Hierzu waren folgende Aspekte zu bearbeiten, die jeweils und zusammen einen hohen experimentellen und personellen Forschungsaufwand erforderten:

- Verknüpfung der beiden Prozesse der Stützmaterial- und Betonherstellung,
- Verknüpfung der Anlagentechnik beider Prozesse zum integral kombinierten 3D-Druck der beiden Materialien,
- experimentelle Untersuchungen zur Mehrfachnutzung des Stützmaterials inklusive
- wirtschaftliche Bewertung.

Die strukturelle Einbeziehung von Wirtschaftsunternehmen sollte rasche Praxisumsetzung ermöglichen, so dass deutsche Entwicklungen im Beton-3D-Druck einen technologischen Vorsprung erzielen.

Das vorliegende Projekt lässt sich folglich in das Fernziel des kontinuierlichen, schalungsfreien Betondrucks mit Stützmaterial im baustellenpraktikablen Anwendermaßstab einordnen.

1.2 Zielstellung

Zielstellungen des vorliegenden Projekts waren:

- Abstimmung der Prozessanforderungen zum kontinuierlichen 3D Druck von Beton mit Einsatz des Stützmaterials,
- Aufbau und Betrieb von Anlagentechnik im Labormaßstab zur Verknüpfung beider Prozesse,
- Anpassung der Stützmaterialzusammensetzung an die verfügbare und praktikable anlagentechnische Lager-, Förder-, Austrags- und Konsolidierungstechnologien,
- Untersuchung verschiedener konstruktiver Aufbauvarianten des Stützmaterials zur Prozessoptimierung und Materialersparnis,

- Entwicklung und Prüfung eines Konzeptes zu baustellenpraktikabler Entfernung, Aufbereitung und Wiederverwendung des Stützmaterials,
- Herstellung der Stützstrukturen im Labormaßstab,
- Bewertung der Wirtschaftlichkeit.

2 Anforderungsspezifikation

2.1 Bestimmung des Anforderungsprofils für den Aufbauprozess des Stützmaterials

Die Integration des Stützmaterials in den 3D-Druck mit Beton ist mit neuen Herausforderungen verbunden. Zunächst müssen die Anforderungen an das Stützmaterial in Zusammenhang mit den für den 3D-Druck üblichen prozessspezifischen Parametern festgelegt werden. Die prozessspezifischen Parameter, in welchen sich der 3D-Druck mit Beton von anderen additiven Fertigungsverfahren unterscheidet, sind in [1, 2] zusammengefasst. Ebenso bedarf es Überlegungen, welche Anforderungen durch das Integrieren des Stützmaterials an die digitalen Prozessketten der Steuerungs- und Entwurfssoftware gestellt werden müssen.

Um die Anforderungen an das Stützmaterial ganzheitlich zu spezifizieren, müssen folgende Sachverhalte betrachtet werden:

- Einsatzgebiete für das Stützmaterial / Notwendigkeit des Stützmaterials
- Betrachtung der Druckstrategie und Ausführungszeiten
- Ermittlung der Lasteinwirkungen

2.1.1 Einsatzgebiete für das Stützmaterial

Durch die digital gestützte Entwurfs- und Ausführungsplanung in Verbindung mit der 3D-Drucktechnologie von Beton konnten zuvor unbewältigte Hürden im Betonbau überwunden werden. Vor allem durch den Wegfall der Schalung können die Baukosten drastisch reduziert werden. Durch die Eliminierung der Schalung entstehen aber zahlreiche Herausforderungen an den Beton, vor allem in seinem Frischzustand. Die wesentlichen Herausforderungen durch den Wegfall der Schalung sind:

1. Die Betonfilamente müssen nach dem Ausgang aus der Düse durch die Düsenöffnung die vorgegebene Form beibehalten. Diese Eigenschaft wird als Druckbarkeit bezeichnet.
2. Die extrudierten Betonfilamente müssen den entstehenden Lasten aus den jeweils oberen Schichten ohne sichtbare Einbuße in Stabilität und Formkonformität standhalten.
3. Durch ein größeres Volumen-zu-Fläche-Verhältnis des Bauteils, welches der Austrocknung ausgesetzt ist, entsteht die Gefahr der Rissbildung innerhalb der ersten Stunden nach der Extrusion im Beton.
4. Die Ausführung von Überhangsstrukturen oder stark auskragenden Strukturformen bedarf einer Stützkonstruktion.

Die Herausforderungen aus den Punkten 1 bis 3 bei der 3D-Drucktechnologie von Beton und die notwendigen Materialeigenschaften wurden bereits erkannt. Zahlreiche Forschungsgruppen arbeiten an der Bewerkstelligung von notwendigen Betoneigenschaften. Allerdings wurden bisher zu Punkt 4 nur wenig zielführende Lösungen zur Herstellung von Überhangsstrukturen hervorgebracht. Wie aus *Abbildung 1* hervorgeht, wurde bei existierenden 3D-gedruckten Betonhäusern manuell ein Holzsturz oder ein anderes Einbauelement zum Abfangen der Lasten eingesetzt. Diese technische Lösung ermöglicht zwar die Lastverteilung der Filamente oberhalb eines solchen Sturzes, steht aber im Widerspruch zum Grundgedanken der Automatisierung auf der Baustelle. In den vorgestellten Beispielobjekten in *Abbildung 1* werden die Holzstürze, ggf. Einbauteile, manuell eingelegt. Dies spiegelt sich langfristig jedoch sowohl in der Produktivität als auch den Kosten wider. Ein alternatives Konzept für die Herstellung der Überhangsstrukturen ist in *Abbildung 2* dargestellt.



Abbildung 1: Beispiele aus der Praxis für die Herstellung der Überhangsstrukturen: (a) 3D-gedrucktes Hotel, Totalcustom, USA [3]; (b) 3D-Betondruck eines Wohnhauses bei Icon, Mexiko [4].

Eine Alternative zum Konzept der Einbringung von permanent im Bauwerk verbleibenden Einbauteilen oder temporären Hilfskonstruktionen bietet die Extrusion eines Stützmaterials, welches nach ausreichender Zunahme der Betonfestigkeit entfernt werden kann. *Abbildung 2* veranschaulicht das Konzept der Stützmaterialextrusion. Die in gelb dargestellten Schichten repräsentieren das Stützmaterial.

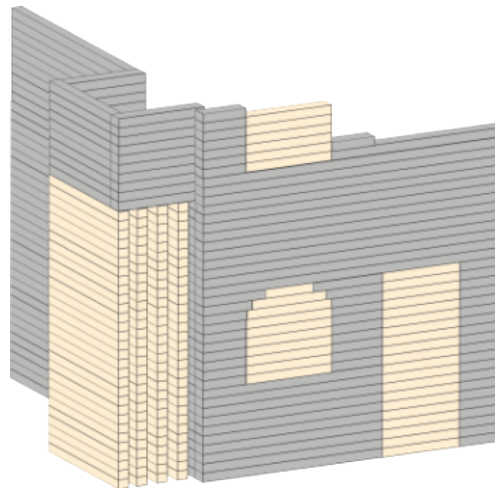


Abbildung 2: Grundprinzip der Holz-Stärke-Komposite als 3D-gedrucktes Stützmaterial für die Überhangstrukturen [5].

Das Stützmaterial soll sowohl bei Öffnungen z.B. für Leitungen der technischen Gebäudeausrüstung, Strom- und Wasserleitungen als auch bei großflächigen Öffnungen wie Türen und Fenstern verwendet werden. *Abbildung 3* präsentiert die mögliche Formfreiheit durch den Einsatz des Stützmaterials. Mit Hilfe eines Stützmaterials können folgende geometrische Formen gestaltet werden: Stelle Nr.1 – ein auskragendes Bauteil, Stelle Nr. 2 – rechtwinklige Ecken, Stelle Nr. 3 – eine gekrümmte Form, Stelle Nr. 4 – eine Oberfläche mit einem Übergang von gerader zu gekrümmter Fläche.

Da es sich hierbei um ein neues Konzept handelt, wird nachfolgend auf die Anforderungen an das Stützmaterial und die notwendige Anlagentechnik eingegangen.

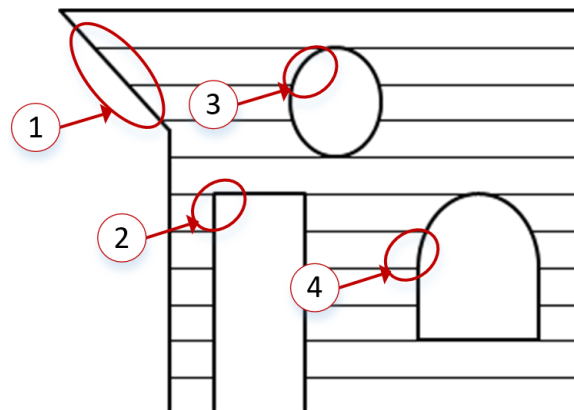


Abbildung 3: Darstellung anspruchsvoller Stellen für den Einsatz des Stützmaterials.

Die Materialeigenschaften des Stützmaterials beeinflussen direkt die Ausführungszeiten und somit die Wirtschaftlichkeit des Stütz Materialeinsatzes. Weiterhin kann durch die Änderung der Materialeigenschaften die Druckstrategie beeinflusst werden. Unter Druckstrategie werden Sequenz und Reihenfolge der Arbeitsschritte beim 3D-Druck verstanden. Zahlreiche Varianten bestehen bezüglich der Fahrbahn des Druckkopfes und der Abfolge der Prozessschritte. Die Druckstrategie hängt eng mit dem Bauteilentwurf zusammen. Parameter wie Druckstrategie

und Ausführungszeit haben einen primären Einfluss auf die Baukosten. Weiterhin sind Ausführungszeit, Formfreiheit und die Herstellungskosten vom verwendeten Material und der technischen Ausführung des 3D-Druckers abhängig.

Der 3D-Druck von Kunststoffen hat eine längere Geschichte als der 3D-Druck von Beton. Vorteilhaft für die Baubranche ist, dass die Erkenntnisse zu Modellierung und Herstellung der dreidimensionalen Bauteile aus Kunststoff auf die Herstellung von 3D-gedruckten Betonbauteilen übertragen werden können. So z.B. kann für die Herstellung eines Objektes oder eines Bauteils die Stützstruktur unterschiedliche Formen einnehmen. In *Abbildung 4* ist ein Beispiel für die Herstellung eines Objektes mit zwei unterschiedlichen Druckstrategien für die Stützkonstruktion dargestellt. Die Kosten des Stützmaterials setzen sich aus den Kosten der verwendeten Materialien einschließlich der Herstellung des Stützmaterials, ggf. dem Anmischen, und den Kosten für den Einbau des Stützmaterials zusammen. Die Kosten für das Stützmaterial sowie die Kosten für die Entfernung und Wiederverarbeitung können reduziert werden, wenn geometrisch optimierte Stützstrukturen eingesetzt werden. Im vorgestellten Beispiel in *Abbildung 4* könnte der Materialverbrauch für die Herstellung der Stützstruktur auf ca. 40 % reduziert werden. Zudem ist es bei einer materialsparenden Bauweise möglich, die Herstellungszeit zu reduzieren [6]. Jedoch hängen Materialverbrauch und Ausführungszeit von den technischen Eigenschaften des 3D-Druckers ab.

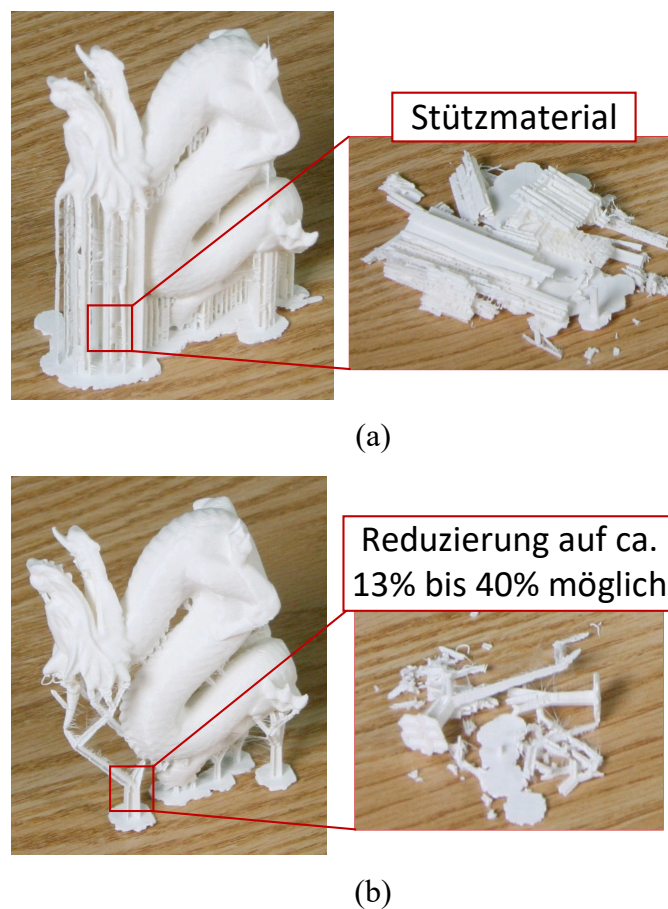


Abbildung 4: Einfluss der Druckstrategie auf die Material- und Zeitersparnis beim 3D-Druck von Kunststoffen [6].

Die Eigenschaften des Stützmaterials bestimmen entscheidend die Rahmenbedingungen des Aufbauprozesses. Die Stabilität des gedruckten Betonbauwerks wird durch das Abbinden der Betonschichten gewährleistet. Das Abbinden der Betonschichten beginnt sofort nach dem Austritt aus der Druckerdüse und ist auf die thixotrope Natur des Baustoffs sowie die Hydratation des Zements zurückzuführen. Für das Stützmaterial kann die Stabilität entweder durch eine ausreichend steife Konsistenz oder durch die fortschreitende Reaktion des Bindemittels erreicht werden. So erhärtet beispielsweise das auf Holz und Stärke basierte Stützmaterial nicht durch chemische Reaktion, sondern durch physikalische Trocknung, indem das Wasser verdunstet. Bei der Verwendung eines Bindemittels, welches mit Wasser chemisch reagieren kann, ist von einer chemischen Verfestigung des Stützmaterials auszugehen. Im *Kapitel 3* wird die bestmögliche Zusammensetzung des Stützmaterials für einen kontinuierlichen Aufbauprozess untersucht.

2.1.2 Ermittlung der Lasteinwirkungen

Die im Stützmaterial entstehenden Spannungen werden durch sein Eigengewicht oder durch die Last der aufliegenden Betonfilamente verursacht. Die äußeren Einwirkungen wie z.B. Windlast werden vernachlässigt, da ihre Einwirkung als vernachlässigbar klein angenommen und in dieser Studie nicht betrachtet wird. Durch die mit jeder Schicht von Stützmaterial und später Betonfilamenten steigende und sich aufsummierende Last gilt die unterste Schicht des Stützmaterials als die am meisten beanspruchte. Die Lasteinwirkungen auf das Stützmaterial können mit folgender Gleichung abgebildet werden:

$$E_s = \rho_s h_s g + \rho_b h_b g \quad (1)$$

ρ_s – Dichte des Stützmaterials

h_s – Höhe des Stützmaterials

g – Fallbeschleunigung

ρ_b – Dichte des Betons

h_b – Höhe des Betons

Die auf das Stützmaterial einwirkende Last ist vor allem von der Höhe der gedruckten Stützstruktur h_s und von der Höhe der aufzufangenden Betonstruktur h_b abhängig. Nach dem Aushärten des Betons ist die Tragwirkung des Stützmaterials nicht mehr notwendig. Sowohl beim Beton als auch beim Stützmaterialgemisch steigt die Druckfestigkeit mit der Zeit. Die Zunahme der Druckfestigkeit bei einem Holz-Stärke-basierten Stützmaterial ist auf die Verdunstung des Wassers und die damit verbundene Konsolidierung zurückzuführen. Dementsprechend ist zwischen Grünfestigkeit (Festigkeit des Stützmaterials direkt nach der Extrusion) und Druckfestigkeit nach der Austrocknung (hierfür sind die Angaben über Alter und Lagerbedingungen bzw. Nachbehandlung des Stützmaterial notwendig) zu unterscheiden. Um die Anforderungen an die Druckfestigkeit beim Stützmaterial festzulegen, ist die Grünfestigkeit des Stützmaterials entscheidend.

In *Abbildung 5* sind drei Anwendungsszenarien des Stützmaterials dargestellt. Bei einer Stützmaterialrohddichte von 1100 kg/m^3 und einer Betonrohddichte von 2200 kg/m^3 ergibt sich eine Druckfestigkeitsanforderung an das Stützmaterial von $0,042 \text{ N/mm}^2$ für den Fall (a) und von $0,027 \text{ N/mm}^2$ für den Fall (c) gemäß *Abbildung 5*. Unter Berücksichtigung baulicher Verordnungen, z.B. der Landesbauverordnung [7], ist eine Reduzierung der Sturzhöhe möglich. Bei einer Reduzierung der Sturzhöhe von 90 cm auf 40 cm verringert sich auch die Anforderung an die Druckfestigkeit des Stützmaterials. Dadurch ergibt sich im Fall (b) eine Anforderung an die Druckfestigkeit des Stützmaterials in Höhe von $0,031 \text{ N/mm}^2$. Vorliegende Ergebnisse aus [8, 9] deuten darauf hin, dass eine Reduzierung der auf das Stützmaterial aufkommenden Lasten durch den Einsatz von 3D-gedruckten Bauelementen aus Schaumbeton bis ca. 12 % möglich ist. Für den Fall (b) entspräche dies einer Anforderung an die Druckfestigkeit des Stützmaterials von ca. $0,027 \text{ N/mm}^2$.

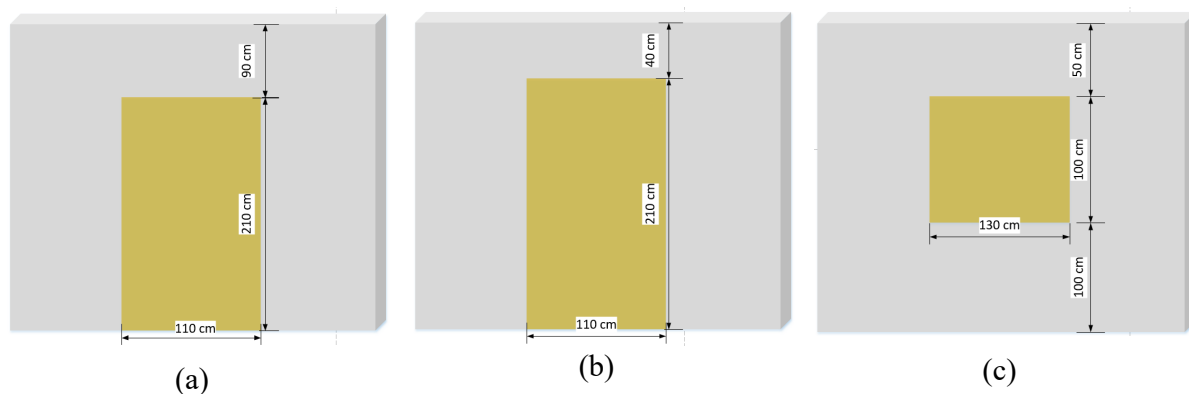


Abbildung 5: Drei unterschiedliche Szenarien für die Anwendung des Stützmaterials: (a) Türrdurchbruch mit lastenden Betonfilamenten in Höhe von 90 cm, (b) Türrdurchbruch mit lastenden Betonfilamenten in Höhe von 40 cm, (c) Fenster mit lastenden Betonfilamenten in Höhe von 50 cm.

Die Entwicklung der Tragfähigkeit des Stützmaterials und des Betons ist zeitabhängig. Um die Berechnung der Lasteinwirkungen auf das Stützmaterial zu vereinfachen, wird in Gleichung (1) jedoch die Zeitkomponente missachtet. Wird die Lastverteilung der auf dem Stützmaterial liegenden Betonschichten betrachtet, zeigt sich, dass die Selbsttragfähigkeit der Betonschichten vornehmlich durch die Zunahme der Scherfestigkeit τ_B bzw. Zugfestigkeit garantiert wird, siehe *Abbildung 6a*. Die Belastungsgeschwindigkeit des Stützmaterials bzw. die Lastaufbaurrate hängt von den geometrischen Parametern des Filaments, der Dichte des Materials sowie vom Grundriss der zu errichtenden Struktur ab. Ein vordefinierter Fahrplan des Extruders bestimmt den Druckvorgang und beeinflusst damit auch die Lastaufbaurrate.

Mit zunehmender Schichtzykluszeit, verursacht durch z.B. verringerte Druckgeschwindigkeit oder zunehmende Konstruktionsgrundfläche, verringert sich die Lastaufbaurrate, da sich die Zeitspanne, bis eine neue Schicht gedruckt wird, vergrößert. Somit hängen der Materialentwurf und damit die Tauglichkeit eines Stützmaterials von dem zu errichtenden Gebäude, den Druckparametern und der Lasteinwirkung aus den Eigengewichten der verwendeten Materialien ab.

Wie in *Abbildung 6b* dargestellt, ist eine automatisierte Einlage einer Verstärkungslamelle, z.B. einer carbonfaserverstärkten Kunststofflamelle (CFK-Lamelle) [10], möglich. Das Integrieren einer CFK-Lamelle würde insbesondere zur Stärkung der Tragfähigkeit der Betonstruktur während der Nutzungsdauer beitragen. Vor der Aushärtung des Betons reicht die Einspannkraft zwischen den Betonschichten nicht aus, um die Zugfestigkeit der Lamellenlage ausnutzen zu können. Eine alternative, vollautomatisierte Lösung bietet die Erhöhung der Zug- bzw. Biegezugfestigkeit des Betons durch Zugabe einer Kunststofffasermischung. Die Festigkeitsparameter von 3D-gedruckten und faserverstärkten Betonelementen sind in [11–13] zusammengefasst. Zwar ist die Verwendung von CFK-Lamellen oder faserverstärktem Beton sinnvoll, doch wird ihr Vorteil erst ab der Aushärtung des Betons vollständig wirksam.

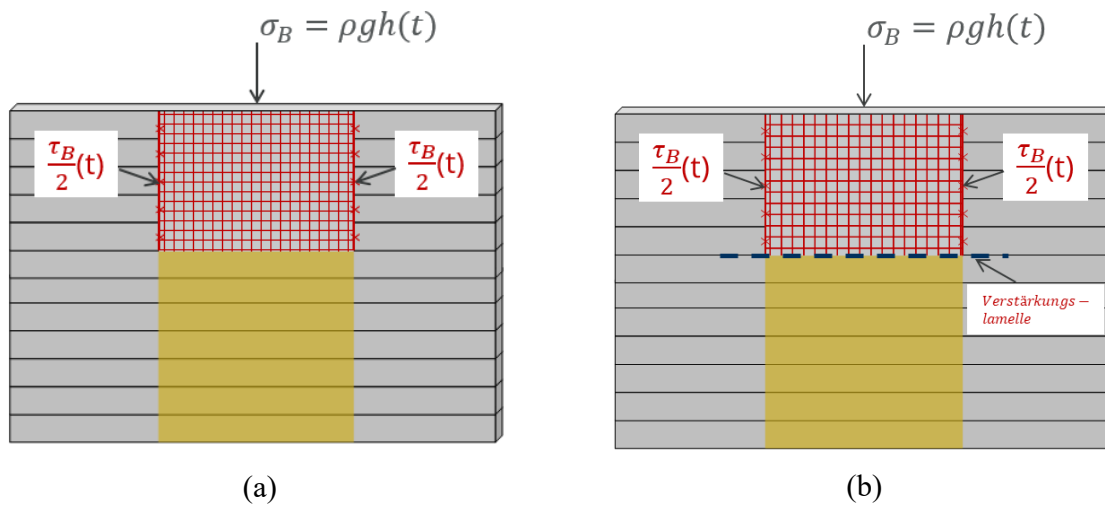


Abbildung 6: Visualisierung der aufkommenden Lasten auf das Stützmaterial einschließlich der mit der Zeit zunehmenden Scherfestigkeit des Betons: (a) Lastverteilung der auf dem Stützmaterial liegenden Betonschichten sowie die Ursachen für die Selbsttragfähigkeit der Betonschichten, (b) Öffnung mit Verstärkungslamelle.

Abbildung 7 veranschaulicht die Abhängigkeit der Anforderung an die Druckfestigkeit des Betons von der Festigkeitsentwicklung des Betons bei linear zunehmender Lastaufbaurrate.

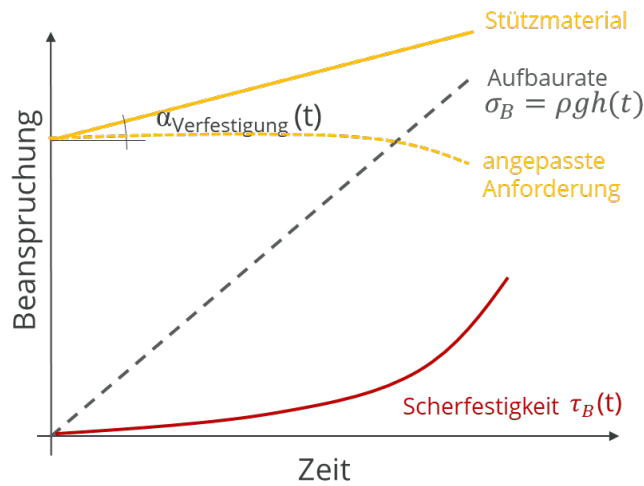


Abbildung 7: Konzept für die Beschreibung der Anforderung an die Druckfestigkeit des Stützmaterials: in gelb sind die Trendlinien für den Stützmaterial und in rot für den Beton angezeichnet.

Durch das Berücksichtigen des zunehmenden Scherwiderstands im Beton kann der Anteil der Scherfestigkeit von der geforderten Tragfähigkeit des Stützmaterials subtrahiert werden. Die gelb strichlierte Linie in *Abbildung 7* stellt die Anforderung an die Druckfestigkeit des Stützmaterials in Abhängigkeit der Zeit dar. Trotz der zeitabhängigen Zunahme der Scherfestigkeit des Betons ist eine vereinfachte Betrachtung der aufkommenden Lasten auf das Stützmaterial möglich. *Tabelle 1* fasst die in dieser Studie berücksichtigte Anforderung an die erforderliche Druckfestigkeit des Stützmaterials zusammen.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Anforderung an die Druckfestigkeit des Stützmaterials.

Dichte	Fall (a)	Fall (b)	Fall (c)
$\rho_{\text{Stützmaterial}}: 1100 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$f_{ck}=0,042\text{N/mm}^2$	$f_{ck}=0,031\text{N/mm}^2$	$f_{ck}=0,027\text{N/mm}^2$
$\rho_{\text{Beton}}: 2200 \text{ [kg/m}^3\text{]}$			

2.2 Bestimmung des Anforderungsprofils an die Anlagentechnik zum kontinuierlichen Drucken von Beton und Stützmaterial

Einer der häufig genannten Vorteile additiver Fertigungsverfahren ist die Formfreiheit bei der Gestaltung der zu errichtenden Strukturen. Um diesen Vorteil auf die Technologie des 3D-Drucks von Beton übertragen zu können, ist die Verwendung einer Stützstruktur oder eines Stützmaterials notwendig. Dennoch ist bei der Spezifizierung des Anforderungsprofils an die Anlagentechnik zu beachten, dass die Fertigung von Überhangsstrukturen ohne Stützkonstruktion nur eingeschränkt möglich ist.

In *Abbildung 8a* ist die Fassade einer 3D-gedruckten Betonburg dargestellt. Die Burg wurde zuerst in Einzelteilen produziert, anschließend zusammengebaut wurden. Die hervorstehenden

Elemente der Fassade sowie die geneigten Zwischenwände der Burg wurden ohne Stützstruktur gedruckt, siehe *Abbildung 8b*. *Abbildung 9* zeigt ebenfalls eine Möglichkeit der geneigten Ablage von Betonfilamenten. Die Ablage der Betonfilamente auf eine geneigte Oberfläche stellt zusätzliche Anforderungen an die Materialrezeptur und an die Anlagentechnik. Bei einer geneigten oder teilweise freihängenden Ablage der Betonfilamente trägt die Scherfestigkeit des Betons zur Erhaltung der vorgegebenen Form bei.

Dennoch können bei einer Überschreitung der entstehenden Scherbeanspruchung durch eine fehlende Stützkonstruktion oder eine Schräglage elastische Verformungen auftreten, welche zum Zusammenbruch des Objektes führen können. Aus diesem Grund muss die Anlagentechnik für den 3D-Betondruck verbunden mit einer leistungsstarken Designsoftware in der Lage sein, den maximalen Grad der auskragenden oder geneigten Oberflächen zu bestimmen. Dafür und um eine Datenbank mit Materialeigenschaften zusammenzustellen, sind zuerst ausführliche Studien zu den Materialeigenschaften nötig.

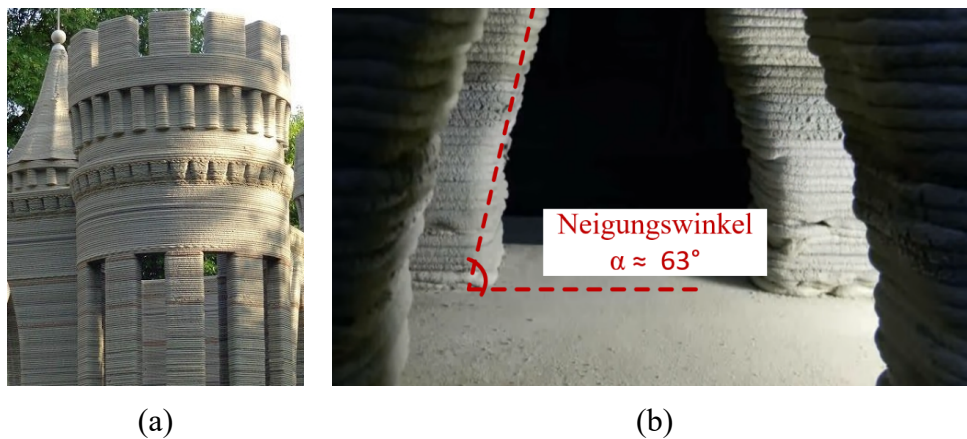


Abbildung 8: 3D-gedruckte Betonburg bei A. Rudenko: (a) Kleinteilige auskragende Elemente der Fassade, (b) Erreichter Neigungswinkel der Wand durch eine versetzte Ablage der Filamente.

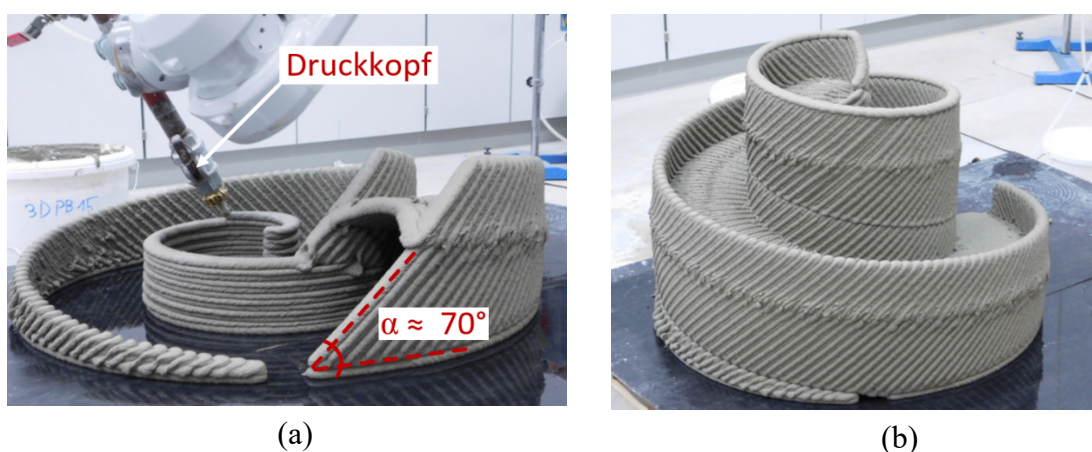


Abbildung 9: Bauelemente mit schräg abgelegten Filamenten, Baumit, Österreich [14].

Für die Realisierung des digitalen Entwurfs auf der Baustelle muss eine präzise Steuerung der Anlage möglich sein. Die größte Herausforderung bei der Steuerung der Anlagentechnik für den 3D-Betondruck liegt am Beginn und am Ende des Filamentaustrags. Die Schwierigkeit liegt in

der Gewährleistung der Übereinstimmung des Austrags bzw. dem Beenden des Austrags mit der fortlaufenden Bewegung des Druckkopfs. Die Steuerung der Anlagentechnik bedarf einer kontrollierten Abbremsung und Beschleunigung des Druckkopfs, die an die Förderrate des Stützmaterials angepasst ist. Ungenauigkeiten in der Anlagesteuerung führen zu Strukturfehlern vor allem am Anfang und am Ende des abgelegten Filaments. Wie aus *Abbildung 10* hervorgeht, wäre eine manuelle Nachbearbeitung der Wände notwendig.

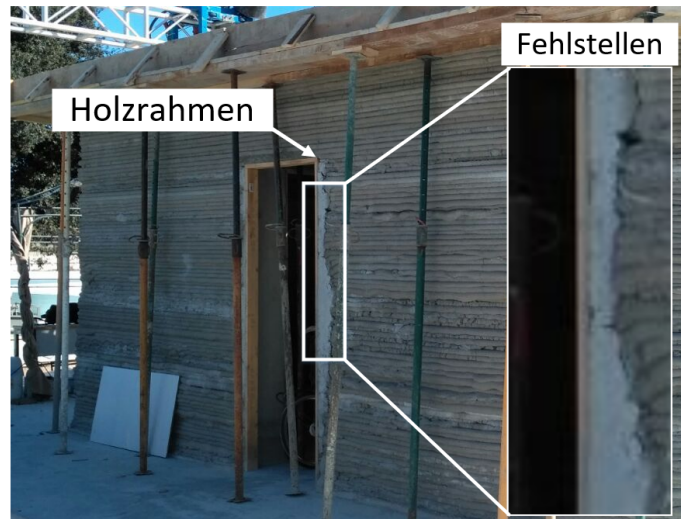


Abbildung 10: Fehlstellen im Türöffnungsbereich. 3D-Betondruck eines Wohnhauses bei Schneider Electric, Spanien [15].

Aufgrund fehlender Präzision der Anlagentechnik konnte der digitale Entwurf nur unvollständig sowie mit sichtbaren Qualitätseinbußen ausgeführt werden. Für die Behebung dieses Problems sollte die Förderrate bzw. das Geschwindigkeitsprofil des Druckkopfs variierbar sein. Ein Beispiel für das Geschwindigkeits- und Austragsprofil für die Bewegung des Druckkopfs und die Steuerung der Förderrate des Stützmaterials zeigt *Abbildung 11*. Das dargestellte Geschwindigkeitsprofil soll nicht nur die Druckkopfbewegung steuern, sondern auch die Förderrate des Stützmaterials am Ausgang der Düse. Beide Geschwindigkeitsprofile müssen aufeinander abgestimmt sein, um eine präzise Übertragung des digitalen Modells auf der Baustelle zu realisieren.

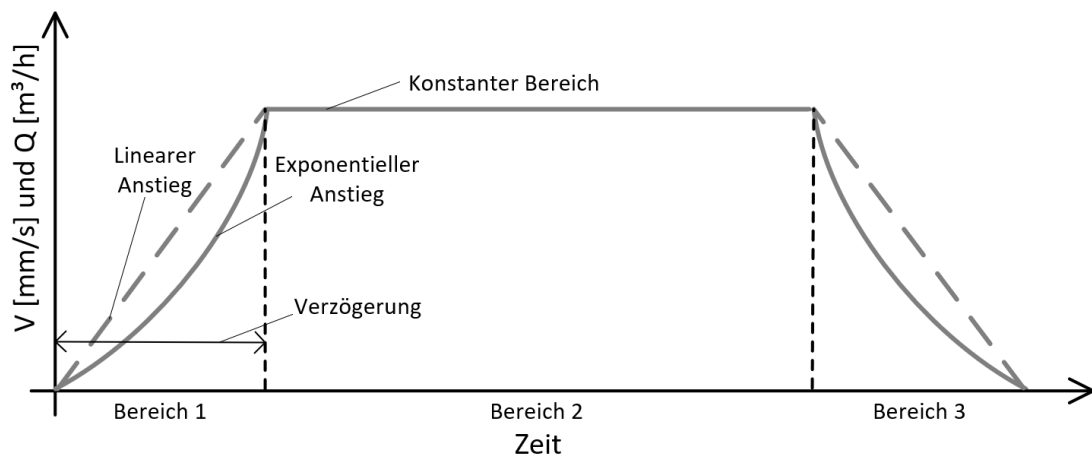


Abbildung 11: Geschwindigkeits- und Austragsprofil für die Bewegung des Druckkopfs und Steuerung der Förderrate des Stützmaterials; V entspricht der Fahrgeschwindigkeit des Druckkopfs, Q der Förderrate des Stützmaterials.

Das Geschwindigkeits- bzw. Förderratenprofil ist in drei Bereiche zu unterteilen. Im ersten Bereich erfolgt die Beschleunigung des Druckkopfs bis zum Erreichen der festgelegten Druckgeschwindigkeit. Die Beschleunigung der Druckkopfbewegung bzw. die Beschleunigung des Austragsvolumens kann entweder einen linearen oder einen exponentiellen Verlauf aufweisen. Nach Einstellung einer vordefinierten Geschwindigkeit wird sie bis zum Anfang des Verzögerungsbereichs (Bereich 3) konstant gehalten. Eine Diskrepanz zwischen Bewegungsgeschwindigkeit des Druckkopfs und Förderrate des Stützmaterials kann Diskontinuitäten oder Stauchungen der Filamente verursachen; siehe *Kapitel 7*.

Allerdings ist es, wie in *Abbildung 12* dargestellt, möglich, die Diskrepanz zwischen Bewegungsgeschwindigkeit des Druckkopfs und Förderrate auszunutzen, indem bewusst eine geschwächte Struktur erzielt wird, welche im Nachgang entfernt werden kann. In dieser Studie wurde versucht, die auf der Stützstruktur aufliegenden Betonfilamente unter Verwendung eines einzigen Baumaterials auszuführen. Die Diskontinuitäten in den einzelnen Schichtlagen konnten durch die Steuerung der Druckgeschwindigkeit und der Förderrate variiert werden. Obwohl die Herstellung einer solchen Überhangstruktur gelang, ist dieser Ansatz mit vielen Nachbearbeitungsschritten, welche energie- und kostenintensiv sind, verbunden. Überdies wurde der Aspekt des nachhaltigen Ressourcenverbrauchs und die Wiederverwendbarkeit der temporären Stützstruktur vernachlässigt.

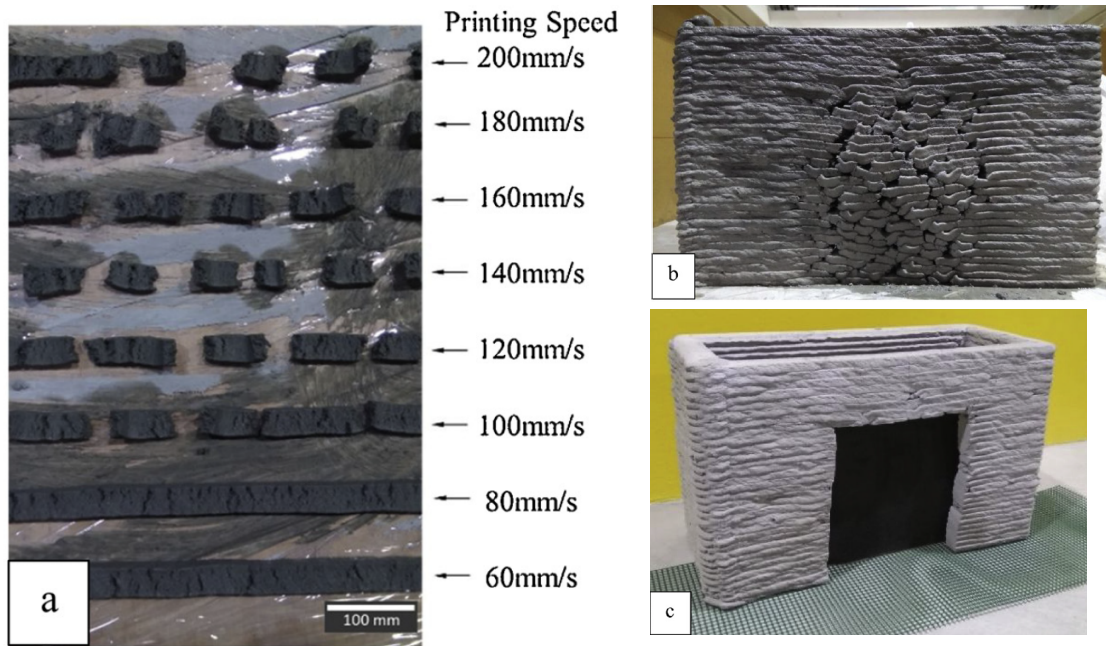


Abbildung 12: 3D-Druck einer Überhangsstruktur mit Beton als Stützstruktur: (a) Variation der Druckgeschwindigkeit bei einer festgelegten Fördermenge, (b) 3D-gedrucktes Objekt, (c) 3D-gedrucktes Objekt nach der Nachbehandlung [16].

Anhand des berücksichtigten Gebäudemodells (siehe Kapitel 2) wurden verschiedene Herangehensweisen für den Aufbauprozess des Stützmaterials eruiert. Die unterschiedlichen Möglichkeiten können wie folgt zusammengefasst werden: (a) Das Stützmaterial wird früher als der Beton gedruckt, (b) das Stützmaterial wird zeitgleich zur umliegenden Betonstruktur gedruckt oder (c) das Stützmaterial wird im Nachhinein gedruckt. In Abbildung 13 sind diese Strategien dargestellt.

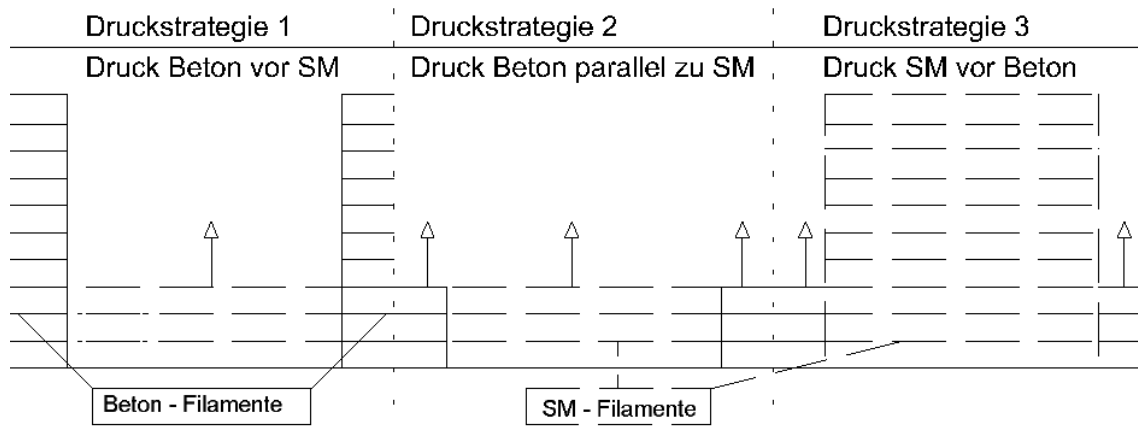


Abbildung 13: Mögliche Druckstrategien von Stützmaterial und Beton (SM: Stützmaterial).

Das Drucken im Voraus und das nachträgliche Drucken stellen nur bedingt bis überhaupt nicht praktikable Ansätze dar. Das Drucken im Voraus hat zwar den Vorteil, dass das SM mehr Zeit zum Erhärten hat. Zusätzlich wird die Zeit der Errichtung reduziert, da der Druckprozess nicht durch den Wechsel zwischen verschiedenen Materialien unterbrochen wird. Es besteht jedoch

die Gefahr, dass die Stützmaterialstruktur später den Fahrweg des Druckkopfs versperrt, wenn dieser die anliegende Betonstruktur drückt. Das zeitgleiche Drucken des Stützmaterials und des Betons erfordert andererseits eine modifizierte Anlagentechnik. Diese muss in der Lage sein, unterschiedliche Materialien zu drucken und zwischen diesen regelmäßig zu wechseln, ohne die Materialien dabei zu vermischen.

Eine weitere Option für die automatisierte Bauweise von Objekten und Strukturen mit Öffnungen kann wie bereits erwähnt durch das Einlegen von Einbauteilen erfolgen. Ein Beispiel stellt *Abbildung 14* dar.

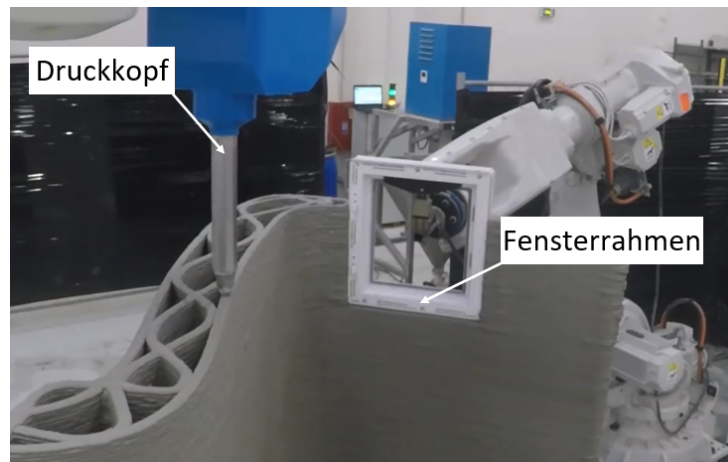


Abbildung 14: Automatisierter Einbau von Fensterrahmen bei Xtree, Frankreich [17].

Mit Hilfe eines Roboters wird der Fensterrahmen zur notwendigen Stelle gebracht und solange gehalten, bis die umliegenden Wände gedruckt werden. Ausgehend von Größe und Gewicht des Fensterrahmens sowie der Geschwindigkeit der Aushärtungsreaktionen der verwendeten Betonrezeptur kann die Fixierung des Einbauteils durch den Roboter über die gesamte Bauzeit der umliegenden Wände andauern. Die von dem französischen Startup-Unternehmen Xtree vorgeschlagene Lösung für die Herstellung der Überhangsstrukturen beschränkt sich allerdings auf Strukturen, bei denen ein Einbauteil notwendig ist und später nicht entfernt werden muss. Zu bedenken ist, dass der Einsatz zusätzlicher Roboter mitunter problematisch und situationsbedingt nicht möglich sein kann. Dagegen wäre das Arbeiten mit einem temporären, d.h. reversiblen und ressourcenschonenden Stützmaterial effizienter.

2.3 Bestimmung des Anforderungsprofils für die Entfernung und Wiederverwendbarkeit des Stützmaterials

Einer der bedeutendsten Aspekte, der für die Verwendung eines holzbasierten Stützmaterials spricht, ist seine Umweltfreundlichkeit. Diese gründet sich in der Verwendung ökologischer Rohstoffe sowie der möglichen Wiederaufbereitung bzw. dem (engl.) Recycling (RC) der Materialmischung. Bei der Wiederverwendung des Stützmaterials kommen folgende Punkte in Betracht:

1. Kosten des Stützmaterials,

2. Aufwand bei der Entfernung,
3. Möglichkeit der Wiederverwendung.

Erste Untersuchungsergebnisse zur Rezyklierbarkeit des Stützmaterials in [5] bestätigen die Möglichkeit zur mehrmaligen Aufbereitung. Allerdings ist aufgrund der hohen Anforderungen an die Prozesskette der Wiederaufbereitung des Stützmaterials eine detaillierte Studie nötig. Weiterhin könnten zu der in [5] beschriebenen Grundrezeptur alternative Zusatzstoffe zugegeben werden. Ausführlicher wird dazu in *Kapitel 5* berichtet. Die Modifizierung der Materialrezeptur macht erneute Untersuchungen zur Rezyklierbarkeit erforderlich.

Um die Anforderungen an die Entfernbarkeit und Wiederaufbereitung des Stützmaterials festlegen zu können, soll im Vorfeld ermittelt werden, inwieweit das Stützmaterial von der Trocknung und Zerkleinerung beim Entfernen beeinflusst wird. Das Potenzial der Wiederaufbereitung des Materials soll an dessen Druckfestigkeit, Extrudierbarkeit und Verbaubarkeit gemessen werden. Da das Stützmaterialgemisch auch nach dem Recycling für den 3D-Druck geeignet sein soll, muss es weiterhin die nötigen rheologischen Eigenschaften für die Pumpbarkeit und die Extrudierbarkeit aufweisen [18, 19].

Es ist notwendig, die Prozessschritte zu determinieren, die den Lebenszyklus des Stützmaterials beeinflussen und sich auf dessen Eigenschaften auswirken. Die ursprünglichen Eigenschaften sollen möglichst identisch reproduziert werden können. In *Abbildung 15* ist die durch die Verwendung eines temporären Stützmaterials entstehende Prozesskette dargestellt.

Der Kreislauf der Wiederaufbereitung des Stützmaterials soll durch ein Programm zur Qualitätsüberwachung im Rahmen eines Qualitätsmanagements (QM) nachverfolgt werden. Bevor das Material wieder zum Einsatz kommt, muss dem Material eine ausreichende Qualität bestätigt werden.

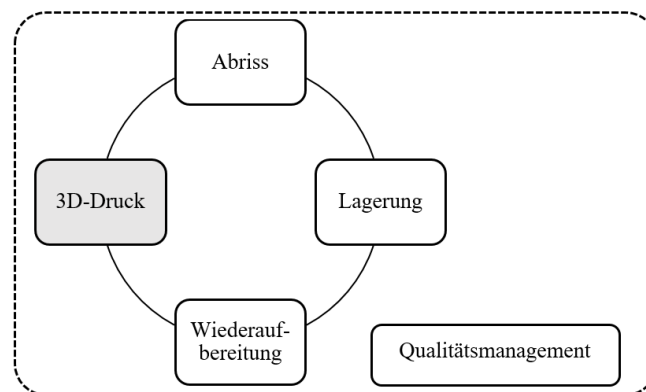


Abbildung 15: Prozesskette beim 3D-Druck des Stützmaterials.

Nach der Herstellung der Stützstruktur und dem Aushärten des Betons beginnt die Prozesskette der Wiederaufbereitung des Stützmaterials. Die Wiederaufbereitung des Stützmaterials beginnt mit dem Abriss der errichteten Stützstruktur. Unter Abriss wird hierbei das Entfernen, Sortieren und Transportieren des Materials verstanden. Abhängig von den Betoneigenschaften wird nach einer gewissen Zeit das Stützmaterial von der erhärteten Betonstruktur entfernt und in günstiger Weise in Containern gesammelt. Dabei ist es wichtig, dass möglichst wenig Fremdstoffe in den Stoffkreislauf gelangen, um voraussagbare Materialeigenschaften sicher zu gewährleisten.

Es ist zu erwarten, dass nach dem Abbruch Zementrückstände am Stützmaterial in der Kontaktzone zwischen dem Stützmaterial und dem Beton verbleiben. Das Ausmaß dieser Rückstände und deren Auswirkungen auf die Eigenschaften des Stützmaterials ist zu ermitteln und zu analysieren. Aufgrund der voraussichtlich noch formbaren und klebrigen Konsistenz des Stützmaterials ist ein gewisser Eintrag von Fremdstoffen in das Stützmaterial durch Kontakt mit dem Boden beim Abriss nicht ausgeschlossen. Ein systematischer Abriss, der auf das Minimieren des Fremdpartikeleintrags ausgelegt ist, stellt eine Herausforderung dar. Auch wenn eine Sortierungsanlage die Entfernung von Fremdstoffen aus dem Stützmaterial bewerkstelligen könnte, wird davon ausgegangen, dass dies hinsichtlich der notwendigen Anlagentechnik und der damit verbundenen Energiekosten weder ökonomisch noch ökologisch sinnvoll ist. Deswegen muss die Konsistenz des Stützmaterials kurz vor der Entfernung den mäßigen Anhaftungen von Fremdstoffen widerstehen. Nach dem Abriss und der Sortierung muss das Stützmaterial für die Wiederaufbereitung zu der entsprechenden Anlagentechnik transportiert werden.

Das durch die Wiederaufbereitung angestrebte Endprodukt ist ein homogenes Granulat. Dafür muss das Ausgangsmaterial, also das frische Abbruchmaterial, zerkleinert und getrocknet werden. Um lange Trocknungszeiten und damit einhergehende Energiekosten zu vermeiden, bedarf es einer abgestimmten Prozesskette der Wiederaufbereitung. Essenziell für die Effektivität der Trocknung ist das Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis. Demnach würde sich eine Zerkleinerung vor dem Trocknen anbieten. Dies allerdings ist nur begrenzt möglich, da die klebrige und zähe Konsistenz des frischen Abbruchmaterials Aufbereitungsanlagen verstopfen kann. Für eine Aufwandsminimierung bei der Aufbereitung des Stützmaterials sind die Mischungsrezepturen mit geringerer Restfeuchtigkeit zu bevorzugen. Die Wiederaufbereitung muss stets aufs Neue entsprechend der gewählten Rezeptur des Stützmaterials optimiert werden.

Im Idealfall wird das Material direkt nach dem Abriss aufbereitet und zur nächsten Baustelle gebracht. Dafür ist jedoch unter anderem ein stark frequentierter Einsatz und damit eine enge Terminplanung nötig, um das Material permanent in Bewegung zu halten. Da Ausfälle und Verzögerungen keine Seltenheit im Baugewerbe sind und dieses Vorgehen nur gering ausgeprägte Möglichkeiten zur Qualitätssicherung aufweist, stellt es keine realistische Lösung dar. Demnach verbleiben die Möglichkeiten der Lagerung vor oder nach der Aufbereitung. Weiterhin neigen die organischen Bestandteile im Stützmaterial bei Anwesenheit von Feuchte zur Schimmelbildung. Der Einfluss auf die Stützmatereialeigenschaften infolge zu kurzer oder längerer Lagerungszeiten ist, verbunden mit der gewählten Mischungsrezeptur, genau zu prüfen. Die Herstellung eines homogenen Granulats ist für die Qualitätssicherung und die Weiterverarbeitung unabdingbar. Ein Versagen des Materials auf der Baustelle würde erhebliche Kosten bedeuten und den wirtschaftlichen Misserfolg eines Projekts bedeuten. Daher ist vor dem Einsatz des rezyklierten Materials eine Probe des hergestellten Granulats in ihren rheologischen und mechanischen Eigenschaften zu untersuchen. Es muss vergleichbare Druckfestigkeitswerte und rheologische Eigenschaften aufweisen, um wieder verarbeitet werden zu können.

In Rahmen des QM muss bestimmt werden, wie viel Zementsteinanhaftungen potenziell in einer Mischung enthalten sind und ab welcher Höhe der Zementanteil das Stützmaterial untauglich macht. Der prozentuale Anteil der Zementmasse am Gesamtgewicht lässt sich anhand der Kontaktflächen von Stützmaterial zu Beton abschätzen und dokumentieren. Dafür ist ein Kennwert zu bestimmen. Dieser Kennwert soll die Menge der Zementmasse pro Flächeneinheit oder volumetrisch auf das gesamte Volumen des Stützmaterials beschreiben. Durch langfristige Untersuchungen der Auswirkungen des Fremdstoffanteils auf das Materialverhalten des Stützmaterials lässt sich eine Prognose erstellen, wie oft das Material wiederverwendet werden kann. Dokumentierung des Zementanteils und die Ergebnisse der Qualitätsprüfungen des Granulats lassen jeder wiederaufbereiteten Charge spezifische Kennwerte zuordnen. Chargen, die gewisse Grenzwerte der Qualitätskontrolle einhalten, werden anschließend zusammen in einem Behälter bzw. Silo gelagert. Anhand der Kennwerte der einzelnen Chargen lassen sich für jedes Silo durchschnittliche Werte bestimmen, die als Grundlage für das Qualitätsmanagement der folgenden Rezyklierungen dienen können.

3 Stoffliche Optimierung des Stützmaterials und Untersuchung konstruktiver Aufbauvarianten

3.1 Anpassung der Rezeptur an die Fördertechnologie

Wird der Einsatz von Stützmaterial beabsichtigt, steht die lastabtragende Funktion im Vordergrund. Abgesehen von dieser Funktion muss das Stützmaterial eine Reihe von Eigenschaften aufweisen, die notwendig für die 3D-Drucktechnologie sind. Die Anforderungen an das Stützmaterial ergeben sich aus den spezifischen Prozessphasen während der Herstellung sowie dem Ein- und Abbau des Stützmaterials. Die Stützmaterialrezeptur muss aus diesem Grund mehreren Anforderungskriterien entsprechen. *Tabelle 2* fasst die Anforderungen an die Rezeptur des Stützmaterials zusammen. Diese Anforderungskriterien galten im Projekt als Zielsetzung für die Anpassung und Weiterentwicklung der Rezeptur des Stützmaterials.

Tabelle 2: Materialanforderungen an ein extrudierbares Stützmaterial [5].

Prozessphase	Materialanforderung	Bearbeitungsgegenstand
Mischen	geringe Mischleistung	nein
	einfache Handhabung, wenige Mischschritte	teilweise
	kaltes Mischen ohne Verkleisterung	ja
	Lagerfähigkeit der Komponenten und der Materialmischung	ja
Fördern	gute Fließfähigkeit, geringe Viskosität	teilweise
	Stabilität der Materialmischung	ja
	geringe Förderleistung	ja
Extrudieren	hohe Druckgeschwindigkeit	teilweise
	Formstabilität des Extrudats	ja
Bauteileignung	minimale Abbindezeit des Extrudats	ja
	kontrollierbares, gleichmäßiges Schwinden	ja
	Aufnahmefähigkeit einer vorgegeben Drucklast	ja

	Kippstabilität des Schichtverbunds	ja
	guter Schichtverbund	ja
	geringe Dichte	ja
	minimale Beeinträchtigung zwischen Stützmaterial und Beton	ja
	Reproduzierbarkeit chemischer und mechanischer Eigenschaften	ja
Nachhaltigkeit	ungefährliche und energiesparende Entfernbarkeit	ja
	Rezyklierbarkeit	ja
	ökologische Unbedenklichkeit der Materialkomponenten	ja
	geringe Materialkomponentenkosten	ja
	leichte Verfügbarkeit der Materialkomponenten	ja

3.1.1 Referenzrezeptur

Tabelle 3 stellt die Ausgangs- bzw. Referenzrezeptur des Stützmaterials dar. Sie ist ein Ergebnis aus dem Forschungsvorhaben „3D-Druck von holzbasiertem Stützmaterial zur Integration in generative Betonfertigungsverfahren“, gefördert aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Laufzeit 01.09.2017 bis 28.02.2019, Zuwendungsempfänger Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH (Förderkennzeichen 22024316) und Institut für Baustoffe, TU Dresden (Förderkennzeichen 22010917). Als Holzwerkstoff und Füller des Stützmaterials wurde Fichte gewählt, da es ein standardmäßig leicht verfügbarer Rohstoff ist. Weiterhin sprechen geringer Preis und eine große Bandbreite verfügbarer Partikelgrößen für diese Wahl.

Für die Realisierung der Referenzmischung im vorliegenden Projekt wurde Fichtenmehl mit einer maximalen Partikelgröße von 0.5 mm und einem Feuchtegehalt von 7.5 % verwendet. Die Maisstärke wurde von der Cargill Deutschland GmbH, Krefeld, bezogen. Zur Verbesserung der rheologischen Eigenschaften des Stützmaterials wurde als Verdickungsmittel Guarmehl der Firma Horst F.C. Brüggemann Handelsgesellschaft mbH, Oststeinbek, verwendet. Die Herstellung des Stützmaterials wurde gemäß der im zitierten Projekt entwickelten Prozesskette ausgeführt [5] (Abbildung 16).

Tabelle 3: Materialrezeptur des Stützmaterials.

Mischung	Fichtenmehl [kg/m ³]	Fichtenspäne [kg/m ³]	Stärke [kg/m ³]	Guarmehl [kg/m ³]	Wasser [kg/m ³]
M-1	71,4	-	154,7	39,9	552

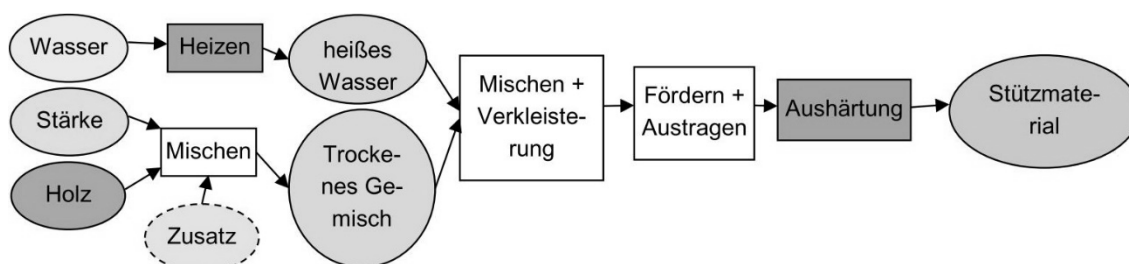


Abbildung 16: Prozesskette der Stützmaterialherstellung mit Stärkeverkleisterung. Als „Zusatz“ wird in dieser Studie ein Hydrokolloid zugegeben.

Das Stützmaterial wurde mit einem Kniele Mischer (KNIELE KKM30, Kniele GmbH, Bad Buchau) eingemischt. *Tabelle 4* zeigt das verwendete Mischprotokoll. Entsprechend der Materialrezeptur wurden zuerst die Komponenten separat abgewogen. Die trockenen Komponenten wurden für zwei Minuten vorgemischt. Anschließend wurde das Wasser zugegeben. In das Wasser wird eine Minute vor dessen Zugabe zum Trockenmaterial das Fließmittel zugegeben. Nach der Wasserzugabe wird das Material für weitere fünf Minuten gemischt. Dabei wird auf die Homogenität des Mischguts geachtet und bei Bedarf das Material manuell von den Wänden des Mixers gekratzt. Nach dem Mischvorgang wurde das Material in den jeweiligen Vorratsbehälter des Extruders gefüllt. Im Projektverlauf wurde das Stützmaterial auch mittels anderer Mischer angemischt, wie z.B. dem Hobart NCM20 Mischer (The Hobart Manufacturing Company Ltd, London, UK).

Tabelle 4: Mischprotokoll für die Herstellung des Stützmaterials.

Zeit [min:s]	Geschwindigkeit [UpM]	Aktion
0:00 – 2:00	3000	Mischen von trockenen Bestandteilen
2:00	0	Zugabe des Wassers
2:30 – 5:00	1500	Mischen der Komponenten
5:00 – 5:30	0	Optische Kontrolle, Abkratzen von den Wänden
5:30 – 7:30	1500	Mischen der Komponenten

Die Untersuchungen zur Extrudierbarkeit der Referenzrezeptur hatten gezeigt, dass eine zu steife Konsistenz der Mischung die Extrusion erschwert, vgl. *Kapitel 4.1.1*. Daher wurde entschieden, die Konsistenz der Mischung durch Zugabe eines Fließmittels und die Änderung der Partikelgrößenverteilung, ggf. der Packungsdichte der Matrix zu beeinflussen (*Tabelle 5*).

Tabelle 5: Modifizierte Stützmaterialrezepturen.

Mischung	Fichtenmehl [kg/m ³]	Fichtenspäne [kg/m ³]	Stärke [kg/m ³]	Hydrokolloid [kg/m ³]	Wasser [kg/m ³]	Fließmittel [kg/m ³]
M-2	35,7	35,7	152,8	39,2	545	14,6
M-3	30,8	30,8	121,5	32,9	607	29,1

Als Füllstoff wurde eine Kombination aus Fichtenspänen und -mehl gewählt. Die unterschiedlichen Partikelgrößen lassen verschiedene Reaktionen des Stützmaterials auf Druckbelastung und Fließverhalten erhoffen. Fichtenmehl mit einer maximalen Partikelgröße von 0,5 mm und Fichtenspäne mit einer maximalen Partikelgröße von 2,0 mm wurden verwendet. Um eine optimale Konsistenz ohne signifikante Erhöhung des Wassergehalts zu

erreichen, wurde ein Hochleistungsfließmittel auf Polycarboxylatbasis hinzugefügt (MC-PowerFlow 5100, MC-Bauchemie Müller GmbH & Co. KG, Bottrop).

3.1.2 Stoffliche Optimierung

Im Folgenden wird auf die Verbesserung der Materialrezeptur des Stützmaterials eingegangen. Abgesehen von den erzielten Ergebnissen durch die empirischen Untersuchungen im Labor wurde eine statistisch gestützte Versuchsplanung implementiert. Damit wurde das Ziel verfolgt, den Einfluss unterschiedlicher Mischungskomponenten auf die Materialeigenschaften zu quantifizieren und eine bestmögliche Rezeptur des Stützmaterials zu erzielen.

Verbesserung der Referenzrezeptur

Das Korngerüst der neuentwickelten Rezeptur des Stützmaterials sollte hauptsächlich aus Holzpartikeln und Calciumsulfat- β -Halbhydrat bestehen. Motivationen für den Einsatz einer Calciumsulfatspezies war, durch chemische Wasserbindung die Bildung von Schimmelpilzen zu reduzieren oder gar vollständig zu unterbinden, sowie die Holzpartikel zu einem monolithischen Material zu verleimen, um eine raschere Festigkeitsentwicklung nach der Extrusion zu erhalten. Verwendet wurde das β -Halbhydrat von CASEA GmbH, Ellrich. Anstelle des Polycarboxylatfließmittels auf der chemischen Basis von Acrylsäure und Ethylenoxid wurde auf ein Lignosulfonat umgestellt, welches rein biologischen Ursprungs ist (Borresperse 390 Liq 58%, Borregaard Deutschland GmbH, Karlsruhe).

In *Tabelle 6* ist die neue Referenzmischung des Stützmaterials dargestellt. Diese Mischung wurde anhand zahlreicher empirischer Versuche am IHD Dresden entwickelt und diente als Grundlage für die nachfolgend dargestellte Weiterentwicklung der Stützmaterialrezeptur mit einer calciumsulfatgebundenen Matrix.

Tabelle 6: Referenzrezeptur des Stützmaterials mit Zugabe von Calciumsulfat-Halbhydrat.

Mischung	Fichtenholzspäne [kg/m ³]	Rohcellulose [kg/m ³]	CaSO ₄ ·½H ₂ O [kg/m ³]	Stärke [kg/m ³]	Guarmehl [kg/m ³]	Lignosulfonat [kg/m ³]	Wasser [kg/m ³]
M-4-Ref	66,5	66,5	272	72	2,0	15	506

In dieser Referenzrezeptur M-4-Ref wurde die natürliche Rohcellulose Arbocel C100 von J. Rettenmaier & Söhne GmbH + Co KG, Rosenberg, eingesetzt. Zusätzlich wurden Fichtenspäne aus Herstellung des IHD als Füller zugegeben. Die Eigenschaften dieser Fichtenspäne werden in *Kapitel 3.1.2* beschrieben. Im Projektverlauf wurden sie durch den Holzwerkstoff Lignocel® Type 9 (im Weiteren auch als „Holzfüller T9“ bezeichnet) des Projektpartners J. Rettenmaier & Söhne GmbH + Co KG ersetzt (*Tabelle 7*, M-5 mit Holzfüller T9 gegenüber den IHD-Spänen in M-4-Ref). Der Einsatz eines handelsüblichen Produkts sollte den Praxisbezug der entwickelten Rezeptur steigern. *Abbildung 17* stellt die Sieblinien der in Mischungsrezeptur M-4-Ref verwendeten Fichtenspäne und des in Mischungsrezeptur M-5 verwendeten Holzwerkstoffs T9 dar.

Tabelle 7: Verbesserte Rezeptur des Stützmaterials mit Zugabe von Calciumsulfat-Halbhydrat.

Mischung	Holzfüller T9 [kg/m ³]	Rohcellulose [kg/m ³]	CaSO ₄ ·½H ₂ O [kg/m ³]	Stärke [kg/m ³]	Guarmehl [kg/m ³]	Lignosulfonat [kg/m ³]	Wasser [kg/m ³]
M-5	66,5	66,5	270	72	2,0	15	506

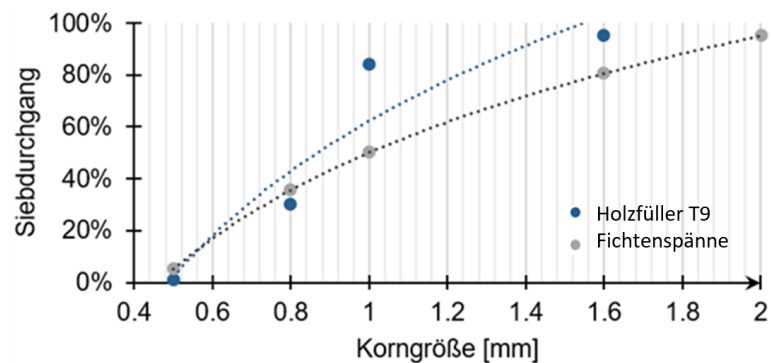


Abbildung 17: Korngrößenverteilung der verwendeten Holzpartikel.

Theoretische Versuchsplanung

Soll die Auswirkung einer Einflussgröße auf eine Zielgröße untersucht werden, wird der als „Faktor“ bezeichnete Parameter variiert. Gemessen wird, wie die Zielgröße auf die Veränderung des Faktors reagiert. Hängt die Zielgröße von mehreren Faktoren ab, müsste jeder zusätzliche Faktor auf allen zuvor berücksichtigten Einstellungspunkten jeweils auf jeder seiner Stufen getestet werden. Der Aufwand für solche als vollfaktoriell bezeichneten Versuchspläne steigt exponentiell an [20]:

$$\text{Anzahl Versuche} = \text{Faktorstufen}^{\text{Faktoren}} \quad (2)$$

Um den Versuchsaufwand zu reduzieren, ist es erstrebenswert, den Einfluss der Faktoren getrennt voneinander zu untersuchen. Hierfür wird nur ein Faktor variiert und die optimale Einstellung gefunden. Im Anschluss wird der erste Faktor in seinem Optimum konstant gehalten, während ein zweiter variiert und eingestellt wird. Es wird dann mit beliebig vielen Faktoren entsprechend fortgefahren. Das Problem dieses als Einfaktor-Methode bekannten Vorgehens ist, dass die optimale Einstellung eines Faktors nicht der Einstellung des globalen Optimums entsprechen muss. Folglich wären iterative Wiederholungen der Optimierung notwendig, bis sich die Faktoreinstellungen nicht mehr ändern. Der Versuchsplan bleibt somit zwar übersichtlich und nachvollziehbar, der zu erbringende Versuchsaufwand kann jedoch nicht belastbar kalkuliert werden. *Abbildung 18* gibt eine Übersicht über konventionelle Versuchspläne. In *Tabelle 8* werden die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Versuchspläne abgebildet.

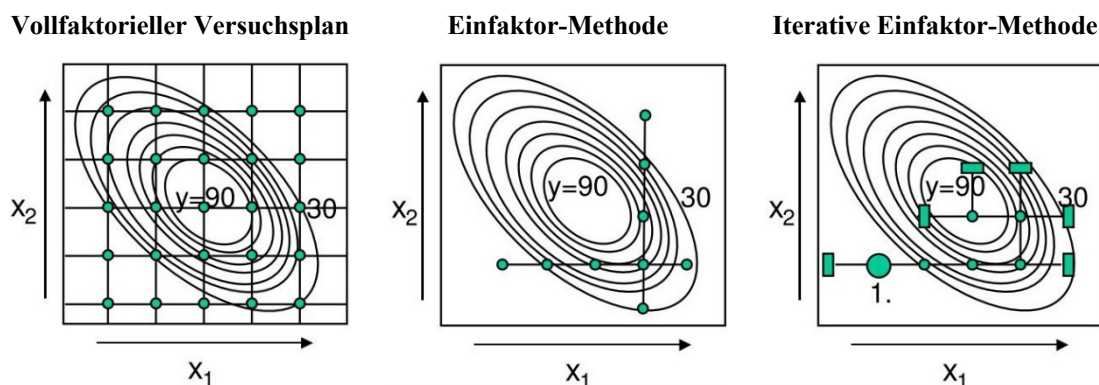


Abbildung 18: Konventionelle Methoden zweifaktorieller Versuchspläne nach [20].

Tabelle 8: Gewichtung der Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Versuchspläne [20].

Vollfaktorieller Versuchsplan	Einfaktor-Methode	Iterative Einfaktor-Methode
<ul style="list-style-type: none"> □ bei kleinen Stufenabständen sehr präzise – sehr viele Versuche 	<ul style="list-style-type: none"> □ wenige Versuche □ gut nachvollziehbar – keine Aussage über globales Optimum 	<ul style="list-style-type: none"> □ führt zu globalem Optimum □ weiterhin nachvollziehbar – Versuchsaufwand nicht kalkulierbar

Für die Rezepturoptimierung kann auch die sogenannte DoE-Versuchsplanung (engl.: Design of Experiments) angewandt werden. Bei DoE werden komprimierte Versuchspläne erzeugt, die vielseitige Auswertungsmöglichkeiten bei einem stark reduzierten experimentellen Aufwand ermöglichen [20]. Im Gegensatz zu den klassischen Versuchsplänen ist das Ziel von DoE, möglichst explizite mathematische Regressionsmodelle zu erzeugen. Dazu werden die Stufen verschiedener Faktoren so kombiniert, dass die Stufen anderer Faktoren jeweils gleichgewichtet auf die Stufen eines Faktors verteilt sind [21]. Eine besondere Eigenschaft solcher statistischer Versuchsplanungen ist das Einbeziehen von Wechselwirkungen. So wird nicht nur je Faktor ein Regressionskoeffizient berechnet, sondern auch für mögliche verknüpfte Effekte. In die Auswertung werden die verknüpften Effekte einbezogen. Eine weitere Ursache für den stark reduzierten Versuchsaufwand bei DoE liegt zum einen in der Beschränkung der Faktorvariation auf zwei bis drei Stufen. Zum anderen werden alle Versuchspunkte jeweils für mehrere Auswertungsansätze herangezogen. Zudem wird für die Bestimmung eines quadratischen Zusammenhangs meist nur ein Zentralpunkt berücksichtigt [20]. Das Ziel der Auswertung von DoE liegt in der Bestimmung einer multifaktoriellen Regressionsfunktion. Somit kann bei einem gegebenen Optimierungsziel die notwendige Faktorkombination auch dann berechnet werden, wenn keine der Proben das Ziel erfüllt hat. Zu beachten ist, dass die Regressionsfunktion nur innerhalb des Versuchsraums belastbar ist.

Statistische Mischungsvariation

Um ein Eigenschaftsfeld in Nähe der Basisrezeptur M-5 zu erhalten, wird nach den Methoden der statistischen Versuchsplanung ein Versuchsfeld erzeugt. Dafür werden alle Komponenten

in zwei Stufen variiert (außer Weinsäure und Calciumhydroxid, siehe 0 und 0). Die untere Stufe (-) sieht jeweils einen um 15 % reduzierten Massenanteil vor, die obere Stufe (+) erhöht den Anteil der Bestandteile um 15 %. Für die sieben variierten Einflussfaktoren genügen acht Proben. Zusätzlich dient die Bezugsrezeptur M-5 als Zentralpunkt (0). Die angewandte Randomisierung der Versuchsreihenfolge soll den Einfluss statistischer Fehler reduzieren [22]. Die entsprechende Belegungstabelle für die Mischungsva-riation wurde mit Hilfe der Software Statistica generiert [23]. Die Summen der Rezepturen werden anschließend auf 100 % normiert. Die Anteile von Weinsäure und Calciumhydroxid wurden konstant gehalten. *Tabelle 9* stellt die Variation von Einflussfaktoren dar. Die genauen Zusammensetzungen der somit entwickelten Rezepturen sind Anhang A.2 zu entnehmen.

Tabelle 9: Belegungstabelle für die Variation von sieben Einflussfaktoren um jeweils $\pm 15\%$.

Rezeptur	Stärke	Rohcellulose	Holzwerkstoff T9	CaSO ₄ ·½H ₂ O	Wasser	Ligno-sulfonat	Guar
M-5	0	0	0	0	0	0	0
M-14	+	-	-	-	-	+	+
M-15	-	+	-	-	+	-	+
M-16	-	+	+	-	-	+	-
M-17	-	-	+	+	-	-	+
M-18	+	+	+	+	+	+	+
M-19	+	-	+	-	+	-	-
M-20	+	+	-	+	-	-	-
M-21	-	-	-	+	+	+	-

Die Auswertung des Versuchsplans wurde nicht auf die tatsächlichen Mischungsverhältnisse, sondern auf die Faktorstufen (+/-) bezogen. Zur Berechnung, welche Faktoren einen signifikanten Einfluss auf das Materialverhalten haben, wurde im ersten Schritt einer Auswertung die Varianzanalyse ANOVA (engl. Analysis of variance) durchgeführt [22]. Ergebnisse der jeweiligen Varianzanalyse, die Teststatistiken, sind sogenannte empirische F-Werte (als F_{Emp} bezeichnet). Die empirischen F-Werte werden als Quotienten aus der Varianz der Mittelwerte der Faktorstufen mss_B (engl. mean sum of square between, dt. mittlere Quadratsumme zwischen) und der Varianz der Werte innerhalb der Faktorstufen mss_W (engl. mean sum of square within, dt. mittlere Quadratsumme innerhalb) berechnet:

$$F_{Emp} = \frac{mss_B}{mss_W} \quad (3)$$

Ist mss_B groß, während mss_W klein ist, folgt daraus ein großer F-Wert, der auf einen statistischen Effekt hindeutet. Im umgekehrten Fall ist ein statistischer Zusammenhang unwahrscheinlich. Die Software Statistica berechnet zudem die Irrtumswahrscheinlichkeiten und gibt sie als ANOVA-Ergebnisse aus, die das Signifikanzniveau repräsentieren, dem der jeweilige F-Wert genügt. Nachdem mittels ANOVA signifikante Einflussgrößen identifiziert sind, wird für diese eine multiple lineare Regression berechnet. Um deren Brauchbarkeit zu prüfen, wird die Funktion auf die in der Versuchsreihe getesteten Rezepturen angewendet. Die berechneten Werte werden dann in einem Diagramm über den tatsächlich gemessenen Größen abgetragen.

Das Bestimmtheitsmaß R^2 der linearen Regression dieses Zusammenhangs wird als der Indikator für die Qualität der Regressionsfunktion verwendet.

In den folgenden Kapiteln werden die Eigenschaften der unterschiedlichen Rezepturen ausgeführt sowie mittels statistischer Versuchsplanung und empirisch gewonnener Ergebnisse diskutiert.

Hintergrundinformationen zu den verwendeten Ausgangsstoffen

Stärke

Stärke ist ein Polysaccharid, das Pflanzen als Reservekohlenhydrat bilden. In vielen Nahrungsmitteln für Menschen ist sie als Energielieferant enthalten und wird unter anderem als Verdickungsmittel in der Lebensmittelherstellung eingesetzt. Dabei kommt vorrangig Maisstärke zum Einsatz [24]. Für technische Anwendungen sind ihre gute Verfügbarkeit zu günstigen Preisen und ihre biologische Abbaubarkeit dienlich. Außerdem ist Stärke ein nachwachsender und nicht toxischer Rohstoff.

Stärkekörner quellen im kalten Wasser unter Zunahme ihres Durchmessers um 30 % bis 40 %. In der so hergestellten Suspension nehmen sie das Zwanzig- bis Vierzigfache ihrer Masse an Wasser auf. Die Folge ist ein starker Anstieg der Viskosität der Suspension. Aufgrund der Viskositätserhöhung ist eine Verbesserung der Verarbeitbarkeit des Stützmaterialgemischs zu erwarten.

Bei einer Temperatur oberhalb eines für die jeweilige Stärke spezifischen Schwellenwerts, der sogenannten Verkleisterungstemperatur, platzen die Stärkekörner. Bei Temperaturen über 100 °C werden weitere Wasserstoffbrückenbindungen gebrochen, sodass die Glucane Amylose und Amylopektin, die Hauptbestandteile der Stärke, in Lösung gehen. Bei anschließender Abkühlung bilden sich erneut Wasserstoff- und andere Brückenbindungen, sogenannte interchenare Wechselwirkungen aus. Auf diese Weise entsteht ein dreidimensionales Netzwerk (sog. Gel, sog. Stärkekleister). In dieses Gel sind große Mengen an Wasser eingelagert [24].

Hydrokolloide

Während der Entwicklung des stärkebasierten Stützmaterials zeigte sich, dass einer deutlichen Wasserabscheidung aus dem Frischmaterial entgegengewirkt werden muss. Um die Stabilität der Mischung zu erhöhen, wurden die Quellstärken Johannisbrotkernmehl und Guarkernmehl als pflanzliche Hydrokolloide erprobt. Aufgrund der verzweigten Molekülstruktur wirken diese vorrangig viskositätserhöhend, anstatt Gele zu bilden [25]. Johannisbrotkernmehl besitzt den Vorteil, dass es in europäischer Landwirtschaft erzeugt werden kann. Guarkernmehl besitzt jedoch ein höheres Wasserbindungsvermögen und hat sich im Laufe der Rezepturentwicklung durchgesetzt. Das Guarkernmehl wird aus den vom Keim befreiten Samen der Guarpflanze (lat. *Cyamopsis tetragonoloba*) aus der Gruppe der Leguminosen gewonnen. Diese werden vor allem in Indien und Pakistan als Gemüse- und Tierfutterpflanze angebaut. Industrielle Anwendung findet Guarkernmehl in der Lebensmittelherstellung, wo es als Verdickungsmittel, zur Stabilisierung, zur Verbesserung der Haltbarkeit und zur Verzögerung der Austrocknung eingesetzt wird [26]. Guarkernmehl besteht zu 93,4 % aus Polysacchariden. Weitere 5,9 % sind Proteine [27]. Obwohl eine hohe Affinität zu Wasser besteht, ist Guarkernmehl nicht

hygroskopisch. Bei seiner Zugabe zu Wasser wirkt es stark viskositätserhöhend. Vorteilhaft für den Einsatz in mineralisch gebundenen Verbundmaterialien ist, dass Guarkernmehllösungen keine Niederschläge mit Metallkationen bilden, da es sich um ein nicht ionisierbares Polysaccharid handelt [28].

Calciumsulfat

Calciumsulfat (CaSO_4) ist ein natürlich vorkommendes Mineral, allgemein als Gips bekannt und liegt in verschiedenen Phasen vor. In Steinbrüchen gewonnenes Rohmaterial wird als Gipsstein bezeichnet. Seine Vorkommen bildeten sich bei der Austrocknung von Meeren und sind in räumlichem Zusammenhang mit Salzlagerstätten zu finden. Die Bandbreite der makroskopischen Struktur reicht von feinkörnigem Material bis quadratmetergroßen Tafeln.

Eine zweite wesentliche Quelle von Gipsbaustoffen sind Rauchgasentschweflungsanlagen (REA). Gips fällt hier als Reaktionsprodukt der Abgasreinigung von Kraftwerken an, in denen fossile Brennstoffe thermisch umgesetzt werden. Im Zuge des Prozesses wird wassergelöster Kalk im Rauchgas vernebelt, wo es mit Schwefeloxiden zu Calciumsulfid reagiert. Dieses wird anschließend mit zusätzlichem Sauerstoff zu Calciumsulfat oxidiert. REA-Gipse sind von gleicher Qualität wie Naturgipse und bergen keine gesundheitlichen Gefahren [29].

Unabhängig von der Herkunft muss Calciumsulfat gebrannt werden, bevor es als Bindemittel eingesetzt werden kann. Während dieser Kalzinierung wird das gebundene Kristallwasser ausgetrieben. Mit gezielt eingestellten Prozessbedingungen können verschiedene Gipsphasen mit unterschiedlichen Eigenschaften hergestellt werden. Zunächst sei hier β -Halbhydrat genannt. Es entsteht bei atmosphärischem Druck und Temperaturen zwischen 120 und 180 °C. Im drucklosen System setzt bei Temperaturen über 180 °C die vollständige Entwässerung des Minerals ein. Das nun vorliegende reine Calciumsulfat wird als Anhydrit bezeichnet, das wiederum in verschiedenen Kristallformen vorliegen kann [29].

Ein wesentlicher Vorteil von Gipsbindemitteln ist, dass sie in einem geschlossenen Stoffkreislauf geführt werden können. Nach dem Anmachen des Halbhydrats oder Anhydrits mit Wasser setzt die Hydratation zu Calciumsulfatdihydrat ein. Dieses wird im Bauwesen in Gipsputzen, Gipskartonplatten oder Stuckgipsen eingesetzt und ist zugleich Ausgangsstoff für die oben beschriebene Kalzinierung. Da im Gegensatz zu Zement keine chemischen Verbindungen mit anderen Stoffen eingegangen werden, sondern lediglich zusätzliches Wasser in das Kristallgitter eingelagert wird, kann der Prozess beliebig oft wiederholt werden. *Abbildung 19* stellt den beschriebenen Stoffumsatz als Kreislauf dar.

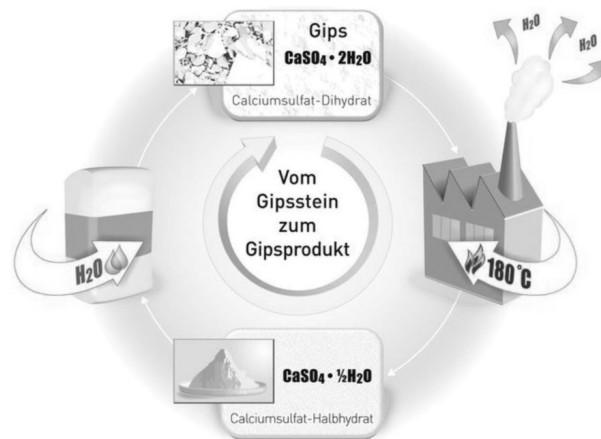


Abbildung 19: Schaubild zum Gipskreislauf [30].

Aus ökologischer Sicht ist zu bedauern, dass im Zentrum der Abbildung „Vom Gipsstein zum Gipsprodukt“ zu lesen ist, nicht jedoch „Vom Gipsprodukt zum Gipsprodukt“. Tatsächlich ist das Gipsrecycling derzeit noch Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. So öffnete im Juli 2014 die erste deutsche Gipsrecyclinganlage der MUEG Mitteldeutschen Umwelt- und Entsorgung GmbH. Hier werden gipshaltige Bauabfälle zerkleinert und von Störstoffen wie Keramik, Kunststoffen und den organischen Anhaftungen der Gipskartonplatten befreit. Das Endprodukt ist ein Dihydratpulver [31].

Gips ist für die Anwendung als extrudierbarer Baustoff als ungünstig zu bewerten, da sich Gips suspensionen rheoplex verhalten. Dies bedeutet, dass es bei anhaltend einwirkenden Scherbeanspruchungen zur Verfestigung [32] der Suspension kommt. Außerdem ist die korrosive Wirkung von Calciumsulfat auf Beton und Stahl von Bedeutung. Die Beaufschlagung von Beton mit Sulfaten ist als „chemischer Angriff“ einzustufen. Im Beton reagieren die Bestandteile mit Tricalciumaluminat, welches unter achtfacher Volumenvergrößerung zu Tricalciumaluminatsulfathydrat reagiert, besser bekannt als Ettringit. Da in der Kristallstruktur des Ettringit viel Wasser eingelagert ist (32 mol je Formeleinheit), findet die schädigende Treibreaktion stets in der wässrigen Phase statt. Allerdings wird davon ausgegangen, dass die geringe Kontaktzeit zwischen einem Stützmaterial mit Gips keine negative Wirkung auf die gedruckten Betonschichten erwarten lässt.

Calciumhydroxid

Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) kommt als natürliches Produkt kaum auf der Erde vor [33]. Meist wird es großtechnisch aus Calciumcarbonat (CaCO_3) hergestellt, das sehr häufig in natürlichen Gesteinsvorkommen der Erde zu finden ist. CaCO_3 , oft synonym als Kreide bezeichnet, ist ebenfalls Grundsubstanz von Kalkstein, Marmor, Dolomitstein und Kalktonmergel. Im Gestein liegt CaCO_3 hauptsächlich in den Mineralformen Calcit, Aragonit und Vaterit vor.

Die Herstellung von Calciumhydroxid aus Calciumcarbonat erfolgt über einen Zwischenschritt und gliedert sich in den technischen Kalkkreislauf ein. Das Ausgangsprodukt Calciumcarbonat muss zunächst bei hohen Temperaturen (700 bis 900 °C) gebrannt werden. Beim Brennen entweicht das Kohlenstoffdioxid (CO_2), was zur Entstehung von Calciumoxid (CaO) führt. Das Endprodukt des Brennvorgangs wird Branntkalk genannt. Dieser ist bei Kontakt mit Wasser

sehr reaktiv und reagiert in einer stark exothermen Reaktion zu Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) um. Auch dieses ist basisch und wird als Löschkalk bezeichnet.

Calciumhydroxid wird in den Versuchen mit dem Ziel eingesetzt, die Abbindezeit des SM zu verlängern. Calciumhydroxid ist schwer in Wasser löslich und benötigt zum Abbinden CO_2 aus der umgebenden Luft, wodurch es sich wieder in den Ausgangsstoff Calciumcarbonat umsetzt. Daher ist eine ausreichende Belüftung zum vollständigen Erhärten des SM entscheidend.

Holzpartikel

Der Verbundwerkstoff setzt sich aus einem Korngerüst aus Holzpartikeln und einem Bindemittel zusammen. Dazu wurden im Projektverlauf verschiedene Holzpartikel erprobt. Durchgesetzt haben sich Weichhölzer, die zerfasert werden und unterschiedliche Partikelgrößen im Bereich weniger Millimeter ausweisen. Fichte wurde aufgrund ihrer guten Verfügbarkeit als Holzkomponente bevorzugt. Weiterhin wurde die Auswahl von Fichtenholz durch geringe Preise und eine große Bandbreite verfügbarer Partikelgrößen bestimmt. Das verwendete Fichtenmehl und die Fichtenspäne wurden im IHD hergestellt (*Abbildung 20*). Es wurde Fichtenmehl verwendet, das eine maximale Partikelgröße von 0,5 mm und einen Feuchtegehalt von 7,5 % aufweist. Die verwendeten Fichtenspäne haben maximale Partikelgröße von 2,0 mm und einen Feuchtegehalt von 3,5%.

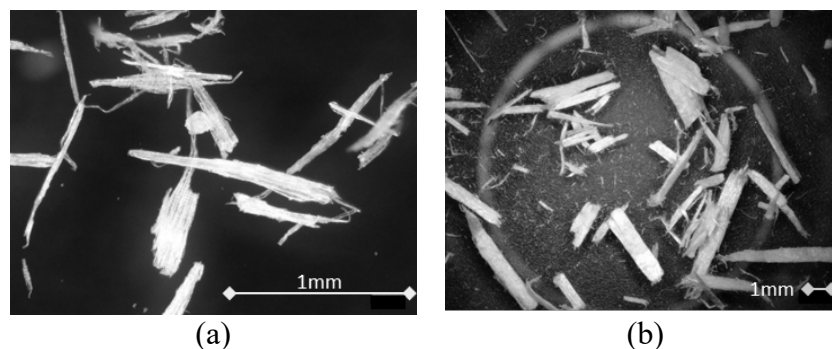


Abbildung 20: Lichtmikroskopische Aufnahmen: (a) Fichtenholzmehl, (b) Fichtenspäne.

Weiterhin wurde die natürliche Rohcellulose Arbocel C100 des Projektpartners J. Rettenmaier & Söhne GmbH + Co KG verwendet. Deren Partikelgrößenverteilung liegt zwischen 0,032 und 0,250 mm [34]. Wie bereits erwähnt, wurden die Fichtenspäne im Projektverlauf durch den Holzfüller Lignocel® Type 9 („T9“) desselben Herstellers ersetzt. Er weist Partikelgrößen zwischen 0,5 und 1,6 mm auf und besteht aus ausgesuchten Nadelhölzern [35].

Fließmittel

Die Anmachwassermenge hat einen wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften eines Baustoffs. Das gilt sowohl für Beton [36] als auch für das stärkegebundene Stützmaterial und nicht zuletzt für gipshaltige Materialien [37]. So beeinflusst der Wassergipswert unter anderem Konsistenz, Erstarrungszeit sowie mechanische Eigenschaften der erhärteten Gipse [29]. Dabei wirkt sich beispielsweise ein hoher Wasseranteil hinsichtlich der Verarbeitbarkeit günstig aus, während mechanische Festkörpereigenschaften nachteilig beeinflusst werden. Um diese

gegenläufigen Optimierungsziele aufzulösen, werden modernen Baustoffen verflüssigende Zusatzmittel zugesetzt. Dank ihrer Viskositätsherabsetzung ermöglichen sie eine gute Verarbeitbarkeit bei niedrigem Verhältnis von Wasser zu Bindemittel. Unterschieden wird zwischen Verflüssigern und Fließmitteln, wobei Letztere die Wirkung von Verflüssigern um den Faktor zwei bis drei übertreffen. Die grundsätzliche Wirkungsweise ist jedoch gleich. Es handelt sich um grenzflächenaktive Substanzen, die zum einen die Oberflächenspannung reduzieren und so eine effektivere Benetzung der Partikel ermöglichen. Zum anderen adsorbieren die in Lösung befindlichen Moleküle die Oberflächen der Feststoffpartikel und bewirken aufgrund ihrer Polarität eine elektrostatische Abstoßung, in einigen Fällen kombiniert mit sterischer Hinderung [36].

Im Zuge der Stützmaterialentwicklung wurden Polycarboxylatether und Lignosulfonate verwendet. Trotz der hervorragenden Wirksamkeit des Polycarboxylats wurde letztlich das Lignosulfonat bevorzugt, weil es biologischen Ursprungs ist und der Maxime des möglichst vollkommen biogenen Stützmaterials besser entspricht.

Die viskositätsreduzierende Wirkung von Lignosulfonaten wurde bereits um 1920 entdeckt. Es ist der erste und bis heute der gebräuchlichste Verflüssiger [36]. Gewonnen werden sie aus Lignin, einem in verholzten Pflanzen vorkommendem Biopolymer, das für die Druckfestigkeit von Holz verantwortlich ist [38]. Lignin fällt bei der industriellen Zelluloseherstellung in einer Größenordnung von jährlich etwa 80 Mio. Tonnen an [39]. Um aus Lignin Lignosulfonat zu gewinnen, müssen eine Reihe von Aufbereitungsschritten durchlaufen werden: Zunächst werden die Moleküle mittels Enzymen und Oxidationsmitteln depolymerisiert. Anschließend wird das Zwischenprodukt mit Formaldehyd und Natriumsulfit sulfoniert, wodurch es anionisch aufgeladen und wasserlöslich wird. Das erhaltene Lignosulfonat ist eine polymere, vernetzte Struktur, für die keine allgemeingültige chemische Formel existiert [36].

Lignosulfonat hat neben seiner pflanzlichen Herkunft den Vorteil, dass es preisgünstig und umweltfreundlich ist und den pH-Wert nur unwesentlich beeinflusst [40]. Üblicherweise wird Lignosulfonat mit 0,1 % bis 0,3 % bezogen auf die Bindemittelmasse dosiert, wodurch der Wasseranteil um bis zu 15 % reduziert werden kann [38].

Abbindeverzögerer

Um die Stützmaterialrezeptur den Anforderungen des 3D-Druckprozesses gerecht zu gestalten, muss das Abbinden des Calciumsulfats verzögert werden.

Durch Erhöhung des Wassergipswerts kann der Reaktionsbeginn hinausgezögert werden, jedoch gehen mit einem höheren Wasseranteil deutlich geringere Festigkeiten einher. Zu berücksichtigen ist außerdem, dass sich die Erstarrungszeit bei einer Temperaturerhöhung des Anmachwassers reduziert [37]. Ebenfalls einen starken Einfluss auf die Erstarrungszeit hat die Konzentration von Bindemittelpartikeln, die kleiner als 0,3 mm sind. Zum Herauszügern des Erstarrungsbeginns scheint außerdem das Alter des Bindemittels beizutragen [37].

Um die Hydratation gezielt zu steuern, ist ein Abbindeverzögerer erforderlich. Erprobt sind Kolloidbildner wie Celluloseether, Casein oder Dextrin. Außerdem eignen sich amphoter wirkende anorganische Verbindungen wie Zink- und Bleioxid, vor allem aber Komplexbildner, die mit Calciumionen schwerlösliche Verbindungen bilden. Dazu zählen unter anderem

Phosphonate und verschiedene Carbonsäuren. Wegen des geringen Preises, der guten Reproduzier- und Verfügbarkeit haben sich für praktische Anwendungen Fruchtsäuren etabliert, namentlich die Weinsäure (WS). Seitens der Industrie werden zudem polymere Verzögerer angeboten, die bereits bei sehr geringen Konzentrationen in der Lage sind, den Versteifungsbeginn über Tage hinauszuzögern [37].

In Rücksicht auf die Nachhaltigkeit des Stützmaterials wurden im Laufe der Entwicklung der Mischungsrezepturen primär petrochemisch basierte Additive ausgeschlossen. Aus Sicht der ökologischen Nachhaltigkeit wurde insofern Weinsäure als Verzögerer bevorzugt. WS hat ihre Eignung in der Praxis bereits unter Beweis gestellt und ist ein besonders leistungsstarker Verzögerer [41]. Hinzu kommt, dass sie sich bei den für die Kalzinierung notwendigen Temperaturen nicht chemisch zersetzt. Ihr Schmelzpunkt liegt bei 169 °C. Hinsichtlich der Schimmelpilzresistenz des Materials wird auf eine antimikrobielle Wirkung gesetzt. Zwar erhöhen Carbonsäuren wie die WS die Porosität der Calciumsulfatmatrix und setzen deren Festigkeit herab, doch ist dies angesichts der geringen Festigkeitsanforderungen tolerierbar. Natürliche WS kommt in Weintrauben, aber auch in anderen Früchten vor. Die Salze der WS werden als Tartrate bezeichnet. So ist Kaliumhydrogentartrat, das als Weinstein bekannt ist [42], Ausgangspunkt der Weinsäureherstellung. Die Umsetzung von Weinstein zu WS erfolgt unter Verwendung von Schwefelsäure. WS ist ungiftig und als Lebensmittelzusatzstoff zugelassen [43].

In eine calciumsulfathaltige Werkstoffrezeptur eingemischt, bildet WS Calciumsalze und reduziert so die Konzentration der für die Kristallbildung erforderlichen Calciumionen. Die maßgebliche Verzögerungswirkung beruht jedoch auf der Fähigkeit, an energetisch begünstigten Positionen auf den wachsenden Kristalloberflächen zu adsorbieren und dadurch die Wachstumsgeschwindigkeit dieser Fläche zu verändern. Die Carbonsäuren adsorbieren dabei irreversibel. Das bedeutet, dass sie in das Kristallgitter eingelagert und überwachsen werden. Somit sinkt die Konzentration des Additivs im Reaktionsverlauf, sodass die Hydratation nach einer anfänglichen Verzögerung späterhin mit der gleichen Geschwindigkeit abläuft wie in einem nicht verzögerten System [37].

3.2 Untersuchung zur Austragbarkeit des Stützmaterials bei verschiedenen Düsengeometrien

Für die Untersuchungen des Einflusses der Düsengeometrie auf die Extrudierbarkeit des Stützmaterials wurden die in *Tabelle 5* aufgeführten Rezepturen verwendet. Weiterhin wurden zwei unterschiedliche Düsen verwendet: (a) eine rechteckige Düse mit einer Öffnung von 2 cm x 4 cm und einem Umlenkwinkel von 0° und (b) eine rechteckige Düse mit einer Öffnung von 2 cm x 4 cm und einem Umlenkwinkel von 90° (*Abbildung 21*).

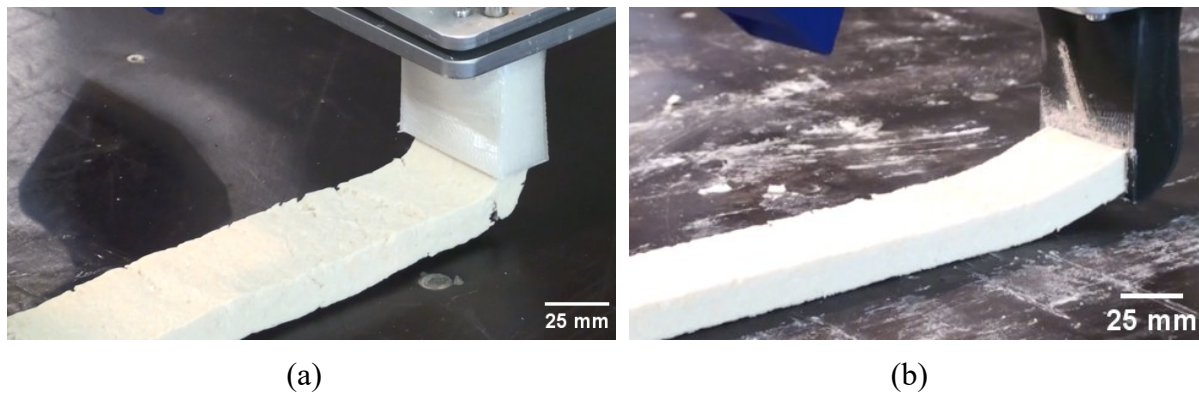


Abbildung 21: Anpassung der Düsengeometrie für die Extrusion des Stützmaterials.

Die Mischungen wurden gemäß *Kapitel 3.1* produziert. Mit Mischungsrezeptur M-1 konnte das Stützmaterial durch die Düse mit 0° Umlenkwinkel zielführend extrudiert werden. Bei der Düse mit einem Umlenkwinkel von 90° war eine Extrusion nicht möglich. Dies bedeutet, dass die durch die Umlenkung der Fließrichtung des Stützmaterials verursachten Scherkräfte das Material am Austritt aus der Düsenöffnung hinderten. Durch die Änderung des w/f-Wertes (Wasser-Feststoffgehalt, massebezogen) und die Erhöhung der Fließmitteldosierung konnten die rheologischen Eigenschaften des Stützmaterials jedoch so verändert werden, dass Extrusion mit beiden Düsen möglich wurde.

In *Abbildung 21* ist ebenfalls zu sehen, dass die Geometrie der Düse einen Einfluss auf die Qualität der einzelnen Schichtlagen ausüben kann. So wird das extrudierte Materialgefüge bei Verwendung einer Düse mit 0° Umlenkwinkel durch die aus der horizontalen Ablage resultierende Biegung der Schicht inneren Spannungen ausgesetzt. Die entstehenden Spannungen verursachen eine Rissbildung, welche als Stückelung der Schicht vorstellbar ist. Zwar wird das Material bei einer Düse mit 90° Umlenkwinkel gleichsam umgeformt und für eine horizontale Ablage vorbereitet, doch geschieht dies ohne sichtbare Rissbildung im ausgebrachten Strang. Die Umlenkung des Materials direkt im Innenraum der Düse komprimiert das Material und beseitigt mögliche Diskontinuitäten im Querschnitt.

Im Zuge des 3D-Drucks des Stützmaterials offenbarten sich einige prozessspezifische Herausforderungen. So konnte das Stützmaterial den induzierten Verformungen nicht widerstehen, woraus Fehlstellen wie in *Abbildung 22* und *Abbildung 23* folgten.



Abbildung 22: Diskontinuitäten im Querschnitt des 3D-gedruckten Stützmaterialfilaments.

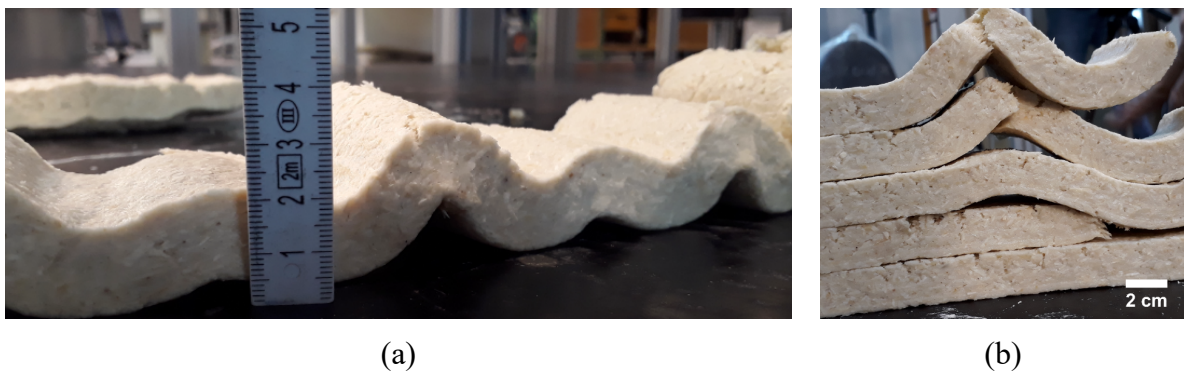


Abbildung 23: Steuerungstechnische Herausforderungen beim 3D-Druck von Stützmaterial: (a) Verwölbung der Schichten, (b) Anhäufung der Fehler.

In dem Fall, dass die Geschwindigkeit des Druckkopfs nicht der Förderrate des Stützmaterials entspricht, ist eine Vorwölbung der Schicht zu erwarten. Beim 3D-Druck von Beton ist eine Diskrepanz zwischen Druckkopfgeschwindigkeit und Förderrate des Extruders weniger relevant, da sich unter dem Eigengewicht der Schichten die Unebenheiten ausgleichen. Beim Stützmaterial stellt die Vorwölbung eine große Beeinträchtigung dar und muss daher vermieden werden. Die Fehlstellen in den einzelnen Schichtlagen addieren sich auf und gefährden die Stabilität der gesamten Struktur. Wie bereits in *Kapitel 2.2* beschrieben, stellt das Beenden des Druckprozesses besondere Anforderungen an die Anlagentechnik. *Abbildung 23b* stellt die Anhäufung von Fehlstellen im Endbereich eines Probekörpers dar. Durch die Implementierung des in *Kapitel 2.2*, *Abbildung 11* beschriebenen Geschwindigkeitsprofils für den Druckkopf und die Förderrate des Extruders soll dieses Problem behoben werden. Beim 3D-Druck des Stützmaterials kann die Diskrepanz zwischen der Bewegungsgeschwindigkeit des Druckkopfs und der Förderrate des Extruders das Verschieben bereits abgelegter Filamentbereiche hervorrufen. Wie in *Abbildung 24* dargestellt, bewegt sich die Schicht durch fehlende Haftung zum Untergrund und einer Diskrepanz zwischen Bewegungsgeschwindigkeit des Druckkopfs und Förderrate am Boden entgegen der Bewegungsrichtung des Druckkopfes nach vorn.

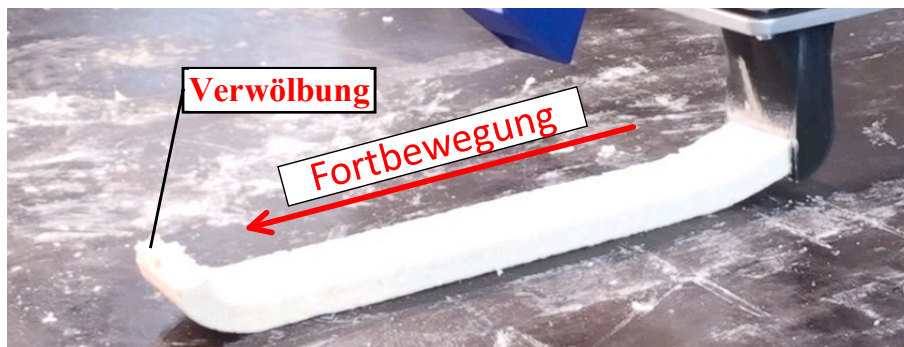


Abbildung 24: Materialbedingte Herausforderungen beim 3D-Druck der Holz-Stärke-basierten Stützmaterialien: Fortbewegung des Filaments entgegen der Bewegungsrichtung des Druckkopfs.

3.3 Untersuchung des Quell- und Schwindverhaltens sowie der Oberflächenbeschaffenheit des Stützmaterials während des Konsolidierungsvorgangs

Das Schwinden eines Wertstoffs bezeichnet seine Volumenabnahme infolge von physikalischer Austrocknung oder chemischen Reaktionen im Materialgefüge. Das Schwinden von Baustoffen ist für die Maßhaltigkeit in der Bauteilherstellung ausschlaggebend. Daher wurden in den Laborversuchen nach Eintreten einer hinreichenden Grünstandfestigkeit je drei prismatische Probekörper pro Rezeptur mit den Maßen 40 mm x 40 mm x 160 mm hergestellt. Die Längen der Proben wurden über sieben Tage hinweg mindestens täglich durch vier Messungen ermittelt und der Mittelwert dokumentiert. Die Proben wurden sonnengeschützt unter Raumklimabedingungen gelagert. Von Interesse war neben dem Schwindmaß nach sieben Tagen auch die zeitliche Entwicklung der Volumenabnahme, wozu aus den Wertepaaren eine geeignete Regression berechnet wurde. Kennzahl für die Zuverlässigkeit dieses mathematischen Modells war das Bestimmtheitsmaß.

Tabelle 10: Versuchsschema zur Charakterisierung des Schwindverhaltens.

Kurzbeschreibung	<input type="checkbox"/> Gewinnung von drei Prüfkörpern 40 mm x 40 mm x 160 mm <input type="checkbox"/> Vermessung der Länge
Versuchszeitpunkt	<input type="checkbox"/> Beginn mit Erreichen der Grünstandfestigkeit <input type="checkbox"/> dann mindestens viermal täglich
Versuchsdauer	<input type="checkbox"/> sieben Tage
Messgrößen	<input type="checkbox"/> Datum, Uhrzeit <input type="checkbox"/> Mittelwert aus mindestens vier Messungen der Probekörperlänge
Kennzahl	<input type="checkbox"/> tägliches Schwindmaß $\alpha_{S,t} = \frac{l_0 - l_t}{l_0 * t} \quad (4)$ <input type="checkbox"/> Bestimmtheitsmaß der Regression

Die Datenreihen der drei Prismen wurden in einem Diagramm zusammengefasst und jeweils mit einer linearen Regressionsfunktion angenähert. Das in Anhang A.3 dokumentierte Bestimmtheitsmaß errechnet sich aus dem mittleren Anstieg der Regressionsfunktionen multipliziert mit einem Zeitraum von sieben Tagen. *Abbildung 25* zeigt beispielhaft die Messergebnisse von drei Probekörpern der Rezeptur M-16.

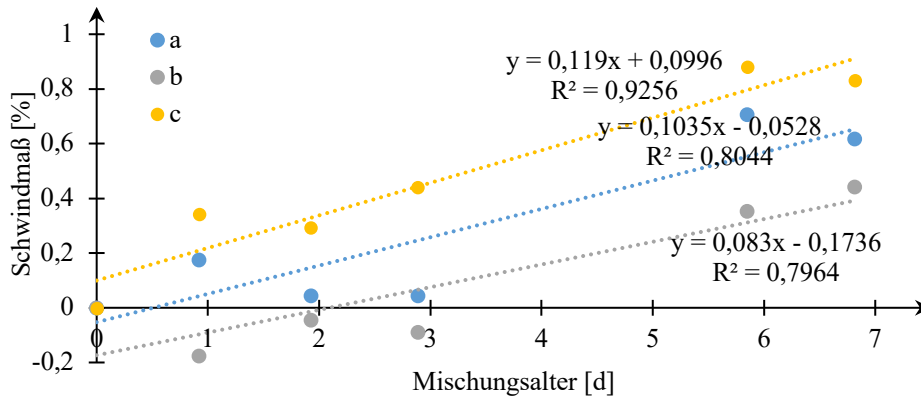


Abbildung 25: Schwindmaß von drei Probekörpern der Rezeptur M-16.

Das Schwindmaß als arithmetisches Mittel aus 0,12 %/d, 0,10 %/d und 0,08 %/d beträgt 0,1 %/d, sodass binnen der ersten sieben Tag das Schwinden 0,7 % beträgt.

Ein Signifikanzniveau von 5 % ist von keinem Faktor eingehalten. Die niedrigsten Irrtumswahrscheinlichkeiten werden dem Calciumsulfat (p = 10,0 %), den C100-Partikeln (p = 11,2 %), der Stärke (p = 13,3 %) und dem Guarkernmehl (p = 13,9 %) zugeschrieben. Daher werden für diese vier Faktoren Regressionskoeffizienten berechnet:

$$\alpha_{s,7d} = (0,518 - 0,109 \cdot c_{Stärke} + 0,141 \cdot c_{C100} - 0,039 \cdot c_{CaSO_4} + 3,75 \cdot c_{Guar}) \cdot 1 \% \quad (5)$$

Folglich wirken Stärke und Calciumsulfat dem Schwinden entgegen, während Guarkernmehl und die C100-Partikel das Schwinden begünstigen. Erklärlich wird dies aus dem hohen Wasseraufnahmevermögen der beiden zuletzt genannten Materialien. Sie quellen nach dem Mischen, bevor sie beim Austrocknen das Wasser wieder abgeben und dabei schwinden. Wie *Abbildung 26* zeigt, bildet das Regressionsmodell den Zusammenhang treffend ab ($R^2 = 0,94$).

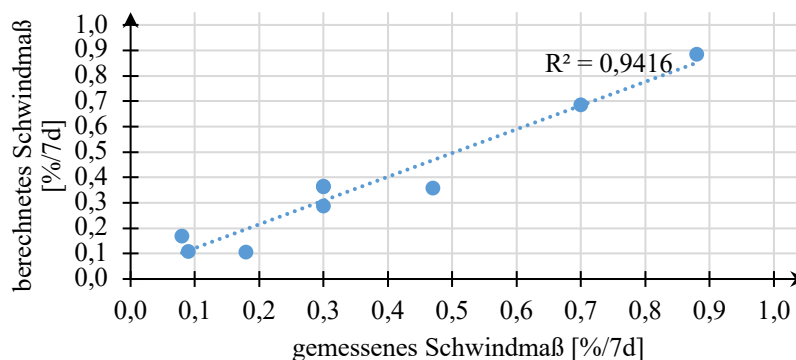


Abbildung 26: Qualität der Schwindmaßregression anhand der Gegenüberstellung von berechnetem und gemessenem Schwindverhalten binnen sieben Tagen.

Anders als bei der Untersuchung des Austrocknungsverlaufs wird das Schwindmaß nicht über eine Mittelung von Regressionsfunktionen bestimmt. Der Grund dafür ist die größere Streuung

der Messdaten. Da sich jedes Schwindmaß auf eine Nullmessung bezieht, diese aber ebenfalls statistischen Einflüssen unterworfen ist, werden für einzelne Probekörper durchweg negative Ergebnisse ermittelt. Folglich ist ein einzelner Ausreißer der Längenmessung nach unten am Anfang der Messreihe Grund für die Verschiebung. Ohnehin dient lediglich das tägliche Schwindmaß als Anstieg einer linearen Regression als Kennzahl. Somit ist eine Korrektur der Messdaten nicht erforderlich. Es wird in gleicher Weise vorgegangen wie bei der Auswertung des statistischen Versuchsfelds.

Tabelle 11 stellt die gemessenen Kennzahlen der Referenzrezeptur M-4-Ref und der verbesserten Rezeptur M-17 gegenüber. Zu erwähnen ist, dass es mit der statistischen Versuchsplanung möglich war, den Verlauf des Schwindens für die M-17-Rezeptur abzubilden. Das mittlere Bestimmtheitsmaß der Anpassungen liegt bei $R^2 = 0,867$, wobei für keinen Probekörper das Bestimmtheitsmaß unter 0,75 fällt. Das tägliche Schwinden beträgt durchschnittlich 0,034 %/d. Die Verteilung der Messwerte definiert eine Standardabweichung von 0,005 %/d, sodass sich ein Variationskoeffizient von 14,4 % ergibt. Dieses Streumaß ist als fraglich zu bewerten, da nur tägliche Schwindmaße der Stufen von 0,03 %/d und 0,04 %/d auftraten. Da der Erwartungswert zwischen diesen beiden Stufen liegt, neigt der Variationskoeffizient zu einer Überschätzung der Streuung.

Das Regressionsmodell des statistischen Versuchsfelds sagte ein Schwinden binnen sieben Tagen von 0,64 %/7d voraus. Das tatsächliche Materialverhalten blieb mit 0,24%/7d deutlich unter dieser Prognose. Im Vergleich dazu unterliegt das Schwinden von M-4-Ref einer breiteren Streuung. Zwei Datenreihen, deren Bestimmtheitsmaße kleiner als 0,5 sind, wurden daher von der Auswertung ausgeschlossen. Aus den übrigen Werten ergibt sich ein Bereich von 0,03 %/d bis 0,06 %/d. Der Mittelwert liegt mit 0,043 %/d über dem der Rezeptur M-17. Zudem lassen eine Standardabweichung von 0,013 %/d und ein Variationskoeffizient von 29,8 % eine Varianz der Messwerte zweifelhaft erscheinen. *Tabelle 11* zeigt, dass die Rezepturoptimierung von M-4-Ref hin zu M-17 das Schwinden um 21 % reduzierte.

Tabelle 11: Zusammenstellung der Kennzahlen des Schwindens und deren statistische Verteilung für die Rezepturen M-17 und M-4-Ref.

Rezeptur	M-17	M-4-Ref
Prognose aus Regressionsmodell	0,64 %/7d	-
tatsächliches Schwinden nach sieben Tagen	0,24 %/7d	0,30 %/7d
tägliches Schwindmaß	0,034 %/d	0,043 %/d
Standardabweichung	0,005 %/d	0,013 %/d
Variationskoeffizient	14,4 %	29,8 %

3.4 Untersuchung der Lagerfähigkeit des Stützmaterials

3.4.1 Stützmaterial mit Zugabe von Stärke

Die Festigkeitseigenschaften einer Stützstruktur beim 3D-Druck von Beton müssen nur temporär den Anforderungen genügen, da die Strukturen bereits nach kurzer Zeit wieder entfernt werden. Längerfristige Eigenschaften sind nur aus Gründen der Recyclingfähigkeit wichtig. Aus physikalischen und chemischen Gründen ist es unproblematisch, das auf Holzstärke basierende SM aufzulösen, es erneut mit frischem Wasser aufzubereiten und vollständig zu recyceln. Die Konsolidierung und Verfestigung dieser Art von SM basiert auf einem rein physikalischen Prozess, der die Chemie der beteiligten Substanzen auf molekularer Ebene nicht verändert.

Allerdings wurde 24 Stunden nach der SM-Produktion ein sehr intensives Pilzwachstum beobachtet. *Abbildung 27* zeigt den gedruckten wandartigen Probekörper des Stützmaterials und eine Aufnahme der Pilzsporen im Rasterelektronenmikroskop. Der Probekörper wurde unter einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % bis 70 % bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C bis 25 °C aufbewahrt. Anzumerken ist, dass nur eine Seite des wandartigen Probekörpers der freien Luftzirkulation ausgesetzt war (rechte Seite des Probekörpers in *Abbildung 27*) und die andere Seite gegen einen Holzbalken gelehnt war, der die freie Luftzirkulation verhinderte (linke Seite in *Abbildung 27*). Die mikroskopischen Aufnahmen deuten auf die Bildung des „Schwarzen Mehltaus“ hin, der auch als Aspergillose oder Schwarzer Schimmel bezeichnet wird. Es wurde berichtet, dass diese Aspergillose-Spezies in einigen Fällen beim Menschen schwere Lungenerkrankungen verursacht haben [44].

Ausgehend von der wahrscheinlich sehr schädlichen Wirkung der Pilzsporen auf die menschliche Gesundheit soll daher vor der praktischen Anwendung von Stützmaterialien auf Holzstärkebasis die Wirksamkeit von Fungiziden erforscht werden.

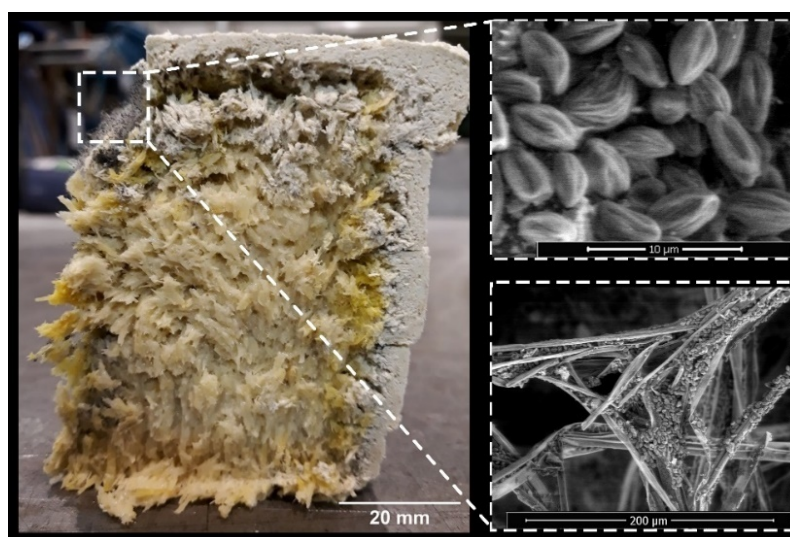


Abbildung 27: Pilzbildung im 3D-gedruckten wandartigen Probekörper des Stützmaterials M-3: Links Foto des aufgeschnittenen Probekörpers, rechts Aufnahmen von Pilzsporen im markierten Bereich mittels Rasterelektronenmikroskop.

Die Referenzmischung des M-1 hatte ihre guten Fließeigenschaften einem hohen Wasseranteil von 70 Gew-% (Gewichtsmassenprozent) zu verdanken (siehe *Tabelle 3*). Um die notwendige Konsistenz zu erreichen, wurde demgegenüber bei M-2 und M-3 ein Fließmittel zugegeben. Allerdings müssen beim Trocknen sowohl das chemisch in der Stärke als auch das physikalisch im Gesamtmaterial gebundene Wasser herausdiffundieren, damit das Stützmaterial eine ausreichende Festigkeit erreicht. Das erfordert längere Trocknungszeiten oder einen intensiven Energieeintrag. Dies betrifft alle drei Mischungen M-1, M-2 und M-3. Das Stützmaterial muss jedoch schnellstmöglich nach der Austragung mechanisch auf Druck voll belastbar sein, um die resultierende Last aus den folgenden Schichten abtragen zu können. Die Zeitspanne bis zur Belastung durch die folgende Schicht hängt sowohl von der Geometrie des Gebäudes als auch der Druckgeschwindigkeit ab, beträgt unter Umständen aber nur wenige Minuten.

Die eigentliche Festigkeitsentwicklung des Holz-Stärke-basierten Stützmaterials setzt durch das Verdunsten des Wassers ein. Im Verlauf der Materialentwicklung wurden verschiedene Möglichkeiten zur Trocknungsbeschleunigung in Betracht gezogen, z.B. Ventilation mit Luft oder der Einsatz von Infrarotstrahlern. Die durchgeführten Versuche zeigten, dass eine erhöhte Luftzirkulation die Festigkeit des Stützmaterials deutlich erhöhen kann (siehe *Kapitel 4.1*). Erstrebenswert erschien jedoch im Zuge der Forschungsarbeit eine Methode, bei der die Festigkeitserhöhung ohne zusätzlichen Energieeintrag gewährleistet werden kann. Zusätzlich führte die Gefahr der Schimmelpilzbildung zu der Überlegung, die Stärke in der Rezeptur des Stützmaterials durch Calciumsulfat- β -Halbhydrat zu ersetzen. Dies sollte eine chemische Trocknung bewirken die Einstellbarkeit der Festigkeitsentwicklung ermöglichen. Die Hydratation des Halbhydrats sollte nach dem Ablegen des Extrudats einsetzen und dem Werkstoff das überschüssige Wasser entziehen.

3.4.2 Stützmaterial mit Zugabe von Calciumsulfat

Die Lagerungsfähigkeit der Stützmaterialien mit Calciumsulfat wurde ebenfalls untersucht. Dabei wurde zwischen einer Innenraumlagerung im Labor unter kontrollierten, konstanten Umgebungsbedingungen und einer Lagerung im Außenbereich unterschieden. Die Probekörper in der Außenlagerung waren wechselnden Witterungsbedingungen, unter anderem Regen, ausgesetzt (Klimabedingungen während der Versuchszeit siehe Anhang A.1).

Im Zeitraum von sieben Tagen zeigten die im Innenraum gelagerten Probekörper keine Auffälligkeiten. Allerdings waren nach sieben Tagen auf den Probekörpern der Rezepturen M-14, M-15, M-16 und M-21 vereinzelt graue, über die Oberfläche verteilte Punkte zu sehen, die auf einen mikrobiellen Befall hindeuteten. Am stärksten trat diese Erscheinung auf dem Probekörper der Rezeptur M-15 auf (*Abbildung 28*).

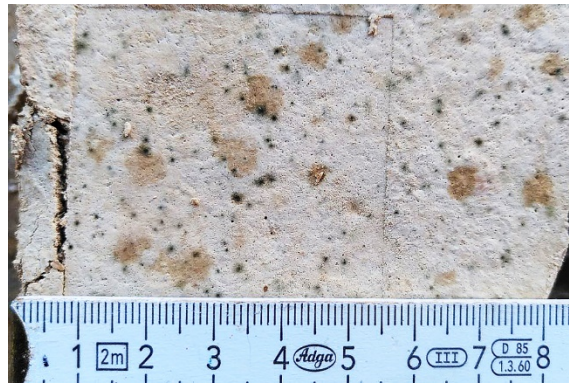


Abbildung 28: Schimmelbefall bei Rezeptur M-15.

Weiterhin wurde bei allen Proben im Verlauf der Austrocknung eine oberflächliche braune Verfärbung beobachtet. Besonders dunkel fiel diese an Ecken und Kanten auf. Zu bemerken ist, dass von diesem Phänomen nur Oberflächen betroffen waren, die als Kontaktfläche zur Unterlage dienten. Die Behinderung der Austrocknung scheint die Schimmelbildung zu begünstigen. Auch wurde festgestellt, dass ein hoher Wassergehalt das Schimmelpilzwachstum fördert.

Den Versuchsaufbau der Freibewitterungsversuche zeigt *Abbildung 29*. Das extrudierte Stützmaterial wurde in Holzrahmen platziert, sodass nur die großen Seitenflächen unbedeckt blieben. Damit sollte die Einbausituation einer Stützstruktur nachempfunden werden. Die Probekörper des Stützmaterials für die Freibewitterungsversuche hatten die Abmessungen 25 cm x 10 cm x 20 cm (Länge x Breite x Höhe). Zum Zeitpunkt der Untersuchungen konnten nur Stränge mit einer Breite von 5 cm extrudiert werden. Deswegen wurden zwei wandartige Probekörper nebeneinander angeordnet, sodass die Gesamtbreite des Probekörpers 10 cm entsprach. Die so vorbereiteten Körper wurden im Außenbereich für mindestens vier Wochen der Bewitterung ausgesetzt. Dabei sollten neben Informationen zur Schimmelpilzresistenz auch mögliche andere Effekte detektiert werden, die die baupraktische Anwendung beeinträchtigen können.



Abbildung 29: Freibewitterungsversuch für die Stützmaterialrezepturen M-4-Ref und M-25.

Im Freibewitterungsversuch konnte bereits nach 24 Stunden eine bräunliche Verfärbung der Probenoberflächen beobachtet werden. Darüber hinaus war oberflächlich Schimmelpilz in Form von grauen bis schwarzen Punkten zu sehen (*Abbildung 30*). Ein Befall bei Proben der gleichen Mischungen im Innenraum trat nicht auf. Das Schimmelpilzwachstum wurde stets mit zwei bis vier Tagen Verzögerung nach einem Niederschlagsereignis sichtbar.

Nach anhaltendem Regen wies die Oberfläche des Probekörpers der Rezeptur M-4-Ref gewisse Ausspülungen auf (*Abbildung 31*).

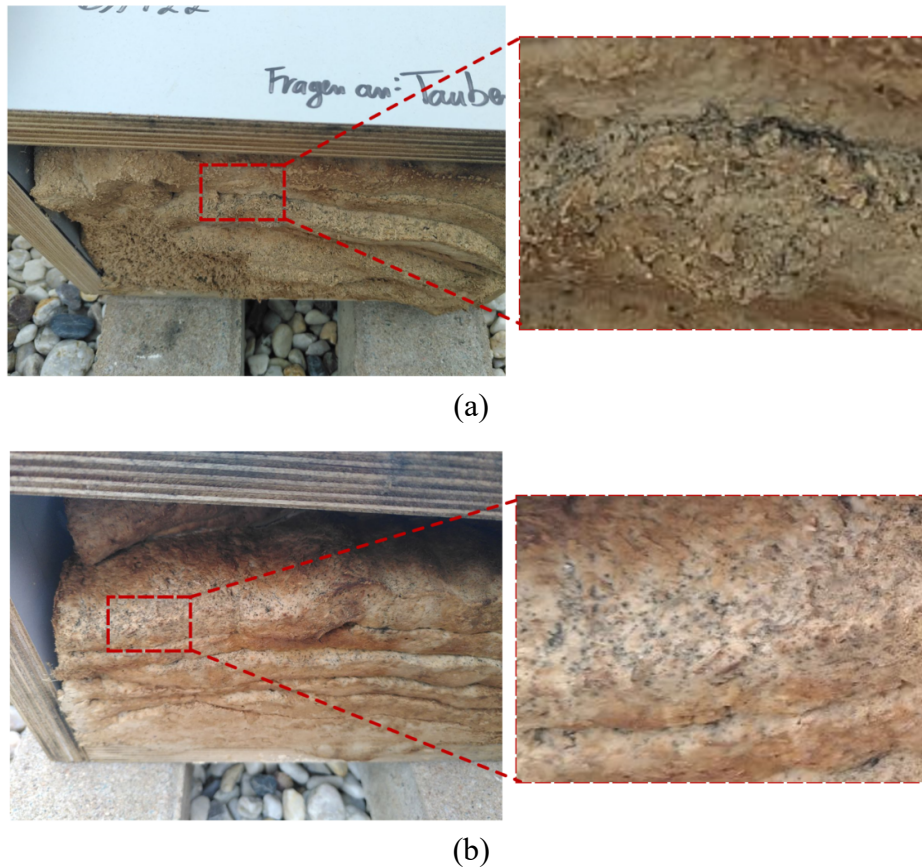


Abbildung 30: Beispielhafte Schimmelpilzbildungen bei Stützmaterialprobekörpern, die der freien Bewitterung ausgesetzt waren.

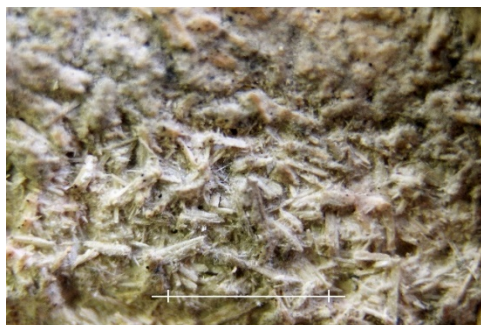


Abbildung 31: Ausgespülte Gipsmatrix einer horizontalen Oberfläche infolge Niederschlagseinwirkung.

3.5 Untersuchung des Zusammenhangs zwischen verschiedenen konstruktiven Stützmaterialgestaltungen, den erreichbaren Festigkeiten und dem Konsolidierungsverhalten

Neben der Ermittlung der maximal erreichbaren Festigkeit des Stützmaterials im getrockneten Zustand war zum Nachweis der Standfestigkeit während des Bau- bzw. Druckprozesses das Konsolidierungsverhalten (die Festigkeitsentwicklung in Abhängigkeit der Trocknungsdauer) des Stützmaterials zu ermitteln. Zur Ermittlung der Festigkeitseigenschaften wurden Prüfwürfel mit einer Kantenlänge von 4 cm aus den Bruchstücken des Biegeversuchs gewonnen. In der Universalprüfmaschine wurden sie bis zum Versagen belastet. Die maximal aufgenommene Druckkraft wurde durch die Querschnittsfläche von 1600 mm² geteilt, um die Druckfestigkeit als gewünschte Kennzahl zu erhalten. Bevor die Einflüsse auf die gemessenen Festigkeiten quantifiziert werden, sei das Versagensverhalten qualitativ beschrieben. Zu Beginn steigt die aufgenommene Druckspannung verzögert mit der Stauchung. Daran schließt sich ein Abschnitt mit einem linearen Anstieg der Spannung an, bevor die Kurve flacher wird. Nach dem Erreichen des Maximums nimmt die Druckspannung kontinuierlich ab (*Abbildung 32*). Ein sprunghafter Spannungsabfall nach dem Erreichen der Druckfestigkeit tritt nicht auf. Dabei wurden stets Bruchbilder beobachtet, die DIN EN 12390-3:2019 „zufriedenstellend“ nennt (*Abbildung 33*).

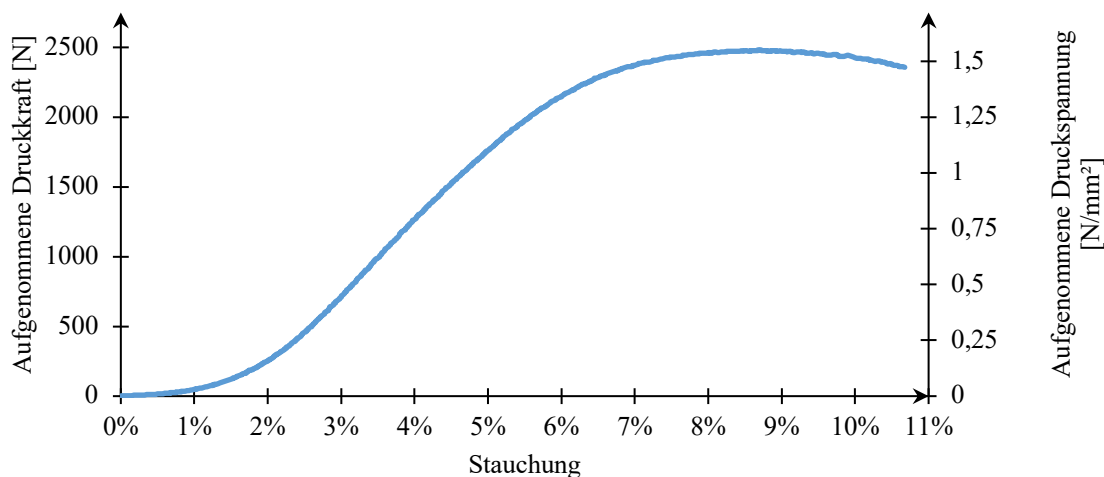


Abbildung 32: Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines Druckversuchs an der Rezeptur M-20.



Abbildung 33: Bruchbild eines Druckversagens.

Aus den geschilderten Beobachtungen kann geschlossen werden, dass der Werkstoff nicht spröde versagt, sondern infolge der Lasteinwirkung irreparable Gefügeschäden auftreten. Da Gipswerkstoffe eine große Porosität ausbilden, liegt die Erklärung nahe, dass die Matrix während der Belastung an zahlreichen Stellen lokal versagt und so das Porenvolumen zusammengedrückt wird.

Die aus drei bis sechs Einzelversuchen je Rezeptur gemittelten Druckfestigkeiten liegen zwischen 0,13 N/mm² für M-15 und 1,61 N/mm² für M-17. Die statistische Auswertung beginnt wiederum mit einer Varianzanalyse. Auch mit Blick auf die Druckfestigkeit gibt es keine Einflussfaktoren, die das Signifikanzniveau von 5 % erfüllen. Dem am nächsten kommen das Wasser ($p = 6,6 \%$) und das Calciumsulfat ($p = 12,4 \%$). Beide Faktoren werden in die multiple lineare Regression einbezogen, die folgendes Ergebnis hat:

$$f_c = 2,297 - 0,062 \cdot c_{Wasser} + 0,061 \cdot c_{CaSO_4} \quad (6)$$

Folglich steigt die Druckfestigkeit mit dem Bindemittel- und sinkt mit dem Wassergehalt. Die Regressionsfunktion mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,91$ ist bezüglich des Zusammenhangs zwischen berechneten und gemessenen Werten als brauchbar einzuschätzen (Abbildung 34).

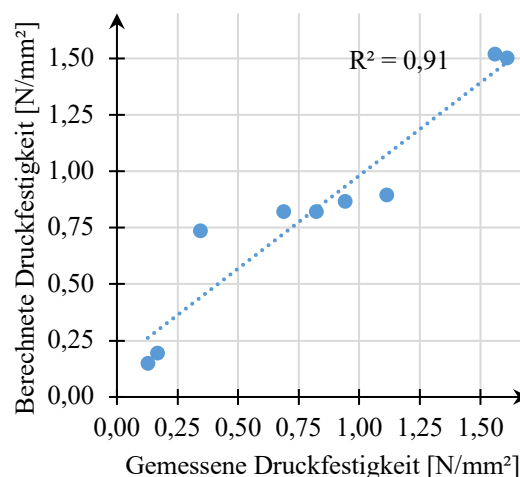


Abbildung 34: Qualität der Druckfestigkeitsregression anhand der Gegenüberstellung berechneter und gemessener Daten.

Zur Ermittlung der zeitlichen Festigkeitsentwicklung wurden Datensätze anhand zyklischer Druckprüfungen gewonnen. Zunächst müssen daraus die lokalen Lastmaxima je Belastung ermittelt werden. Diese ergeben über die Prüffläche normiert und über das Mischungsalter abgetragen den Verlauf der zeitlichen Festigkeitsentwicklung.

Bei beiden Materialien fallen teils starke Ausreißer auf. Das ist mit dem Verschieben des Ablagebretts in der Prüfmaschine nach jeder Belastung zu erklären. Kleine Unebenheiten in der Probenoberfläche haben offenbar einen starken Einfluss auf die Messungen. Da die tatsächliche Prüffläche immer kleiner ist als die Bezugsfläche der gemessenen Kraft, unterschätzt der Versuchsaufbau die tatsächlichen Eigenschaften. Die Ergebnisse liegen auf der sicheren Seite.

Aus diesem Grund und weil spontane Abnahmen der Festigkeit mit den Abläufen der Calciumsulfathydratation nicht zu erklären sind, werden die Kurven geglättet. Dazu werden Messpunkte, die aus der grafischen Darstellung als Ausreißer identifiziert wurden, mittels linearer Interpolation der nächstliegenden belastbaren Wertepaare ersetzt. Im Anschluss ergab eine aus den beiden bereinigten Verläufen gemittelte Kurve die repräsentative zeitliche Festigkeitsentwicklung (*Abbildung 35*).

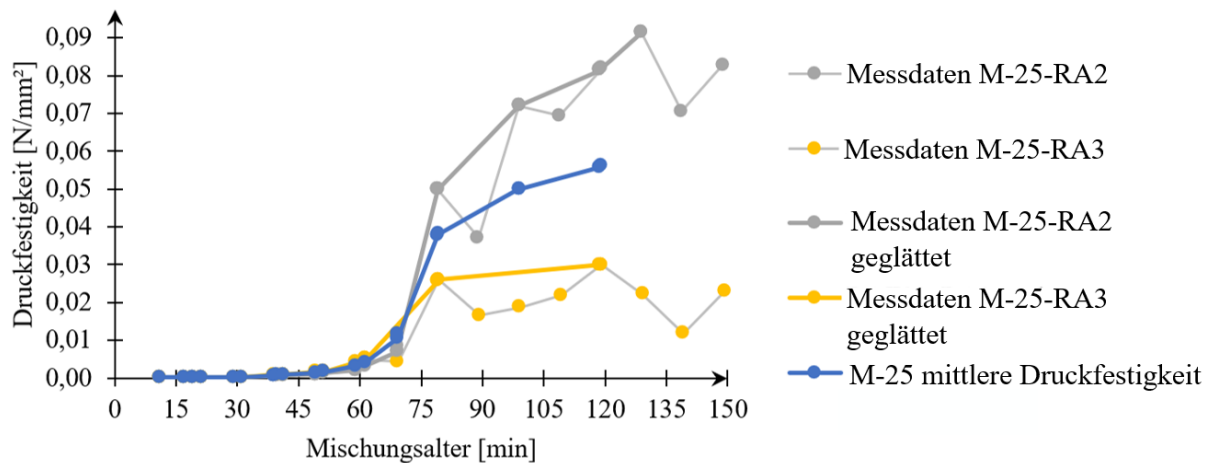


Abbildung 35: Gemessene, geglättete sowie gemittelte Verläufe der zeitlichen Festigkeitsentwicklung der Rezeptur M-25.

Das Diagramm zeigt ein Auseinanderlaufen der Festigkeiten. Der Variationskoeffizient beträgt für die Festigkeit nach zwei Stunden 46,4 %. Die Diskrepanz ist auf unterschiedlich große Prüfflächen zurückzuführen. Zu erkennen ist dennoch eine gute Deckung der Daten im Bereich des Ansteifens. Hier kommt es während der Belastung zu einer stärkeren plastischen Verformung, sodass sich das Material der Belastungsfläche anpasst und die Streuung geringer ausfällt.

Zu erwähnen ist dass, die Festigkeitszuwachs in der eingestellten Verarbeitungszeit von 60 min vernachlässigbar klein ist, siehe *Abbildung 36*. In den anschließenden 20 min findet eine Festigkeitssteigerung von 1.200 % statt, bevor die Kurve flacher wird. Der anschließende Festigkeitsverlauf kann wegen fehlender Aussagekraft der Daten nicht beschrieben werden. Zu erwarten ist ein ähnlicher Kurvenverlauf, wie er für die Rezeptur M-25 beschrieben wurde.

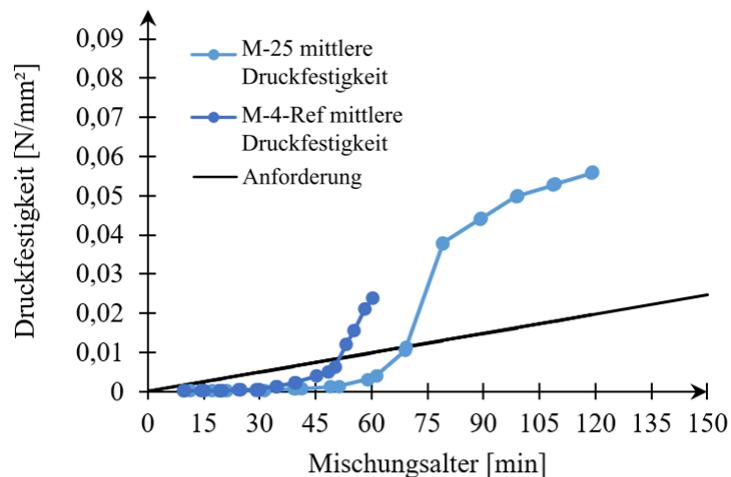


Abbildung 36: Zeitlicher Verlauf der Druckfestigkeiten der Rezepturen M-25 und M-4-Ref.

Von Interesse für die baupraktische Eignung ist die Frage nach der zeitlichen Festigkeitsentwicklung. Diese wurde zu $0,164 \text{ kPa/min}$ berechnet. Der Schnittpunkt der Festigkeits- mit der Anforderungskurve markiert den Zeitpunkt, ab dem der Lastabtrag nachfolgender Schichten sichergestellt ist. In *Abbildung 36* ist deutlich zu erkennen, dass die Frischmaterialien der Druckfestigkeitsanforderung nicht gewachsen sind. Die Anforderungsgerade schneidet die Festigkeitsverläufe jeweils erst nach erfolgtem Ansteifen. Für die Rezeptur M-25 ist das Kriterium nach $69,4 \text{ min}$ erfüllt, für die Rezeptur M-4-Ref nach $51,4 \text{ min}$ (*Tabelle 12*).

Tabelle 12: Zusammenstellung zu Kennzahlen der zeitlichen Festigkeitsentwicklung und deren statistischer Verteilung für die Rezepturen M-25 und M-4-Ref.

Materialparameter	M-25	M-4-Ref
Ersteifungsbeginn	60 min	40 min
Erhärtung	80 min	60 min
Festigkeitszunahme zwischen Ersteifungsbeginn und Erhärtung	1.200 %	1.056 %
Erreichen der Festigkeitsanforderung	69,4 min	51,4 min

Zu berücksichtigen ist bei der Interpretation dieser Ergebnisse, dass das Materialverhalten und die zeitliche Festigkeitsentwicklung im Regelfall nicht den gleichen zeitlichen Bezugspunkt haben. Während die Zeitnahme des Mischungsalters mit dem Abschließen des Mischprotokolls beginnt, bezieht sich die zeitliche Festigkeitsanforderung auf den Zeitpunkt, zu dem der betrachtete Probekörper extrudiert wurde. Der Abszissenabschnitt der Anforderungsfunktion ist für anwendungsorientierte Betrachtungen um die Dauer der Materialförderung nach rechts zu verschieben. Insofern ist die Analyse der zeitlichen Festigkeitsentwicklung zielführend für die vergleichende Charakterisierung der Materialeigenschaften und die Planung von Prozessabläufen.

Der zeitliche Hydratationsverlauf wurde mit zwei Verfahren untersucht, durch zyklische Druckbelastungen sowie mittels des modifizierten Vicat-Versuchs [45]. Die *Abbildung 37* bestätigt zunächst das bisherige Ergebnis, dass die Hydratation der Rezeptur M-4-Ref früher einsetzt als bei der Rezeptur M-25. Auch die Verhältnisse aus dem gemessenen Maximum der Scherfestigkeit und der Druckfestigkeit vor dem Abflachen der Festigkeitszunahme sind zwischen den Rezepturen vergleichbar. Kritisch ist jedoch der zeitliche Versatz zwischen den Kurven beider Messverfahren für die gleiche Rezeptur.

Daher gilt zusammenfassend, dass die zyklischen Druckprüfungen das praxisrelevante Materialverhalten besser abbilden können. Die Vorzüge des modifizierten Vicat-Versuchs sind das kontinuierliche Messverfahren, wodurch eine nahezu beliebige zeitliche Auflösung realisiert werden kann. Zudem folgt daraus eine geringere Sensitivität einzelner Messungen gegen Störeinflüsse, sodass eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse gegeben ist.

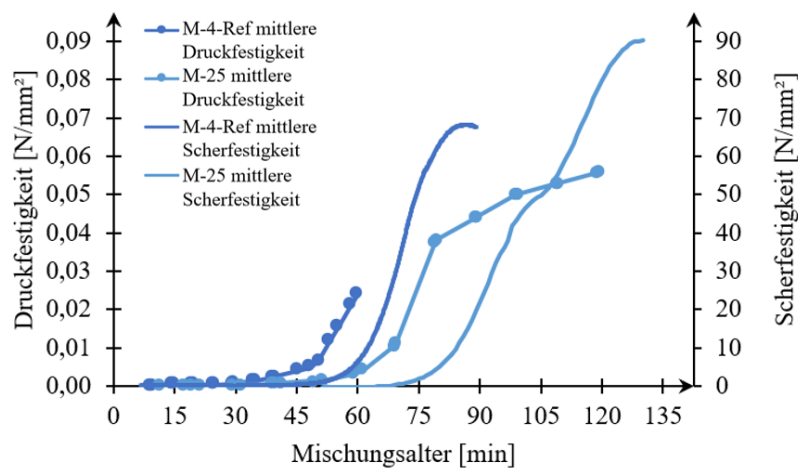


Abbildung 37: Gegenüberstellung von Druckfestigkeits- und Scherfestigkeitsverläufen der Rezepturen M-25 und M-4-Ref.

4 Prozess- und Anlagenentwicklung für kontinuierliches Betondrucken mit Stützmaterial

4.1 Entwicklung und Aufbau einer Fördereinheit für das Stützmaterial, integriert in einen Betondruckprozess

Die Förderung des Stützmaterials bis zur Einbaustelle und die anschließende schichtweise Ablage ist entscheidend für das Gelingen der automatisierten Bauweise. Für eine erfolgreiche Integration des Stützmaterials in einen Betondruckprozess muss das Stützmaterial problemlos bis zum Druckkopf förderbar sein. Diese Förderung des Stützmaterials kann entweder wie beim Frischbeton durch Pumpen oder durch eine alternative Methode erfolgen, z.B. Anlieferung über eine Förderbahn. Weiterhin muss der Druckkopf eine ungestörte Materialablage ermöglichen. Darunter wird ein stetiges Austreten des Stützmaterials aus der Düse mit einer kontrollierbaren Förderrate verstanden. Weiterhin soll der Materialaustritt durch die Düsenöffnung bei einem minimalen Energieverbrauch und einer minimalen Maschinenabnutzung stattfinden. Diese Anforderungen an

den Druckkopf und seine Eigenschaften werden unter dem Begriff Extrudierbarkeit zusammengefasst [46]. Für die Untersuchungen zum kontinuierlichen 3D-Druck von Beton wurden folgende Methoden für den Einbau des Stützmaterials analysiert:

1. Extrusion des Stützmaterials mittels einer Exzentrerschneckenpumpe,
2. Extrusion des Stützmaterials mittels einer einfachen Schneckenpumpe,
3. Extrusion des Stützmaterials mittels eines Kolbenextruders.

In *Abbildung 38a* ist die einfache Schneckenpumpe dargestellt. Der Materialtransport mittels Schneckenförderung ist eine der ältesten Förderungsmethoden [47]. Die Konstruktion von Schneckenpumpen ist relativ einfach. Die Aufgabe der Schnecke besteht darin, das Material zu fördern, zu komprimieren und durch eine kleine Düsenöffnung zu extrudieren. Die Bedingungen zum Bewegen des Materials durch die Schnecke sind eine ordnungsgemäße Durchflussrate und das Vermeiden von Materialanhaftungen an der Oberfläche der Schnecke. Das Förderprinzip beruht auf einer Gewindewirkung. Die Schnecke kann als Schraube interpretiert werden, die sich durch das Fördergut im Sinne einer rotationsbehinderten, jedoch in Längsrichtung beweglichen Mutter dreht und diese zu einer linearen Bewegung zwingt. Schneckenförderer kommen üblicherweise in offenen Trögen zum Einsatz, bilden also drucklose Systeme [47]. Die Schneckenförderer können zusätzlich Aufgaben eines Mischers übernehmen und lassen sich wegen ihrer kompakten Bauweise technisch unaufwendig in Anlagen integrieren. Nachteilig sind ein großer Reibungsverlust und der Verschleiß infolge der Reibung des Fördergutes an Trog und Schnecke. Eine Anpassung an die Spezifikation des Förderguts ist möglich, wenn die Schneckengeometrie modifiziert wird.

Abbildung 38b zeigt eine Exzentrerschneckenpumpe. Bei einer Exzentrerschneckenpumpe entspricht die Drehachse des Rotors nicht der Symmetrieachse des gesamten Systems. Der Rotor dreht sich „exzentrisch“ [48]. Der Innenraum der Exzentrerschneckenpumpe ist mit kleinen Hohlräumen versehen, die die exzentrische Rotation des Rotors ermöglichen. Durch diese Hohlräume wird das Material ohne starke Komprimierung gefördert. Diese Pumpen haben ein sehr gutes Saugverhalten, weswegen sie oft Anwendung beim Entleeren von Tanks und der Förderung von fließfähigen Materialien finden. Da das Hohlraumvolumen der Exzentrerschneckenpumpe stets konstant ist, eignet sich diese Technologie besonders gut für kompressions- und scherempfindliches Fördergut. Die realisierbare Druckdifferenz wird maßgeblich von der Dichtigkeit zwischen Rotor und Stator bestimmt. Je nach Konstruktion ist die Druckdifferenz zwischen benachbarten Kammern limitiert. Durch das Aneinanderreihen mehrerer Windungen können Hochdruckanlagen Druckbereiche bis zu 25 MPa aufbauen [49]. Aufgrund der großen Widerstandsfähigkeit sind Exzentrerschneckenpumpen für die Förderung nahezu jeden Förderguts geeignet [50].

Der in *Abbildung 38c* dargestellte Kolbenextruder bietet eine Alternative zu Schnecken- und Exzentrerschneckenpumpen. Der wesentliche Unterschied des Kolbenextruders liegt in der Fördermethode, denn hier wird das Material geschoben. Kolbenpumpen kommen oft bei der Förderung von Frischbeton zum Einsatz. Das Funktionsprinzip einer Kolbenpumpe kann wie folgt beschrieben werden: Ein Kolben bewegt sich in einem Zylinder zurück, wodurch ein Unterdruck erzeugt wird, der Fördergut in den Zylinder saugt. Anschließend schwenkt die Rohröffnung der Förderleitung vor den Zylinder, sodass dessen Volumen bei der Vorwärtsbewegung des Kolbens in das System gepumpt wird. Durch das phasenversetzte

Betreiben von zwei Kolbenpumpen und das zyklische Umschwenken des Rohrleitungsansatzes wird eine nahezu kontinuierliche Förderung sichergestellt. Da mittels hydraulischer Antriebe sehr hohe Druckbereiche erreicht werden können, zeichnen sich Kolbenpumpen durch eine hohe Leistungsfähigkeit aus. Für den kontinuierlichen 3D-Druck des Stützmaterials liegt der größte Nachteil eines Kolbenextruders vor allem in der Notwendigkeit des ständigen Nachfüllens der zylindrischen Extrudergehäuse. Das Nachfüllen ist durch das Abnehmen des Kolbens zeitintensiv und wird eine unvermeidliche Arbeitsunterbrechung darstellen. Um einen kontinuierlichen 3D-Druck des Stützmaterials zu gewährleisten, ist es möglich, das Volumen der zylindrischen Gehäuse zu verlängern. Auch das Parallelschalten von zwei Kolbenextrudern kann das Problem des ständigen Nachfüllbedarfs beheben.

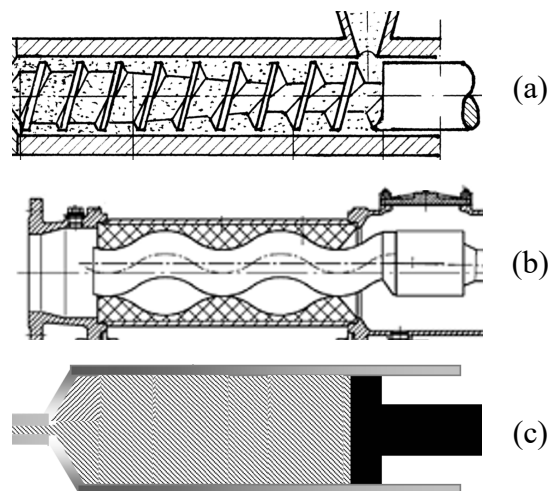


Abbildung 38: : Übersicht über die Methoden zur Förderung von Stützmaterial: (a) Schneckenpumpe [51], (b) Exzentrerschneckenpumpe [52], (c) Kolbenextruder [53].

Die gewählte Extrusionsmethode des Stützmaterials hat einen Einfluss auf die Qualität der einzelnen Schichtlagen und damit auf die Stabilität der Gesamtstruktur. Da die Konsistenz des Stützmaterials nicht der Konsistenz des druckbaren Betons entspricht und beim Stützmaterial nicht von einem thixotropen Verhalten auszugehen ist, ist es notwendig, die vorhandenen Methoden der Extrusion explizit auf ihre Eignung für die Stützmaterialextrusion zu prüfen.

4.1.1 Kolbenextruder

In *Abbildung 39* wird der verwendete Kolbenextruder für die Bewertung der Extrudierbarkeit des Stützmaterials dargestellt. Die Geschwindigkeit des Kolbens wurde auf 15 mm/s festgelegt. Das zylindrische, 293 mm lange Gehäuse des Kolbenextruders ist beidseitig geöffnet. Der Durchmesser der Öffnungen beträgt 124 mm. Der Kolben fährt von einer Seite in das zylindrische Gehäuse ein und schiebt das Stützmaterial bis zur gegenüberliegenden Öffnung, wo sich eine Düse mit einer Öffnung von 60 mm befindet. Im Bereich der Düse wird das Material konsolidiert und gemäß der Geometrie der Düsenöffnung geformt. Die für die

Extrusion notwendige Kraft wird durch eine eingebaute Kraftmessdose gemessen. Die maximale Kraft, bis zu der eine Extrusion möglich ist, beträgt im vorliegenden Gerät 60 kN. Der in *Abbildung 39* dargestellte Steuerkasten ermöglicht die Steuerung der Vor- und Rückwärtsbewegung des Kolbens. Die angeschlossene Messvorrichtung in Kombination mit einem Computer ermöglicht die Aufzeichnung der Ergebnisse.

Die Prüfung der Extrudierbarkeit beginnt mit dem Befüllen der zylindrischen Gehäuse des Extruders mit dem Stützmaterial. Das Stützmaterial wird schichtweise gefüllt und manuell verdichtet, ohne dabei den Konsolidierungsgrad des Stützmaterials wesentlich zu verändern. Das Stützmaterial wird bis 4 cm vor der Gehäusekante eingefüllt. Der Kolben des Extruders wird vorsichtig in das zylindrische Gehäuse eingesetzt (in die Tiefe von 4 cm) und vertikal in die Prüfvorrichtung eingebaut. Die Prüfung beginnt mit dem Vorwärtsfahren des Kolbens und der gleichzeitigen Aufnahme des Kraft-Weg-Diagramms.

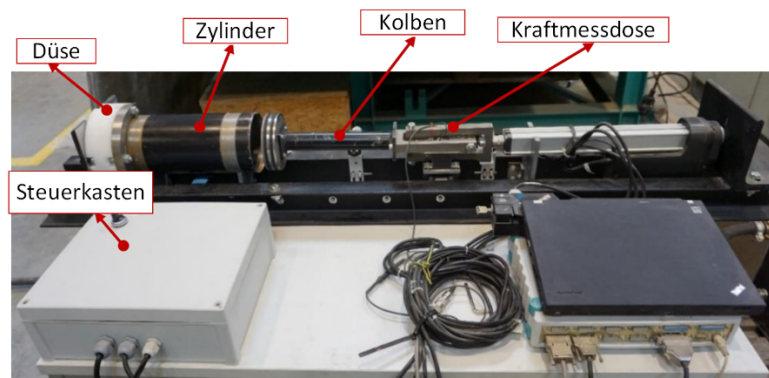


Abbildung 39: Versuchsvorrichtung für die Bestimmung der Extrudierbarkeit des Stützmaterials mittels Kolbenextruder.

Wie in *Abbildung 40* deutlich wird, hat sich der Kolbenextruder als geeignet für die Extrusion des Stützmaterials erwiesen. Der in *Abbildung 40b* dargestellte Probekörper wurde aus wie in *Abbildung 40a* dargestellten Strängen aufgebaut. Der gerundete Querschnitt der extrudierten Schichten wirkt sich negativ auf die Stabilität der Stützstruktur aus. Eine rechteckige Düsenöffnung wird daher zu bevorzugen sein.



Abbildung 40: Mit dem Kolbenextruder hergestellte Stützstruktur aus dem Holz-Stärke-Komposit der Rezeptur M-1: (a) Extrusionsvorgang des Materials, (b) Probekörper aus dem Strängen.

Abbildung 41 zeigt den gemessenen Widerstand bei der Extrusion von drei Rezepturen. Die aufgezeichneten Kurven können grundsätzlich in drei verschiedene Bereiche unterteilt werden: a) exponentieller Anstieg des Extrusionswiderstands vor Beginn der Förderung, b) Bereich mit einem stationären Extrusionswiderstand und c) Beendigung der Förderung. Die Rezepturen M-2 und M-3 zeigten einen exponentiellen Anstieg des Extrusionswiderstands bei einer ähnlichen Verschiebung des Kolbens, wobei ein exponentieller Anstieg des Widerstands bei M-3 nur bei einem deutlich weiteren Weg des Kolbens zu beobachten ist. Anzumerken ist, dass der Anstieg der Extrusionskraft mit dem Verdichtungsgrad des Materials im Zylinder des Extruders zusammenhängt. Offensichtlich sorgte die Abwesenheit eines Fließmittels bei M-1 für eine hohe Steifigkeit und somit zu einem hohen Extrusionswiderstand. Eine starke Zunahme des Extrusionswiderstands bei M-2 und M-3 konnte bei einem Kolbenweg von ca. 200 mm beobachtet werden. Im Unterschied dazu ist bei M-1 eine starke Zunahme des Extrusionswiderstands erst ab einem Kolbenweg von 240 mm erkennbar. Der Grund dafür ist die Kombination von Fichtenpartikeln mit unterschiedlichen Größen in M-2 und M-3, die die Packungsdichte stark beeinflussten. *Abbildung 41* zeigt, dass die Rezeptur M-1 einen deutlich höheren Extrusionswiderstand als M-2 und M-3 besitzt. Der Extrusionswiderstand des Stützmaterials ist allgemein umgekehrt proportional zur Extrudierbarkeit. Rezeptur M-3 hat somit die beste/höchste Extrudierbarkeit.

Nochmals erwähnt werden muss, dass der Begriff Extrudierbarkeit im Kontext der Additiven Fertigung mit zementbasierten Werkstoffen nur die Fähigkeit eines Materials definiert, durch die Öffnung des Extruders zu gelangen. Irrelevant ist dabei, ob die Form des Werkstoffs nach der Extrusion erhalten bleibt. Daher ist zusätzlich zur Bewertung der Extrudierbarkeit eine quantitative Bewertung der Verbaubarkeit des Stützmaterials erforderlich.

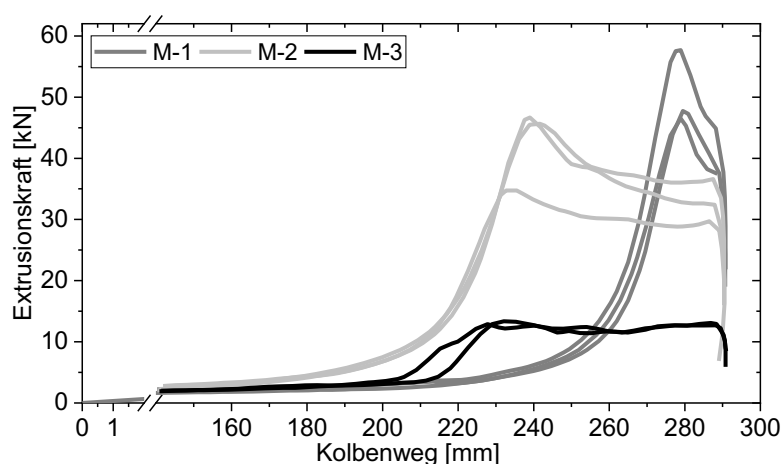


Abbildung 41: Experimentelle Ergebnisse der Extrusion unterschiedlicher Stützmaterialien.

4.1.2 Schnecken- und Exzentrerschneckenextruder

Abbildung 42 stellt zwei untersuchte Arten von Fördereinheiten dar. Die Bestimmung der Extrudierbarkeit wurden mit zwei Fördereinheiten durchgeführt: (a) mit einer Schneckenpumpe und (b) mit einer Exzentrerschneckenpumpe. *Tabelle 13* enthält die untersuchten Parameter.

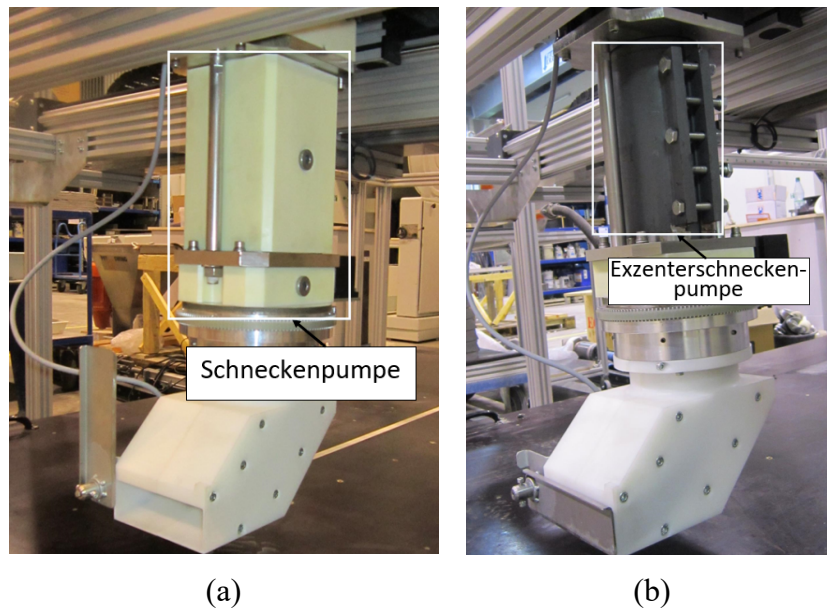


Abbildung 42: Versuchsaufbau für die Bewertung der Extrudierbarkeit des Stützmaterials: Extruder ausgestattet mit (a) Schneckenpumpe, (b) Exzentrerschneckenpumpe.

Tabelle 13: Übersicht über untersuchte Geschwindigkeiten bei Schneckenpumpe und Exzentrerschneckenpumpe.

Art des Extruders	Untersuchte Geschwindigkeitsparameter [deg/s]
Einfache Schneckenpumpe	30; 50; 100; 150; 200; 300
Exzentrerschneckenpumpe	50; 100; 150; 200

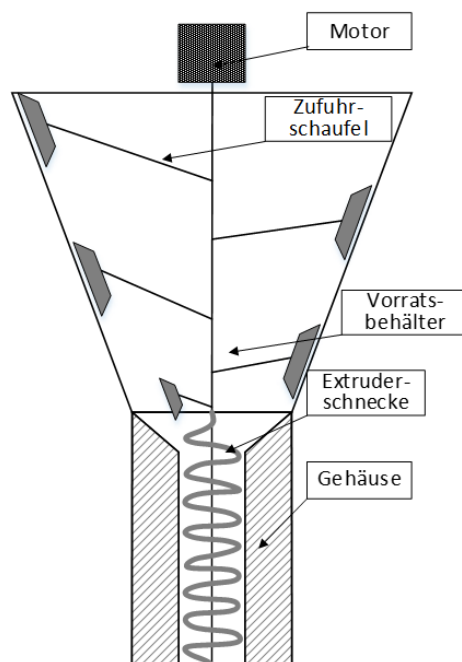


Abbildung 43: Konstruktionsskizze der Fördereinheit für die Extrusion des Stützmaterials.

Die Besonderheit der konzipierten Fördervorrichtung besteht in der Möglichkeit, sowohl die Schneckenpumpe als auch die Exzentrerschneckenpumpe zu verwenden. Ein weiteres Einzelmerkmal der Vorrichtung stellt die Zufuhrschaufel dar (*Abbildung 43*). Durch die Rotation dieser Zufuhrschaufel wird das Material zum trichterförmigen Eingang des Extrudergehäuses bzw. zur Schnecken- oder Exzentrerschneckenpumpe gefördert. Zunächst wurde versucht, das Stützmaterial mittels Materialförderung über die einfache Schneckenpumpe zu extrudieren. Die Förderung des Stützmaterials durch den Einschub mit den Zufuhrschaufeln im Vorratsbehälter des Extruders reichte jedoch nicht aus, um das Material bis zum Trichter des Extruders zu fördern. Dies lag vor allem an der Konsistenz des Stützmaterials. Das Stützmaterial blieb an den Seitenwänden des Vorratsbehälters hängen und rotierte zusammen mit den Zufuhrschaufeln wie ein Festkörper (*Abbildung 44*).



Abbildung 44: Erschwerte Zufuhr durch Anhaftung des Stützmaterials an den Zufuhrschaufeln des Extruders. Die weißen Pfeile stellen die Drehrichtung der Extruderschnecke bzw. der Zufuhreinheit dar sowie die durch die Anhaftung verursachte Rotation des Stützmaterials.

In nachfolgenden Untersuchungen wurde die Extrudierbarkeit des Stützmaterials ohne Zufuhrschaufeln analysiert. Um das Übergehen des Stützmaterials auf die Schnecke des Extruders zu erleichtern, wurde das Stützmaterial manuell granuliert (*Abbildung 45*).



Abbildung 45: Granulierung des Stützmaterials für die Gewährleistung einer ungehinderten Materialzufuhr: (a) Verwendete Siebe für die manuelle Granulierung des Stützmaterials, (b) granuliertes Stützmaterial.

Die manuelle Granulierung des Stützmaterials kann in einer industriellen Anwendung automatisiert werden. Für die Granulierung des Stützmaterials wurden je ein Sieb mit Maschengröße 8,0 mm und 4,0 mm verwendet. Das Verhältnis der Stützmaterialfraktionen wurde gleichmäßig gehalten (50:50). Die Extrusion des Stützmaterials war dennoch nicht möglich. Das Eigengewicht des Granulats reichte nicht aus, um einen Vorschub des Materials auf die Schnecke des Extruders zu bewirken. Im nächsten Schritt wurde versucht, den Vorschub des Stützmaterials zum Anfang des Extrudertrichters manuell zu erreichen. Für den Vorschub des Granulats wurde ein Kantholzpfosten verwendet (*Abbildung 46*).

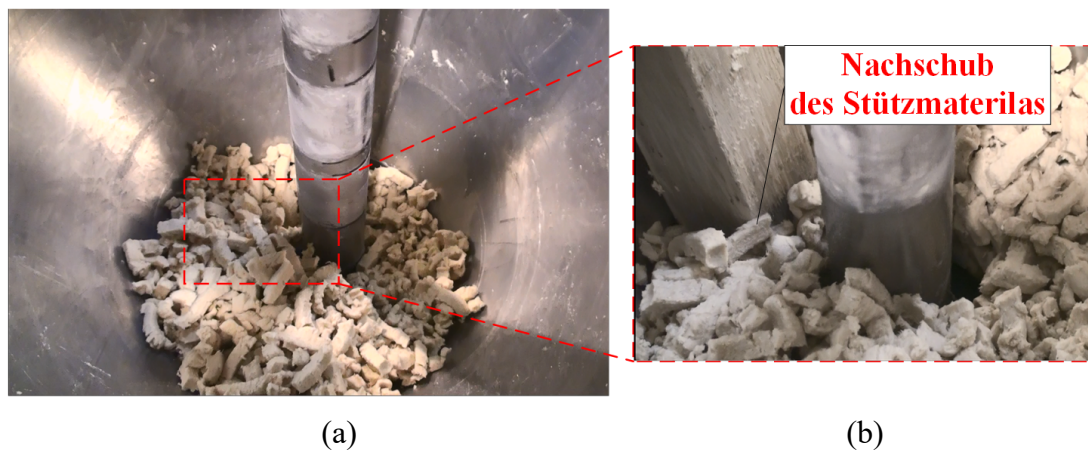


Abbildung 46: Untersuchungen zur Zufuhr des Stützmaterials: (a) Ungestörte Zufuhr mit Eigengewicht des Stützmaterials; (b) Manueller Nachschub des Stützmaterials.

Durch den manuellen Vorschub des Granulats war die Extrusion ebenfalls nicht möglich. Die Ursache dafür liegt in der Formgebung des unmittelbaren Anschlussbereichs des Vorratsbehälters an die Extruderschnecke. Die Formgebung dieses Bereichs wirkt sich positiv bei der Extrusion von thixotropen Materialien wie Beton oder Mörtel aus, wozu sie ursprünglich ausgelegt worden war. Durch die Rotation der Vorschubschaufeln wird der Beton in Bewegung gesetzt. Die Verengung des Vorratsbehälters in Kombination mit den geneigten Wandflächen gibt die Flussrichtung des Betons vor. Bei der Extrusion des Stützmaterials hat dieser Bereich jedoch einen negativen Einfluss. In diesem Bereich bildet sich ein konsolidierter Festkörper und die Extrusion ist nicht mehr möglich, da Material nicht kontinuierlich auf die Schnecke gelangt. In *Abbildung 47a* ist dieser Bereich in Rot markiert. Zusätzlich beeinflussen Parameter wie Mischungskonsistenz und Geometrie der Düse ebenfalls die Extrudierbarkeit des Stützmaterials (vgl. *Kapitel 3.1 und 3.2*).

In *Abbildung 47b* ist das modifizierte Modell der Fördereinheit für die Extrusion des Stützmaterials dargestellt.

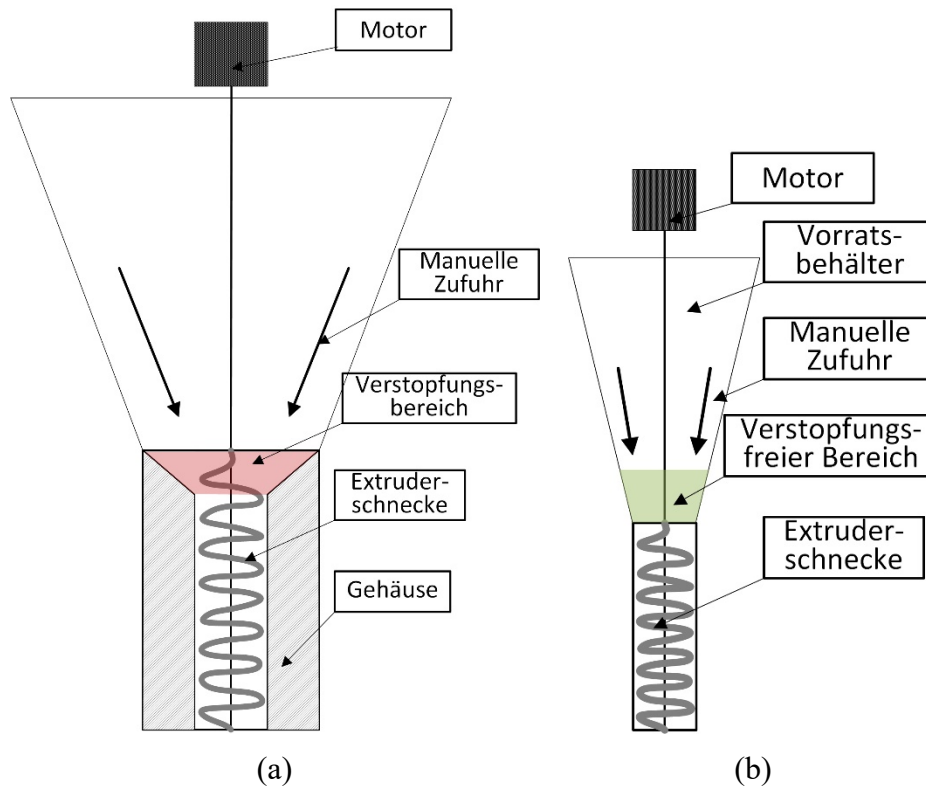


Abbildung 47: Zwei Arten der Fördereinheit: (a) Extruder mit einer indirekten Materialzufuhr auf die Extruderschnecke, (b) Extruder mit direkter Materialzufuhr auf die Extruderschnecke.

4.2 Entwicklung und Aufbau einer Austrageinheit mit angepasster Düsengeometrie für das Stützmaterial, integriert in einen Betondruckprozess

In *Abbildung 48* ist der konzipierte Versuchstand für einen kontinuierlichen 3D-Druck von Beton und Stützmaterial abgebildet. Zwei Extruder sind starr miteinander verbunden. Dennoch erfüllt jeder Extruder eine separate Aufgabe. Um einen kontinuierlichen 3D-Druck von Beton in Kombination mit dem Einsatz des Stützmaterials nachzubilden, wurde das in *Abbildung 49* vorgestellte experimentelle Programm umgesetzt.

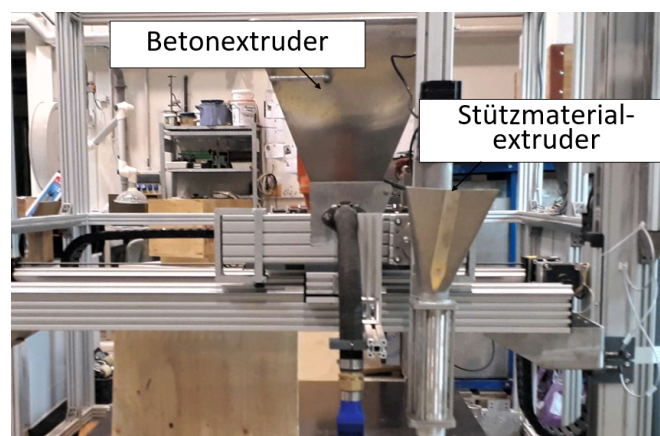


Abbildung 48: Versuchstand für kontinuierliches 3D-Drucken von Beton und Stützmaterial extrusion.

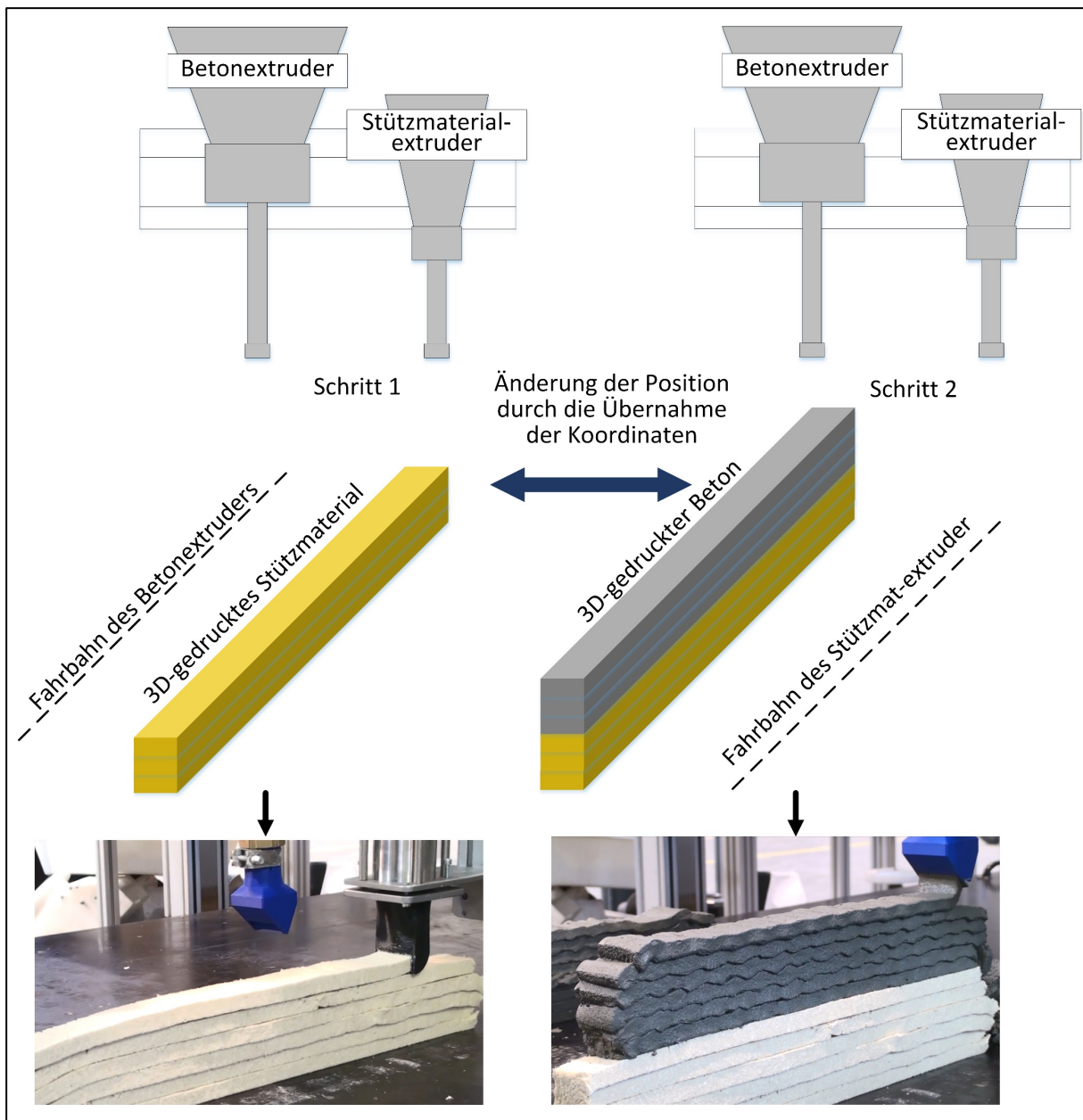


Abbildung 49: Ablauf des kontinuierlichen 3D-Drucks von Beton mit dem Einsatz des Stützmaterials.

Für das Stützmaterial wurde die Rezeptur M-3 verwendet (siehe *Tabelle 5*). Die Herstellung des Stützmaterials erfolgte gemäß *Kapitel 4.1.2*. Nachdem das Stützmaterialgemisch hergestellt worden war, wurde es in den Vorratsbehälter des Stützmaterialextruders gefüllt. Parallel zur Herstellung des Stützmaterials wurde der druckbare Beton vorbereitet. Die Zusammensetzung der druckbaren Betonrezeptur C2 sowie das Mischprotokoll sind in [54] beschrieben. Die Extrusion des Stützmaterials erfolgte mit einer Bewegungsgeschwindigkeit des Druckkopfs von 40 mm/s. Die verwendete Düse hatte eine Öffnung von 14 mm x 33 mm und einen Umlenkwinkel von 90°. Der Vorschub des Stützmaterials zum Trichter des Extruders erfolgte manuell mit Hilfe eines Kantholzpfeilers (vgl. *Kapitel 3*). Das Zeitintervall zwischen den einzelnen Schichten der gedruckten Stützstruktur betrug ca. 1 min. Nachdem sechs Lagen Stützmaterial gedruckt waren, wurde die Platzierung der Extruder verändert. Wie in *Abbildung*

49 dargestellt ist, wurde der Betonextruder in den Startpunkt des Stützmaterialextruders eingesetzt und die Extrusion des Betons gestartet. Insgesamt wurden sechs Betonschichten extrudiert. Während des Aufbaus der Betonfilamente konnten keine sichtbaren Verformungen des Stützmaterials festgestellt werden. Allerdings traten nach der Beendigung der Betonablage sichtbare Deformationen an der Stützstruktur auf, welche die Stabilität der Gesamtkonstruktion gefährdeten. Diese Erscheinung sprach für eine nicht ausreichende Druckfestigkeit des Stützmaterials (Details in *Kapitel 7*).

4.3 Entwicklung und Aufbau einer Konsolidierungseinheit zur Verfestigung des ausgetragenen Stützmaterials, integriert in einen Betondruckprozess

Das Stützmaterial muss eine ausreichende Festigkeit haben, um die Spannungen aus den Betonschichten ohne Überschreitung der zulässigen Verformungen aufnehmen zu können. Dennoch ergab sich aus den vorherigen Untersuchungsergebnissen, dass eine Beschleunigung der Aushärtezeit des Stützmaterials notwendig ist, um die erforderlichen Festigkeitsparameter zu erreichen. Grundsätzlich sind die Methoden zur Erhöhung der Festigkeitseigenschaften des Stützmaterials gemäß *Abbildung 50* aufzuteilen.

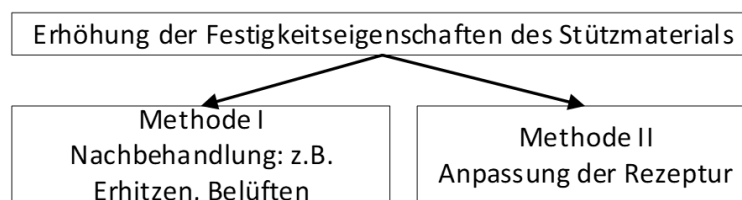


Abbildung 50: Konzeptionelle Darstellung der Methoden zur Erhöhung der Festigkeitsparameter des Stützmaterials.

Gemäß Methode I in *Abbildung 50* wurde in den vorangegangenen Untersuchungen zu den mechanischen Eigenschaften des Stützmaterials festgestellt, dass durch eine zusätzliche Behandlung, z.B. Beschleunigung des Austrocknungsprozesses, eine beschleunigte Ausbildung der Druckfestigkeit des Stützmaterials erreicht werden könnte. Zur Verfestigung des Stützmaterials wurden folgende Methoden angewandt: (a) Erhitzen des Stützmaterials mit Heißluft, (b) In-Line-Erwärmen des Stützmaterials, (c) Erhitzen des Stützmaterials durch Infrarotstrahlung. Als Wärmequellen für die Untersuchungen wurden ein Heißluftfön und ein Infrarotstrahler mit einer Leistung von jeweils 2000 W verwendet (*Abbildung 51a*, *Abbildung 51c*). Für die in-line Erwärmung des Stützmaterials wurde ein Heizband um das Gehäuse des Extruders gewickelt, welches auf 120 °C erhitzt werden kann (*Abbildung 51b*). Für die Untersuchungen wurde ein Holz-Stärke-Gemisch (70% Wasseranteil, 25% Stärkeanteil, 5% Holzanteil) verwendet. Während des Versuchs wurde der Gewichtsverlust des Stützmaterials, welches zuvor in eine Schalungsform gefüllt wurde, gemessen.

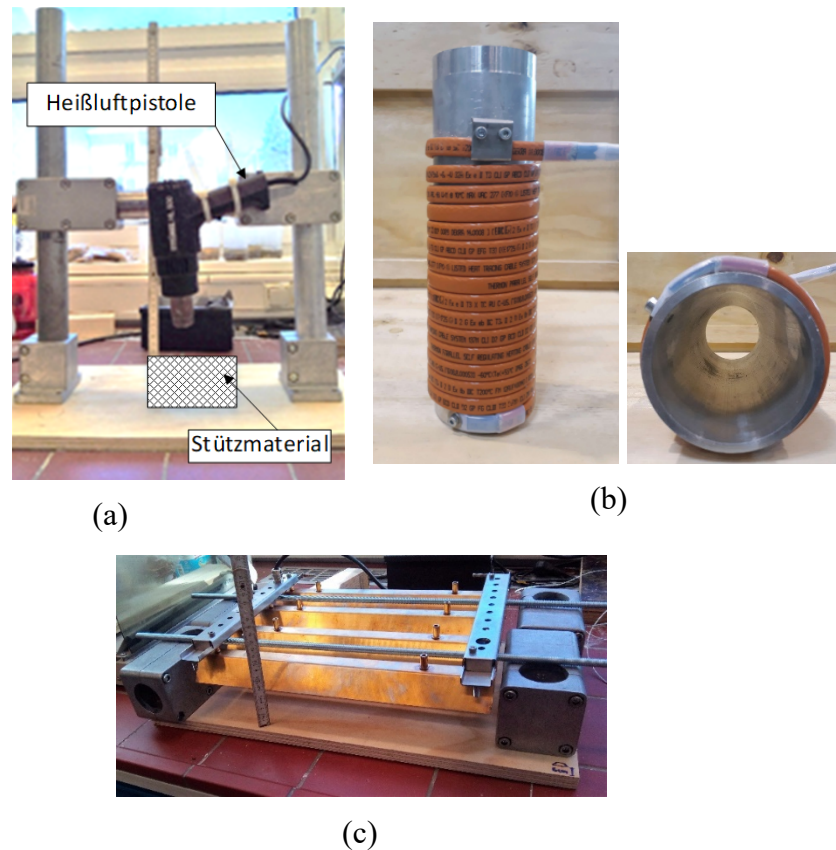


Abbildung 51: Prüfvorrichtung für die Untersuchung zur Beschleunigung der Stützmaterialtrocknung: (a) Induzierte Heißluftströmung mittels Heißluftpistole, (b) In-line Erwärmung des Stützmaterials durch Erhitzen des Extrudersgehäuses, (c) Erhitzen des Stützmaterials durch einen Infrarotstrahler.

In *Abbildung 52* ist zu sehen, dass es sowohl mit dem Heißluftfön als auch mit einem Infrarotstrahler möglich ist, die Austrocknung des Stützmaterials zu beschleunigen. Allerdings ist für die Betrachtung der absoluten Werte des Gewichtsverlustes zu erwähnen, dass die Trocknung des Stützmaterials mit dem Einsatz von externen Energiequellen zeitintensiv ist (*Tabelle 14*).

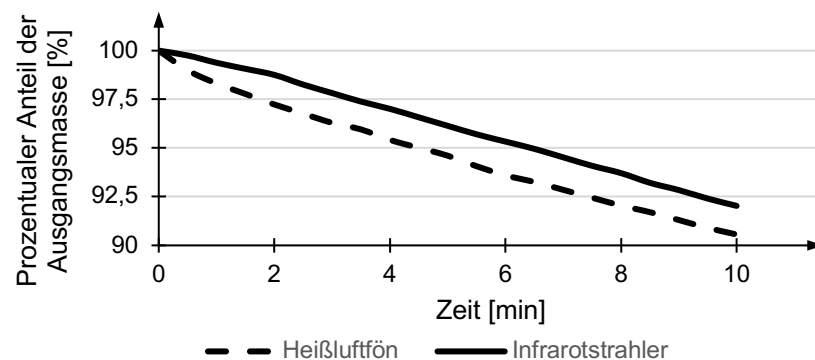


Abbildung 52: Zeitabhängiger Gewichtsverlust beim Einsatz des Heißluftföns und des Infrarotstrahlers.

Tabelle 14: Gewichtsverlust des Stützmaterials im Zeitraum der Messung bei Nutzung des Heißluftföns bzw. des Infrarotstrahlers.

Heizquelle	Gewichtsverlust während des dargestellten Zeitraums [g]	Gewichtsverlust [g/h]
Heißluftfön	14	84
Infrarotstrahler	13	78

Durch Variieren des Probekörpervolumens konnte festgestellt werden, dass die Austrocknung des Probekörpers stark von seiner Dicke abhängt. So wurden bei den Probekörpern mit einer größeren Dicke nur oberflächennahe Bereiche wesentlich erhitzt. Austrocknung des inneren Kerns konnte auch nach etwa einer Stunde nicht erreicht werden. Für einen effektiven Einsatz des Heißluftföns oder des Infrarotstrahlers wäre eine Schichtdickenhöhe des Stützmaterials von lediglich 1 cm empfehlenswert. Allerdings würde bei einer so geringen Schichtdickenhöhe die Wirtschaftlichkeit des 3D-Drucks von Beton stark beeinträchtigt [55]. Somit hat sich die direkte Befestigung des Heißluftföns oder Infrarotstrahlers auf dem Druckkopf des Extruders als uneffektiv erwiesen. Die Einwirkzeit externer Heizquellen auf das Filament des Stützmaterials war nicht ausreichend, um eine vollständige Austrocknung zu erreichen. Basierend auf den Ergebnissen mit dem Heißluftfön und dem Infrarotstrahler wurde die Methode der in-line Trocknung des Stützmaterials ebenfalls als uneffektiv eingestuft. Als alternative Methode für die Beschleunigung der Aushärtung des Stützmaterials ist die Behandlung des Stützmaterials nach der Extrusion, aber noch vor Belastung mit Betonschichten denkbar.

Ein erhöhter Luftaustausch durch die Installation z.B. eines Baustellenventilators, könnte die Festigkeitsentwicklung des Stützmaterials positiv beeinflussen, indem die Aushärtung durch erhöhte Konvektion beschleunigt wird. Eine konzeptionelle Darstellung zeigt *Abbildung 53*. Entscheidend ist bei der Umsetzung dieser Methode, dass die vorzeitige Austrocknung des Betons und eine dadurch hervorgerufene Schwindrissbildung nicht begünstigt werden. Daher ist es notwendig, Ausführungsplanung und Druckstrategie anzupassen.

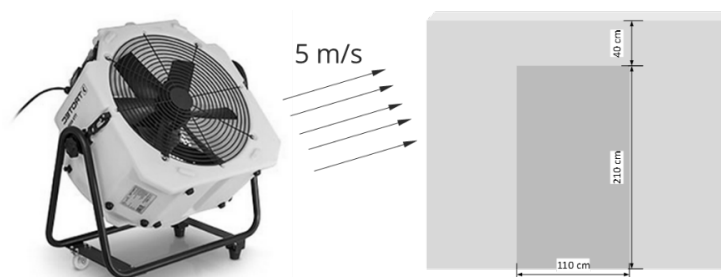


Abbildung 53: Konzepteschema zur Beschleunigung der Aushärtung des Stützmaterials unter Baustellenbedingungen.

Um die Effektivität der vorgeschlagenen Lösung zu quantifizieren, wurde ein experimentelles Programm vorbereitet. *Abbildung 54* zeigt den Versuchsaufbau, welcher dem in *Abbildung 53* dargestellten Konzept folgt.

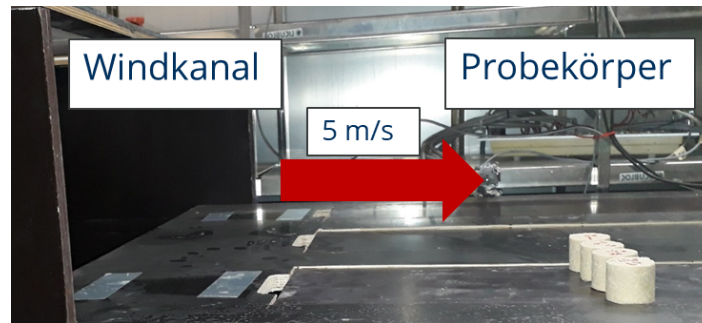


Abbildung 54: Ablauf des Experiments zur Simulation der Trocknung des Stützmaterials auf der Baustelle.

Die Rezeptur des untersuchten Stützmaterials M-2 ist in *Kapitel 3.1.1, Tabelle 5*, dargestellt.

Für die Durchführung des Experiments wurden zylindrische Probekörper der Rezeptur M-2 mit einem Durchmesser von 48 mm und einer Höhe von 34 mm vorbereitet (Abbildung 55). Um den Einfluss der manuellen Probekörperherstellung feststellen zu können, wurden auch Probekörper durch Ausstechen aus 3D-gedruckten Stützmaterial-Filamenten hergestellt. Ein Teil der Probekörper wurde anschließend in der Windkammer unter einem konstanten Luftstrom von 5 m/s, einer Luftfeuchte von ca. 20 % und einer Temperatur von 30 °C gelagert. Weitere Probekörper wurden in der Klimakammer bei einer konstanten Temperatur von (20 ± 2) °C und einer relativen Luftfeuchte von (65 ± 5) % gelagert. Nach ca. 1h, 3h und 24h ab dem Zeitpunkt der Wasserzugabe wurde die Druckfestigkeit der Probekörper geprüft.



Abbildung 55: Probekörper des Stützmaterials: links vor der Prüfung, rechts nach der Prüfung.

Die Druckfestigkeitsprüfung wurde auf einem Instron-Prüfstand (Instron GmbH, Darmstadt) durchgeführt. Die Prüfmaschine wurde mit einer 10 kN Kraftmessdose und einer Belastungsplatte ausgestattet, deren Durchmesser dem der Probekörper entsprach. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug 30 mm/min. Der Versuch wurde bei einer Stauchung von 25 % gestoppt. Zur Bestimmung der Querverformungen wurde eine digitale Spiegelreflexkamera (Canon EOS 750D) verwendet. Die Bilder dienen als Grundlage für die Berechnung der Spannungswerte. Für eine angemessene Häufigkeit der Fotoaufnahmen wurde ein Video aufgezeichnet, das später mit dem Open-Source-Programm ImageJ/Fiji in eine Sequenz von Einzelbildern umgewandelt wurde. Die Bildbearbeitung erfolgte nach einer früher beschriebenen Methodik [56] (Abbildung 56).

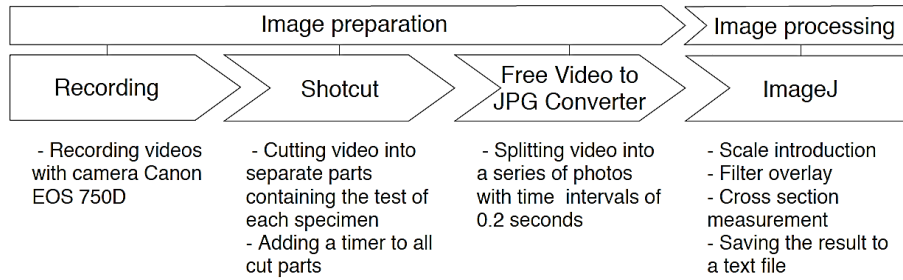


Abbildung 56: Ablaufplan für Vorbereitung und Verarbeitung der Verformungsbilder [56].

Die Ergebnisse der einaxialen Druckfestigkeit stellt *Abbildung 57* dar.

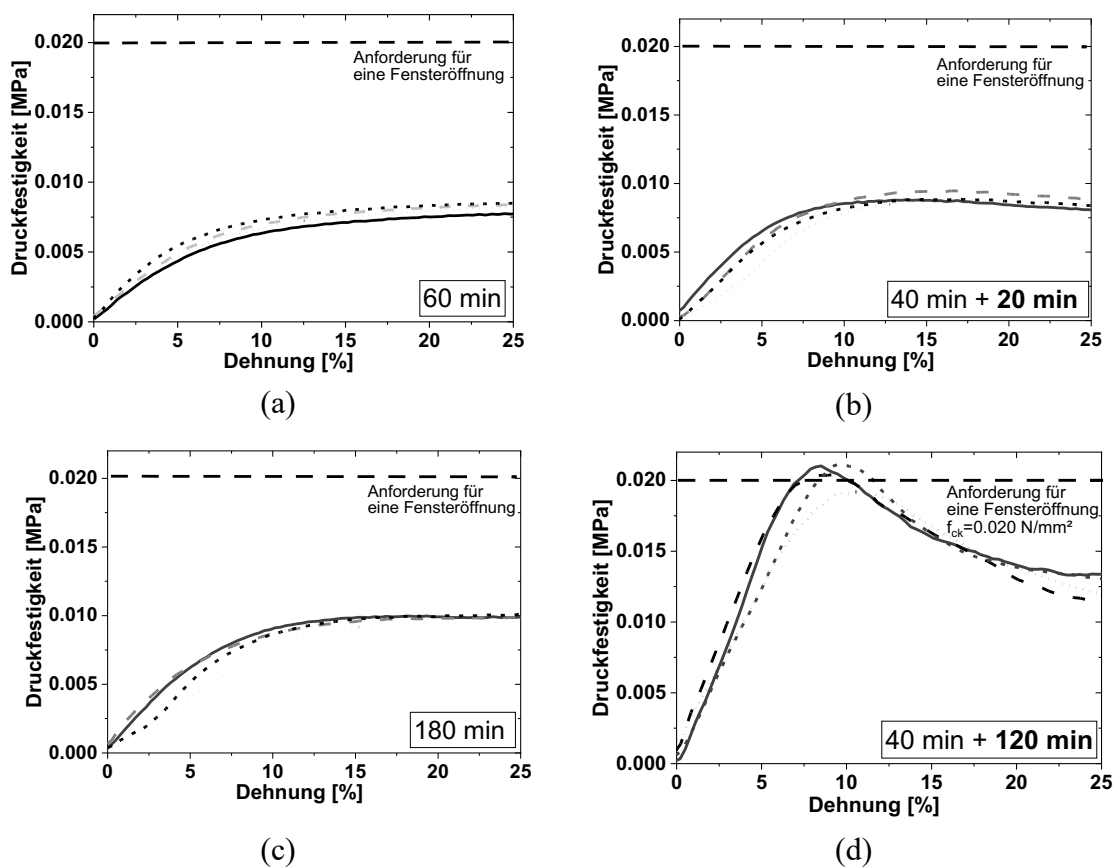


Abbildung 57: Spannungs-Dehnungs-Diagramme aus dem einaxialen Druckversuch der Rezeptur M-3: (a) 60 min nach dem Zeitpunkt der Wasserzugabe gelagert im normalen Raumklima; (b) 60 min nach dem Zeitpunkt der Wasserzugabe, wobei der Probekörper während der letzten 20 min im Windkanal behandelt wurde; (c) 180 min nach dem Zeitpunkt der Wasserzugabe gelagert im normalen Raumklima; (d) 180 min nach dem Zeitpunkt der Wasserzugabe, wobei der Probekör innerhalb der letzten 120 min im Windkanal behandelt wurde.

Die Spannungs-Dehnungs-Diagramme zeigen, dass sich die Eigenschaften des Stützmaterials mit der Zeit ändern und sowohl von der Aushärtezeit als auch von den Aushärtebedingungen abhängen. Ein Teil der Probekörper wurde unter normalen Umgebungsbedingungen im

Laborklima bei ca. 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 60 % gelagert (*Abbildung 57a, c*). Die übrigen Probekörper wurden bei gleicher Temperatur und Luftfeuchte im Windtunnel mit einer Luftströmung von 5 m/s belüftet (*Abbildung 57b, d*). Die Belüftung wurde 40 Minuten nach der Wasserzugabe gestartet und dauerte 20 min (*Abbildung 57b*) bzw. 120 min (*Abbildung 57d*). Es wurde festgestellt, dass längere Belüftung die Entwicklung der mechanischen Eigenschaften des Stützmaterials positiv beeinflusste. Allerdings war eine deutliche Verbesserung der mechanischen Eigenschaften erst nach 120 min Belüftung zu erkennen. Die 20-minütige Belüftung der Probekörper führte zu keiner signifikanten Erhöhung der Druckfestigkeit. Allerdings wurde die Druckfestigkeit bei deutlich niedriger Dehnung erzielt, was auf eine höhere Steifigkeit des Materials hinweist. Im Gegensatz dazu verdoppelte die 120-minütige Belüftung der Stützmaterialproben nahezu die Druckfestigkeit. Es wurde ein Wert von 0,02 MPa erreicht, der in *Kapitel 2.1.2* als minimal erforderliche Druckfestigkeit berechnet worden war. Das kontinuierliche 3D-Drucken eines Beton-Wandelements mit einer Fensteröffnung ist unter diesem Gesichtspunkt möglich. Allerdings entspricht der Spannungsspitzenwert einer Dehnung von 7,5 % (*Abbildung 57d*). Bei einer Fensteröffnung mit einer Höhe von einem Meter entspricht diese Verformung der Tragstruktur einer absoluten Verformung von ca. 7,5 cm, was bautechnisch schlichtweg inakzeptabel ist. Zu bemerken ist, dass diese Abschätzung auf extrem konservativen Annahmen beruht (vgl. *Kapitel 2.1.2*). Ferner ist zu erwähnen, dass jede erhebliche Verformung des Stützmaterials in vertikaler Richtung zwangsläufig zu einer entsprechenden seitlichen Verformung in horizontaler Richtung führt, die jedoch durch angrenzende Betonwände zurückgehalten wird. Eine solche eingeschränkte Verformung würde einen mehrachsigen Spannungszustand im Stützmaterial induzieren, seine Verformung in vertikaler Richtung erheblich verringern und seine Druckfestigkeit erhöhen. Eine umfassendere Analyse des in-situ Verformungs- und Festigkeitsverhaltens des Stützmaterials bedarf weiterer Forschung.

Die bisher diskutierten Ergebnisse des einaxialen Druckversuchs stammen von manuell hergestellten Probekörpern. Um die gewonnenen Ergebnisse mit der tatsächlichen Festigkeit des gedruckten Stützmaterials zu vergleichen, wurden die Druckfestigkeitsprüfungen ebenfalls an gedruckten Probekörpern durchgeführt. Die in *Abbildung 58* dargestellten Ergebnisse bestätigen, dass die Materialeigenschaften der manuell hergestellten Probekörper mit denen der gedruckten Probekörper übereinstimmen.

Wie in *Abbildung 59* zu sehen ist, erhöht die 24-stündige Belüftung des Stützmaterials die Tragfähigkeit bis zum Zwölffachen.

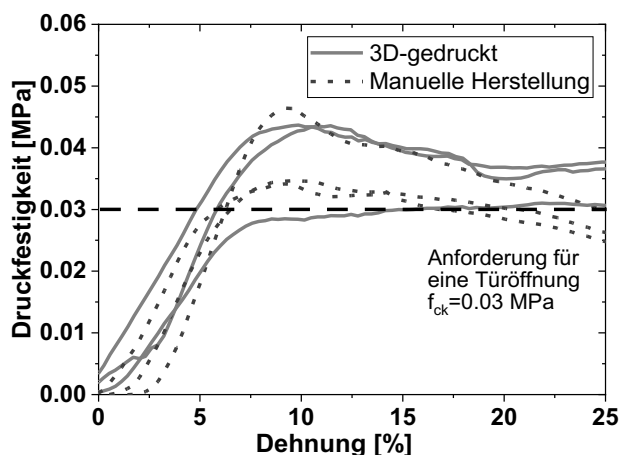


Abbildung 58: Vergleich der Druckfestigkeit von gedrucktem und manuell hergestelltem Stützmaterial M-3, 24 Stunden nach Wasserzugabe; nicht belüftete Probekörper, gelagert unter 60 % relativer Luftfeuchte bei 20 °C.

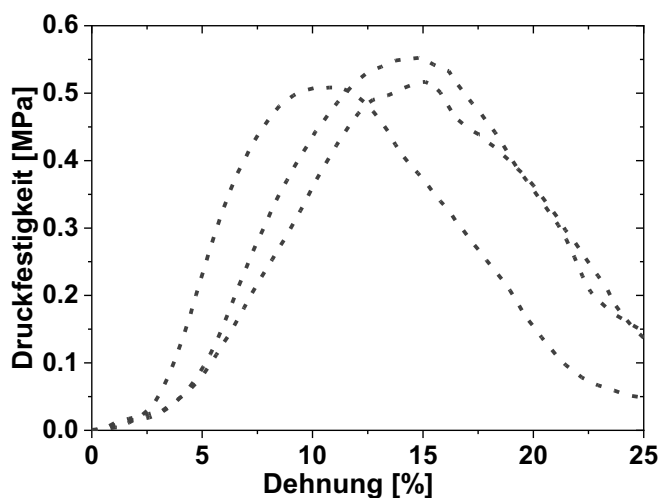


Abbildung 59: Druckfestigkeit des manuell hergestellten Probekörpers aus Stützmaterial M-3 nach 24 Stunden Belüftung im Windkannal mit einer Windgeschwindigkeit von 5 m/s.

5 Untersuchungen zu Entfernbarkeit und Wiederverwendbarkeit des Stützmaterials

5.1 Untersuchung der mechanischen Entfernbarkeit des Stützmaterials

Die Prozesskette der Wiederaufbereitung des Stützmaterials beginnt mit dem Abriss und der anschließenden Lagerung und Wiederaufbereitung des Materials. Daher stellt der Abriss des Stützmaterials einen wichtigen Schritt in der Aufbereitungskette dar. Unter Abriss wird hierbei das Entfernen, Sortieren und Transportieren des Materials verstanden. Die Zeitspanne, in der das Stützmaterial entfernt werden kann, hängt von den Eigenschaften des druckbaren Betons ab. Es ist wichtig, dass während des Abrisses möglichst wenig Fremdstoffe in das Stützmaterial gelangen. Nur so können Materialeigenschaften vorhergesagt werden. Unter Fremdstoffen

werden alle Stoffe verstanden, welche die ursprüngliche Rezeptur des Stützmaterials verändern. Dazu zählen auch Betonanhaftungen in der Kontaktzone zwischen Stützmaterialschichten und Betonfilamenten.

Zum voraussichtlichen Zeitpunkt der Entfernung des Stützmaterials nach ca. 24 Stunden kann seine Konsistenz noch formbar bzw. klebrig sein, was das Anhaften von Zementsteinresten begünstigen kann. Dass während des Abbruchs tatsächlich Zementsteinreste in das Stützmaterial gelangen, zeigten die experimentellen Untersuchungen im Labor. Grundsätzlich soll der Fremdkörpereintrag möglichst gering gehalten werden. Um die Entfernbarekeit des Stützmaterials zu untersuchen, wurden drei prismatische Probekörper mit den Maßen 40 mm x 40 mm x 160 mm hergestellt. Die untere Schalungshälfte wurde mit frischem Stützmaterial gefüllt, die obere Schalungshälfte bis zum oberen Rand mit druckbarem Beton gefüllt. Die Rezeptur des druckbaren Beton C-2 ist in [54] beschrieben. *Abbildung 60* zeigt einen solchen Probekörper nach dem Ausschalen. Das Stützmaterial wurde manuell entfernt. Beobachtet wurde, dass dabei das Stützmaterial entlang der Kontaktfläche abschert.

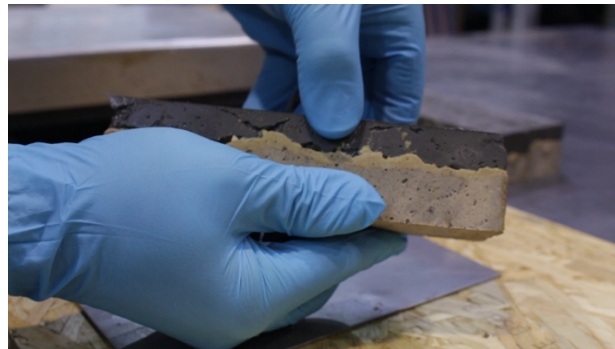


Abbildung 60: Probekörper zur Untersuchung der Entfernbarekeit des Stützmaterials.

Der auf der Baustelle vorgesehene Abriss des Stützmaterials mittels Hammer ist beispielhaft in *Abbildung 61* zu sehen. Nach dem Abriss wird das Stützmaterial durch die Sortier- oder Aufbereitungsanlagen weiterverarbeitet. Auch wenn eine Sortierungsanlage das Aussondern von Zementresten bewerkstelligen könnte, wird davon ausgegangen, dass dies hinsichtlich Anlagentechnik und Energiekosten weder ökonomisch noch ökologisch von Vorteil wäre.

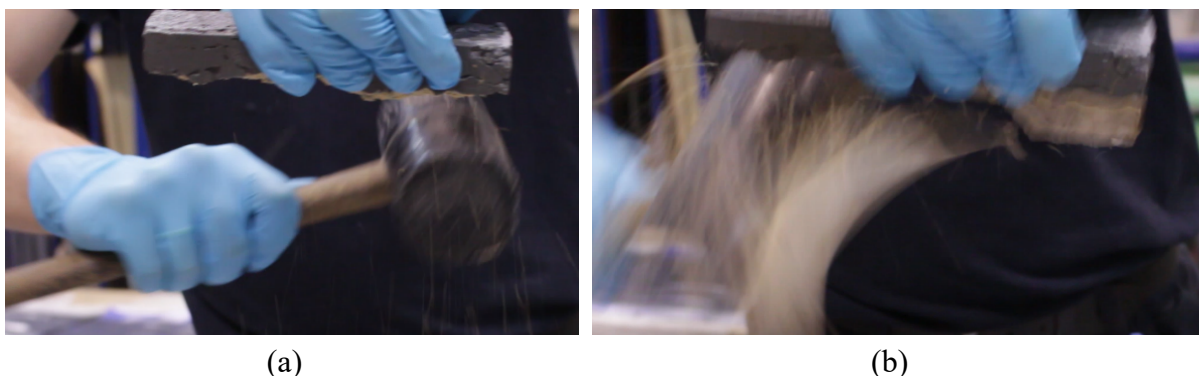


Abbildung 61: Mechanische Entfernung des Stützmaterials.

Um dem Eintrag von Zementrückständen in das Stützmaterial vorzubeugen, wäre es weiterhin möglich, die mit den Zementresten behafteten Flächen aus der zu rezyklierenden Masse des Stützmaterials zu entfernen. Dadurch könnte das Recyclingpotenzial gesteigert werden. Allerdings ist von einem gewissen Eintrag von Fremdstoffen in den Stoffkreislauf grundsätzlich auszugehen. Der eingetragene Zement besitzt jedoch im Vergleich zur Gesamtmasse des Stützmaterials eine relativ geringe Masse. Neben dem Eintrag von Zement in das Stützmaterial, verbleibt auch Stützmaterial an der Oberfläche der Betonschichten.

5.2 Untersuchung der Lösbarkeit im Grenzflächenbereich zwischen Beton und Stützmaterial

Die Herstellung eines homogenen Granulats aus dem abgerissenen Stützmaterial ist für Qualitätssicherung und Weiterverarbeitung unabdingbar. Daher spielt das maximal rückstandslose Trennen des Stützmaterials eine besondere Rolle. Das rezyklierte Material muss mit der Ausgangsmischung vergleichbare Materialeigenschaften aufweisen, um wieder eingesetzt werden zu können. Wie bereits erwähnt, ist der Eintrag von Fremdstoffen kaum vermeidbar. Da die Masse des eingetragenen Zements im Verhältnis zur Masse des Stützmaterials gering ist, lässt sich dessen kurzfristige Auswirkung als gering einschätzen. Der Fremdstoffgehalt im Stützmaterial wird sich allerdings durch das mehrfache Verwenden und Rezyklieren erhöhen. Langfristig sind dadurch Veränderungen der Materialeigenschaften zu erwarten, die das Stützmaterial schließlich untauglich machen können. Im Rahmen des Qualitätsmanagements muss der potenzielle Zementgehalt im Stützmaterial bestimmt werden, sowie der Gehalt, ab dem der Zementanteil das Stützmaterial untauglich macht. Der prozentuale Anteil der Zementmasse am Gesamtgewicht lässt sich anhand der Kontaktflächen von Stützmaterial zu Beton abschätzen und dokumentieren. Dafür ist ein Kennwert einzuführen, der beschreibt, wie viel Zementmasse pro Flächeneinheit anhftet. Anhand der objektspezifischen Kontaktfläche von Beton zu Stützmaterial, die sich vor allem mit der Anzahl und Größe der Laibungen ändert, kann verfolgt werden, wie viel Zement potenziell in einer Mischung enthalten ist. Mithilfe langfristiger Untersuchungen der Fremdstoffauswirkungen auf das Materialverhalten lässt sich eine Prognose erstellen, wie oft das Material wiederverwendet werden kann. Doch eine solche Untersuchung erscheint erst dann sinnvoll, wenn eine endgültige Stützmaterialrezeptur bestimmt ist und blieb daher während der Optimierung der Rezepturen unberücksichtigt. *Abbildung 62a* zeigt die Anhaftungen des Stützmaterials an der Oberfläche des in *Kapitel 4.1* beschriebenen prismatischen Probekörpers. Das Stützmaterial wurde nach 24 h entfernt. Auf der Oberfläche des Betons verbliebene, dünne Stützmaterialreste lassen sich problemlos durch z.B. Bürsten ohne optische Rückstände entfernen (*Abbildung 62*). Bei gipshaltigen Stützmaterialrezepturen ist besonders darauf zu achten, dass möglichst keine Stützmaterialreste an der 3D-gedruckten Betonstruktur zurückbleiben. Die längerfristige Einwirkung des Calciumsulfats (bei Vorhandensein einer gewissen Feuchtigkeit) kann oberflächennahe, intensive Bildung von sekundärem Ettringit bewirken. Diese verspätete Ettringitbildung ist eine bekannte Treibreaktion, die ein erhebliches Schädigungspotenzial aufweist. Details zur diesbezüglichen chemischen Analytik sind in *Kapitel 7.3* ausgeführt.

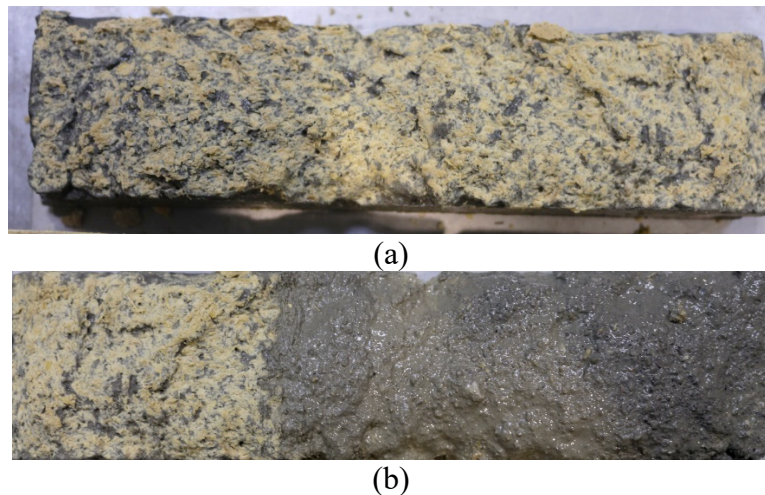


Abbildung 62: Anhaftungen des Stützmaterials im Bereich der Kontaktzone Beton-Stützmaterial: (a) Reste des Stützmaterials an der Betonoberfläche, (b) Betonoberfläche nach mechanischem Abbrechen (links) und durch Bürsten gereinigte Betonoberfläche (rechts).

Die Versuche machten ersichtlich, dass die Menge der Anhaftungen des Stützmaterials von der Konsistenz der beiden Materialien in der Kontaktzone abhängen. Abgesehen von der Konsistenz des Stützmaterials hat sein Rauheitsprofil signifikanten Einfluss auf die Trennung im Grenzbereich. Da das Stützmaterial in direktem Kontakt mit dem Frischbeton steht, stellt seine Oberfläche eine Art Schalungsoberfläche dar, die das Erscheinungsbild des Betonbauteils bestimmt. Insofern ist auch die Oberflächentextur des Stützmaterials zu bewerten.

Zur qualitativen Einschätzung der Oberflächenrauheit wurden zwei Stützmaterialrezepturen herangezogen. Die Messungen erfolgen durch das Entwicklungs- und Prüflabor Holztechnologie GmbH (EPH). Für die Bewertung der Rauheit wurde das Tastschnittverfahren verwendet. Dafür wird eine Diamantmessspitze linear über die Werkstoffoberfläche bewegt. Durch die raue, unebene Messoberfläche am Probekörper wird eine Verschiebung der Diamantmessspitze in vertikaler Richtung induziert. Die Verschiebungen der Messspitze werden als Primärprofil aufgezeichnet. Die Auswertung der entstandenen Datenreihe mündet in ein vom Wellenprofil bereinigtes Rauheitsprofil [57]. Da die Profillinien als Überlagerung mehrerer Wellen interpretiert werden, werden Rauheit und Welligkeit durch eine Grenzwellenlänge getrennt. Deren Wahl hat daher einen relevanten Einfluss auf die Ergebnisse [57]. Als Kennwerte dienen die arithmetischen Mittelwerte von Rauheit und Welligkeit. Diese beschreiben den mittleren Abstand der Profillinie von der Mittellinie. Zusätzlich werden die Gesamthöhen der Profile als Abstand von höchstem und niedrigstem Ausschlag ausgewertet (Tabelle 15). Abbildung 63 zeigt die mikroskopischen Aufnahmen der Oberfläche der Rezepturen M-25 und M-4-Ref, die mit dem Tastschnittverfahren analysiert wurden.

Tabelle 15: Versuchsschema zur Bewertung der Oberflächenrauheit.

Kurzbeschreibung	<input type="checkbox"/> Mikroskopische Aufnahmen <input type="checkbox"/> Oberflächentastschnitt
Versuchszeitpunkt	<input type="checkbox"/> an abgebundenen Probekörpern
Aufzunehmende Größen	<input type="checkbox"/> Primärprofil
Kennzahl	<input type="checkbox"/> arithmetischer Mittenrauwert <input type="checkbox"/> Gesamthöhe Rauheitsprofil <input type="checkbox"/> arithmetischer Mittenwellwert <input type="checkbox"/> Gesamthöhe Welligkeitsprofil

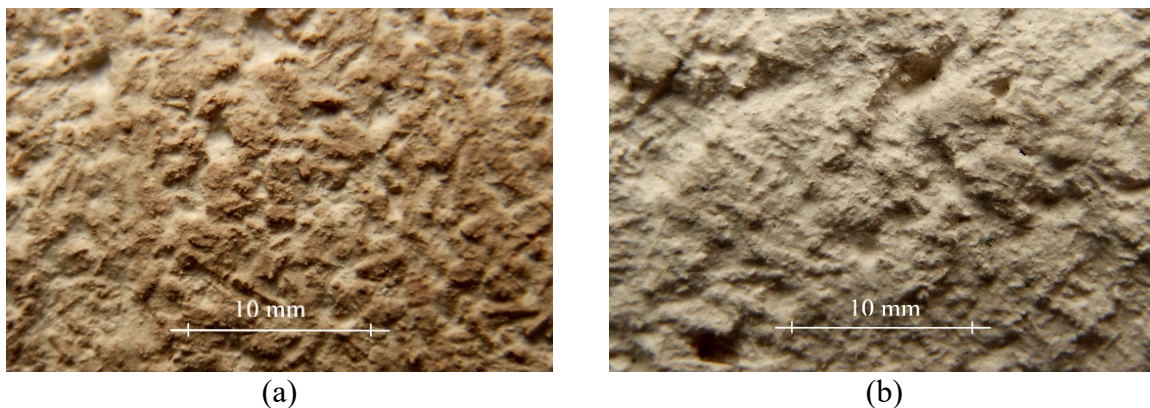


Abbildung 63: Lichtmikroskopische Aufnahmen der Oberflächen der Stützmaterialrezepturen (a) M-25 und (b) M-4-Ref.

Auf den mikroskopischen Aufnahmen ist zu sehen, dass das Stützmaterial M-25 eine fein strukturierte Oberfläche hat. Die Textur wird durch Erhebungen einzelner Holzpartikel bestimmt. Demgegenüber zeigt die Oberfläche von M-4-Ref gröbere Rillen, zwischen denen sich ebene Plateaus befinden. Zudem fallen unterschiedliche Oberflächenfarben auf. Die braune Verfärbung der Oberfläche des Stützmaterials M-25 ist auf den Einsatz des Lignosulfonats zurückzuführen. *Abbildung 64* zeigt beispielhaft das gemessene Rauheitsprofil der beiden Stützmaterialien. Je Probekörper wurden zwölf Messtrecken von 42 mm Länge ausgewertet.

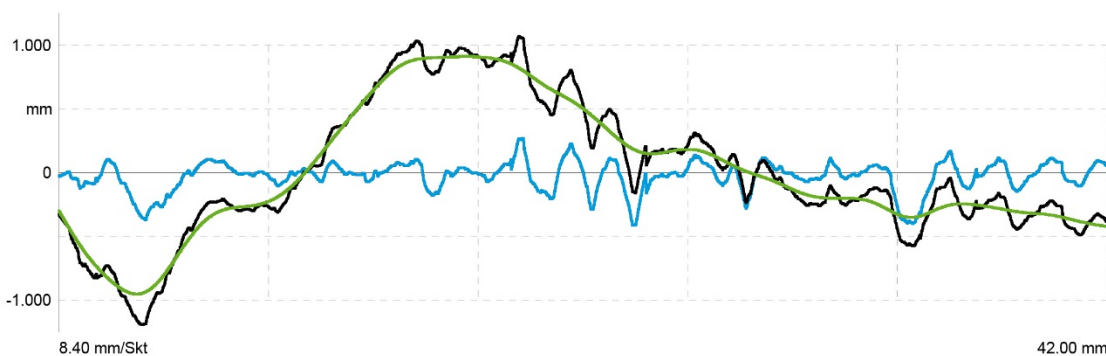


Abbildung 64: Rauheitsprofil der Oberfläche von Stützmaterial M-25. Schwarz: Primärprofil; Blau: Rauheitsprofil; Grün: Welligkeitsprofil.

Trotz visuell erkennbarer Unterschiede in der Oberflächengestalt gibt es keine signifikanten Unterschiede in den Rauheitskenngrößen zwischen diesen beiden Rezepturen (Tabelle 16).

Tabelle 16: Zusammenstellung von Rauheitskennzahlen und deren statistische Verteilung für die Stützmaterialrezepturen M-25 und M-4-Ref.

Rezeptur	M-25	M-4-Ref
Arithmetischer Mittenrauwert	93 μm	99 μm
Variationskoeffizient	41,0 %	68,5 %
Gesamthöhe Rauheitsprofil	693 μm	679 μm
Variationskoeffizient	57,1 %	68,4 %
Arithmetischer Mittenwellwert	340 μm	315 μm
Variationskoeffizient	185,6 %	68,6 %
Gesamthöhe Welligkeitsprofil	1324 μm	1208 μm
Variationskoeffizient	183,3 %	72,1 %

Die Daten zeigen mittlere Welligkeitsprofilgesamthöhen zwischen 1,2 mm und 1,3 mm. Diese Größenordnung ist für eine Bauanwendung als geeignet zu bezeichnen. Dennoch werden Betonoberflächen, die im Gegensatz zu geschalteten Flächen mit Stützmaterial in Berührung kommen, eine körnige Textur zeigen.

5.3 Untersuchung der Wiederverwendbarkeit des Stützmaterials

5.3.1 Herangehensweise und Ablauf der Experimente

Einer der bedeutenden Aspekte, der für die Verwendung eines holzbasierten Stützmaterials spricht, ist seine Umweltfreundlichkeit. Diese gründet sich in der Verwendung ökologischer Rohstoffe sowie dem möglichen Recycling. In diesem Kapitel werden Auswirkungen des Recyclingprozesses auf relevante Stoffeigenschaften des Stützmaterials untersucht. Für die Quantifizierung der Wiederverwendbarkeit wurden zunächst zwei unterschiedliche Mischungszusammensetzungen untersucht: die stärkebasierte Rezeptur M-3 und die gipsbasierte Rezeptur M-4-Ref. Nach jedem Rezyklierungszyklus sollte die erreichte Druckfestigkeit gemessen werden. Weiterhin wurden je Mischung zwei Untersuchungsreihen geplant: a) sollte die Stützmaterialrezeptur ohne Veränderungen der Materialrezeptur rezykliert werden, b) sollten bewusst Zementleimkrümel zugegeben werden. Mit der letzteren Serie wurde das Ziel verfolgt, Veränderungen der Materialeigenschaften durch Fremdstoffeintrag zu charakterisieren.

Die Trocknung des Holz-Stärke-Gemisches (Rezeptur M-3) erfolgte bei einer Temperatur von 105 °C. Für die Trocknung des Holz-Gips-Gemisches (Rezeptur M-4-Ref) ist eine höhere Temperatur notwendig, um das chemisch gebundene Kristallwasser auszutreiben und den Gips wieder reaktionsfähig zu machen. Es wurde eine Temperatur von 150 °C angesetzt. Nach einer Stunde sollte das Material in einer Mühle zerkleinert und anschließend erneut getrocknet werden. Dies sollte gewährleisten, dass der Wassergehalt des Recyclingmaterials bei nahezu

0 % liegt, um sicherzustellen, dass das Verhältnis von Trockenmaterial zu Wasser wie in der Ausgangsmischung herrscht. *Abbildung 65* zeigt das getrocknete Stützmaterialgemisch M-3 und *Abbildung 65b* den Trocknungsprozess der Rezeptur M-4-Ref. In *Abbildung 65c* ist das Mahlwerk der verwendeten Mühle, mit dem das Material granuliert werden soll, zu sehen. Im Mahlwerk wurde ein 2 mm großes Siebraster eingebaut. Das erhaltene Granulat sollte dadurch fein genug sein, um es zu einer homogenen Mischung verarbeiten zu können.

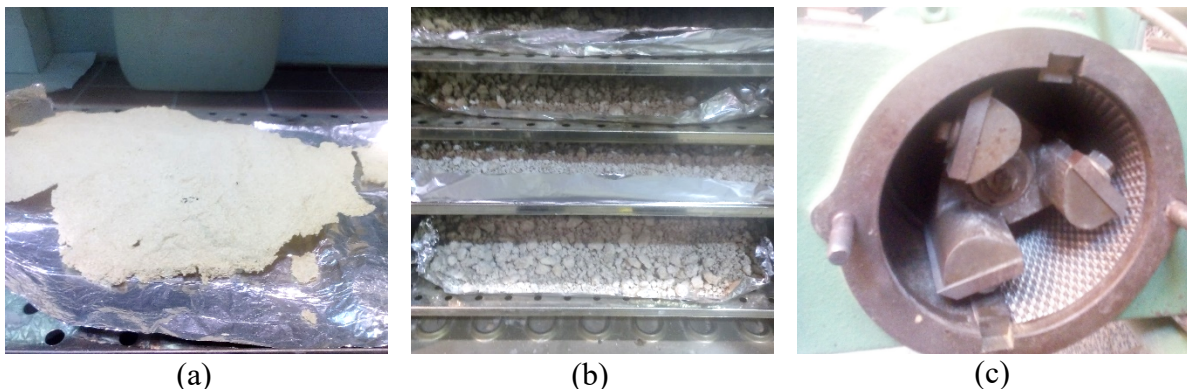


Abbildung 65: Recycling des Stützmaterials: (a) Holz-Stärke-Gemisch M-3 nach der Trocknung, (b) Trocknungsprozess des Holz-Gips-Gemisches M-4-Ref, (c) Mühle zur Aufbereitung des Granulats.

Nach der Trocknung wurde das Material gewogen und die neu hinzuzugebende Wassermenge anhand des ursprünglichen Mischungsverhältnisses berechnet. Die Zementzugabe erfolgte bei der entsprechenden Untersuchungsreihe während des Homogenisierens, d.h. Mischens, der trockenen Bestandteile. Die Zementzugabe wurde in Höhe von 1 % der Ausgangstrockenmasse festgelegt. Diese Annahme liegt wahrscheinlich über einer tatsächlich zu erwartenden Zementmasse im Stützmaterialgemisch, die nach einer Anwendung in das Material eingetragen wird. Beim nächsten Rezyklierungszyklus wiederholt sich der oben beschriebene Ablauf.

5.3.2 Experimentelle Ergebnisse

Nach einer Stunde Trocknung waren beide Stützmaterialrezepturen noch sehr feucht und nicht zur Zerkleinerung geeignet. Nach zwei Stunden war abzusehen, dass die Trocknung mehr Zeit als geplant in Anspruch nehmen würde. *Tabelle 17* fasst den Ablauf der Trocknung zusammen. Aufgrund der deutlich längeren Trocknungszeiten konnte das angestrebte Pensum von fünf Rezyklierungen nicht vollständig abgeschlossen werden.

Tabelle 17: Ablauf und experimentelle Ergebnisse aus der Trocknung des Stützmaterials.

Stützmaterial	Start Trocknung	Ende Trocknung am Folgetag	Gewicht vor Trocknung [g]	Gewicht nach Trocknung [g]	Gewichtsverlust [%]
M-3	13:10	08:30	4272	3444	19,4
M-4-Ref	12:41	07:46	4726	3672	22,3

Die Gewichtsverluste und die beobachteten Eigenschaften des zum ersten Mal rezyklierten Materials ließen darauf schließen, dass die ursprünglichen Konsistenzen der Stützmaterialien nicht erreichbar waren. Sowohl bei Rezeptur M-3 als auch bei Rezeptur M-4-Ref waren erhöhte Wasserzugaben notwendig, um eine der Ausgangskonsistenz vergleichbare Beschaffenheit zu erreichen.



Abbildung 66: Konsistenz der Stützmaterialrezeptur M-4-Ref (a) vor dem ersten Rezyklierungszyklus, (b) nach dem ersten Rezyklierungszyklus.

Weiterhin wurde festgestellt, dass die gipsbasierte M-4-Ref nach der Wiederaufbereitung nicht mehr in der Lage war, sich im Inneren zu verfestigen, wie es bei der Ursprungsmischung der Fall war. Nach der Wiederaufbereitung verfestigte sich das Material nun deutlich verlangsamt. Weitere Untersuchungen dieses Verhaltens sind notwendig. Von Interesse dabei ist, inwiefern das Material durch chemische Prozesse erhärtet und wie die Parameter der Prozessschritte, wie etwa das Trocknen, gestaltet werden müssen, um das Potenzial der frühen Verfestigung erneut zu aktivieren. Die gewählten 150 °C bis 160 °C, um das Kristallwasser auszutreiben, können jedoch nicht stark überschritten werden, da andernfalls irreversible Strukturveränderungen des Holzes erfolgen. Die Beobachtungen während der ersten Rezyklierungszyklen führten zur Schlussfolgerung, dass die Untersuchung des Fremdstoffeinflusses, d.h. von Zement, erst nach Aufklärung der Wiederaufbereitung der Ursprungsrezeptur erfolgen soll.

Im weiteren Projektverlauf wurde die Wiederverwendbarkeit der Stützmaterialrezepturen mit Calciumsulfathalhydrat intensiver erforscht. Dafür wurde die Rezyklierbarkeit von M-4-Ref und M-25 untersucht. Hierfür wurden beide Materialien zweimal bei 180 °C für 90 min kalziniert. Aufgenommen wurden jeweils von Frischmaterial und Rezyklaten Extrusionswiderstand und Verarbeitungszeit. *Abbildung 67* zeigt die Extrusionswiderstände einzelner Mischungen nach zweimaligem Rezyklieren. Die Extrusionswiderstände wurden mit dem in *Kapitel 4.1.1* beschriebenen Verfahren gemessen. *Abbildung 67* zeigt, dass die Extrusionswiderstände nach jedem Rezyklierungszyklus voneinander abweichen.

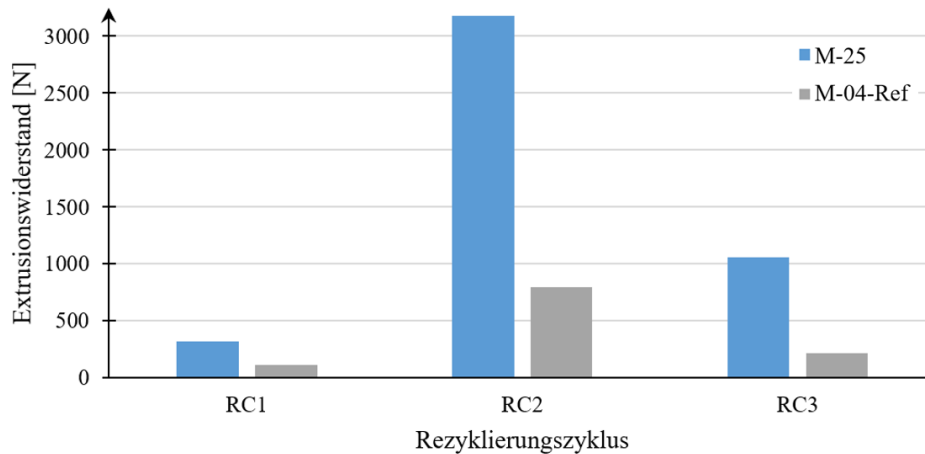


Abbildung 67: Gemessene Extrusionswiderstände der Rezepturen M-25 und M-04-Ref nach dreifachem Recycling.

Der Extrusionswiderstand liefert eine anwendungsorientierte Kennzahl bezogen auf eine spezifische Extrusionsvorrichtung. Um die Materialeigenschaften genauer zu beschreiben wurde die Penetrationskraft gemessen. Aus der gemessenen Penetrationskraft ist es möglich, die Scherspannung, die maximal vom Material aufgenommen werden kann, zu berechnen [45]. Abbildung 68 zeigt die gemessene Scherfestigkeit der Referenzrezeptur M-4-Ref sowie der Zielrezeptur M-25. Die Entwicklung der gemessenen Scherfestigkeit zeigt, dass die Verzögerungswirkung der Weinsäure im Zuge der Aufbereitung verloren geht. So tritt die Festigkeitsentwicklung bereits nach einer halben Stunde ein. Deutlich wird außerdem, dass die Festigkeiten beider Rezepturen im Laufe der Zyklen abnehmen. Darüber hinaus ist zu bemerken, dass die Rezeptur M-4-Ref nach der zweiten Rezyklierung keine messbare Festigkeitsentwicklung mehr aufweist.

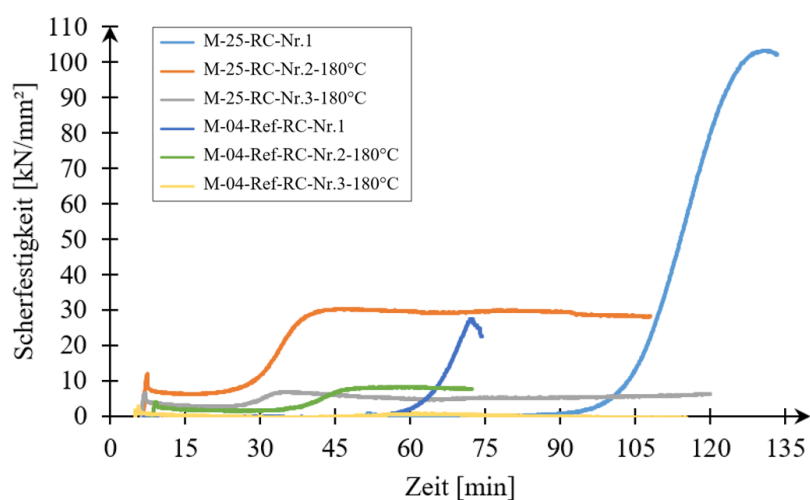


Abbildung 68: Mittels Penetrationsversuch gemessene Scherfestigkeit; RC-steht für Rezyklierungszyklus.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Rezyklierung die Eigenschaften des Stützmaterials deutlich beeinflussen und eine vollständige Wiederaufbereitung des Materials und das Erreichen der ursprünglichen Materialeigenschaften nicht möglich war. Weitere Untersuchungen erscheinen empfehlenswert.

6 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zur Prozess- und Materialgestaltung

Ziel dieses Kapitels ist es, die Wirtschaftlichkeit des Stützmate­rialeinsatzes zu analysieren. Zunächst werden Herangehensweise und Methodik erläutert, anschließend ausgewählte Aspekte diskutiert, die für eine Integration von Stützmaterial im Aufbauprozess 3D gedruckter Häusern von Bedeutung sind, und zuletzt durchgeführte Berechnungsergebnisse gewichtet.

6.1 Wirtschaftlichkeitsuntersuchung zu Prozesszeiten, -energien und -kosten

6.1.1 Herangehensweise und Methodik

Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit wurde anhand einer Betrachtung eines Gebäudemodells durchgeführt (Abbildung 69).

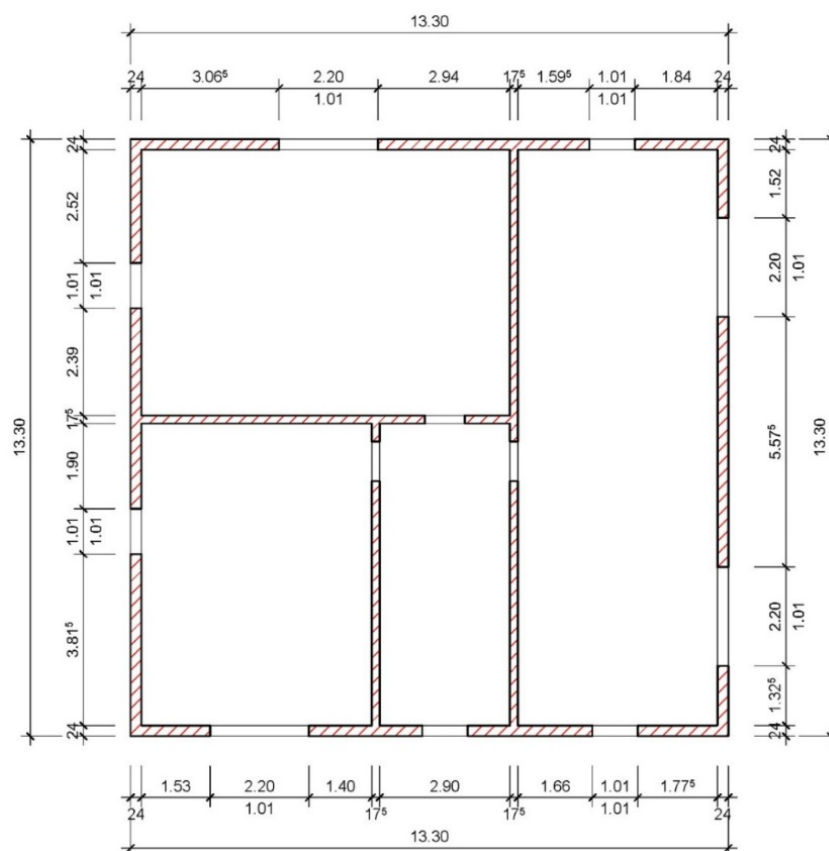


Abbildung 69: Grundrissmodell für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zum Einsatz des Stützmaterials für die Herstellung der Überhangsstrukturen in Anlehnung an [58].

Das gewählte Gebäudemodell beinhaltet standardisierte Öffnungsmaße für Fenster und Türen. Die Geschosshöhe beträgt 3,0 m bei einer Brüstungshöhe der Fenster von 1,0 m gemessen ab der Oberkante des Rohfußbodens. Die Außenwände haben eine Breite von 24,0 cm und die Innenwände haben eine Breite von 17,5 cm. Die festgelegten Maße der Außen- und Innenwände entsprechen dem standardisierten Mauerwerksbau. Das CONPrint3D®-Verfahren sieht den Ersatz des klassischen Mauerwerksbau vor. Die mittels CONPrint3D® hergestellten Wände können dem Mauerwerksbau gleiche Maße haben. Somit bilden die gewählten Maße des Gebäudemodells eine Grundlage für die Untersuchung der Wirtschaftlichkeit des 3D-Drucks von Beton unter Einsatz von Stützmaterial.

Für die Wirtschaftlichkeitsbewertung war die Ermittlung der anfallenden Bauarbeiten und die damit verbundene Mengenermittlung notwendig. Eine Übersicht über die Mengenermittlung sowie die daraus abgeschätzte notwendige Menge an Stützmaterial ist in *Tabelle 40* des Anhangs A.4 zu finden. Die ermittelten Mengen werden in *Reale Mengen* und *Mengen nach DIN 18830* gegliedert [59]. DIN 18330 beinhaltet Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Mauerarbeiten – und damit unter anderem Abrechnungsregeln für die Ermittlung der zu erbringenden Leistungen. Hierbei werden bei der Abrechnung nach Flächenmaß Öffnungen unter 2,5 m² und bei Abrechnungen nach Längenmaß Öffnungen unter 1 m nicht berücksichtigt. Diese Mengen sind in den kalkulatorischen Vergleich miteinbezogen (vgl. *Kapitel 2.1.2*). Die *Realen Mengen* beschreiben hingegen die exakten Längen-, Flächen- und Volumenmaße. Die in *Tabelle 40* dargestellte Übersicht über das Ausmaß der anfallenden Baumengen wird für die Ermittlung der Ausführungszeiten verwendet.

Die Flächen der Mengenermittlung ergeben sich aus der Multiplikation der Längen, Höhen und der Anzahl der Elemente. Die Volumina werden mithilfe der errechneten Flächen und der entsprechenden Wandbreite ermittelt. Die zu druckenden Elemente unterscheiden sich durch Volumen und Material. Für die Mengenberechnungen nach DIN 18330 wurde die Gesamtfläche aller Öffnungen von über 2,5 m² von der Fläche der Wände subtrahiert.

Die Ermittlung der Ausführungszeiten bildet die Grundlagen für die Kalkulation der Kosten und der zeitabhängigen Lasten, die sich für den Einsatz des Stützmaterials einstellen. Die herangezogenen verfahrensspezifischen Parameter des Druckprozesses basieren auf den Verfahren und Prozessen, die in [60] beschrieben sind. Für die Berechnung der Ausführungszeiten wurden die Wandelemente in drei verschiedene Druckabschnitte unterteilt (*Abbildung 70*).

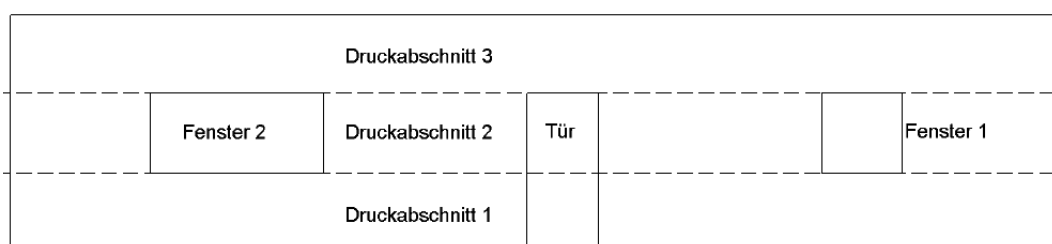


Abbildung 70: Aufteilung der Druckabschnitte; Südansicht des Gebäudemodells.

Gemäß CONPrint3D® wurde eine Näherung an den konventionellen Mauerwerksbau angestrebt und die Schichthöhe auf 5,0 cm festgelegt. Der erste Druckabschnitt umfasst die Schichten 1 bis 20, was einer Höhe (H) von 0 cm bis 100 cm und damit der Brüstungshöhe der Fenster entspricht. In diesem Abschnitt wird der Druckprozess lediglich durch Türöffnungen unterbrochen. Im zweiten Druckabschnitt (Höhe 100 cm bis 210 cm) verlängert sich der Druckprozess durch die Aussparungen für die Fenster. Der letzte Druckabschnitt (bis zur Höhe 300 cm) ist durch einen homogenen Druckprozess der Betonstruktur gekennzeichnet.

Für die einzelnen Druckabschnitte werden die spezifischen Schichtzykluszeiten ermittelt und mit der Anzahl der Schichten multipliziert. Ausgangspunkt für die Schichtzykluszeit bildet die gesamte Länge des Mauerwerks von 7999 cm, die durch die Geschwindigkeit des Druckkopfes von 15 cm/s geteilt wird. Unter der Annahme, dass der Druckkopf für die Extrusion des Stützmaterials gleichlang benötigt wie für die Betonextrusion, ist diese ermittelte Zeitspanne Basis für alle drei Druckabschnitte. Damit ist allerdings nur beschrieben, wie lange der Druckkopf für eine gerade Strecke benötigt. Im Verlauf des Druckvorgangs stellen sich jedoch Verzögerungen ein, die unter anderem durch sogenannte „Störstellen“ hervorgerufen werden. *Abbildung 71* stellt beispielhaft solche Störstellen dar. Störstellen entstehen durch konstruktive Maßnahmen und Gegebenheiten, wie etwa der Verzahnung der Wandelemente oder bei einem geraden Abschluss für Laibungen und der dadurch geforderten Präzision von Ausleger und Druckkopf. Wie in *Abbildung 71* dargestellt, werden für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit folgende Störstellen in Betracht gezogen: (a) freie Wandenden/Laibungen (FW), (b) Ecken (E), (c) Kreuzungen beziehungsweise T-Verbindungen (T-V) von Mauerwerk.

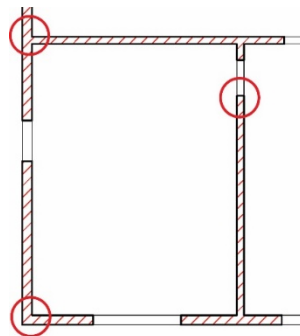


Abbildung 71: Arten der sogenannten Störstellen bei 3D-Druck mit Beton oder Stützmaterial.

Für die nötige Verzahnung der Elemente variiert die Druckstrategie mit jeder zweiten Schicht. Dadurch ergeben sich an den Störstellen je Schicht abwechselnd unterschiedliche Verzögerungen. Die Variation entsteht dadurch, dass das Drucken eines Wandabschnittes nur in jeder zweiten Schicht unterbrochen wird. In einer Schicht wird das Filament durchgehend gedruckt, in der nächsten Schicht wird an jener Stelle Filament ausgespart, wo die zu verzahnende Wand anläuft. Das Filament der zu verzahnenden Wand wird später dort hineinlaufen gelassen. Die entstehenden Verzögerungen stellen sich unter anderem durch die Flugrouten ein, die der Druckkopf für die Verzahnung zurückgelegt, ohne dabei Material zu extrudieren. Um die Kalkulation der Ausführungszeiten zu vereinfachen, wurde ein Mittelwert

der Verzögerungen je Störstelle gebildet. Für die gesamte Verzögerung je Druckabschnittspezifischer Schichtzykluszeit wird die Anzahl der Störstellen je Schicht mit den dazugehörigen Verzögerungen multipliziert. Bei jeder Störstelle stellt sich eine weitere Verzögerung des Druckprozesses ein, da der Druckkopf immer wieder beschleunigt und abbremst. Der Druckkopf weist eine Beschleunigung von 20 cm/s^2 auf. Mithilfe der errechneten Strecke und der zugehörigen Zeit, die der Druckkopf benötigt, um auf 15 cm/s zu beschleunigen, beziehungsweise auf 0 cm/s abzubremsten, wurde ein weiterer Pauschalwert ermittelt, der sich für jede Störstelle zwei Mal einstellt. Der Druckparameter Geschwindigkeit und die Herleitung der Verzögerung durch die Beschleunigung ist in *Tabelle 18* dargestellt.

Tabelle 18: Übersicht des zeitabhängigen Geschwindigkeitsprofils des Extruders.

Beschleunigung [cm/s^2]	20
Max. Geschwindigkeit [cm/s]	15
Dauer für Beschleunigung auf Max. Geschwindigkeit [s]	0,75
Strecke (s1) für Beschleunigung auf Max. Geschwindigkeit [cm]	5,625
Dauer für Strecke (s1) bei Max. Geschwindigkeit [s]	0,375
Dauer je Störstelle Start / Stopp [s]	0,375

Unter der Annahme, dass ein Wechsel der Düsen am Druckkopf nötig ist, um die zwei unterschiedlichen Materialien zu extrudieren und dabei Qualitätsanforderungen gerecht zu werden, stellt sich eine weitere Verzögerung ein. Qualitätsanforderungen meinen dabei, dass die Materialien nicht vermischt oder verunreinigt werden. Für diesen Vorgang können die Annahmen lediglich geschätzt werden. Es wird davon ausgegangen, dass der Wechsel beziehungsweise das Ansetzen der jeweils anderen Düse nicht länger als fünf Sekunden dauert. Alle Verzögerungen fasst *Tabelle 19* zusammen.

Tabelle 19: Übersicht der zeitlichen Verzögerungen des Druckkopfs bei unterschiedlichen Störstellen.

Verzögerung	Dauer [s]
Freies Wandende	12,00
Eckverbindung	27,50
T-Verbindung	26,00
Wechsel Druckkopf	5
Start/Stopp	0,38

6.1.2 Bewertung der Ergebnisse

Tabelle 20 gibt einen Überblick der Mengenermittlung. Die ausführliche Darstellung der Mengenermittlung ist in *Tabelle 40* im Anhang A.4 zu finden. Für das gewählte Gebäudemodell macht das Stützmaterial $8,9 \%$ des insgesamt zu druckenden Materialvolumens aus.

Tabelle 21 zeigt die Ausführungszeiten für den ersten Druckabschnitt. Die Aufteilung der Druckabschnitte sind in *Abbildung 70* abgebildet.

Tabelle 20: Ergebnisse der Mengenermittlung.

Außenwand 24 cm	Länge [m]	Fläche [m²]	Volumen [m³]
Menge nach DIN 18330	39,40	156,72	37,61
Menge Real	52,24	135,47	32,51
Innenwand 17,5 cm			
Menge nach DIN 18330	27,75	83,25	14,57
Menge real	27,75	77,85	13,62
Menge Stützmaterial (gesamt)	16,42	20,16	4,49

Tabelle 21: Ausführungszeiten Druckabschnitt 1.

Druckabschnitt (Höhe: 0 cm-100 cm)	Länge [cm]	Anzahl [n]	Dauer je Vorgang [s]	Dauer je Schicht [s]
Druckstrecke	7999	1	0,07	533,27
Start/Stop		30	0,38	11,25
Störstelle: FW		16	12,00	192,00
Störstelle: E		4	27,50	110,00
Störstelle: TV		6	26,00	156,00
Wechsel Druckkopf		8	5,00	40,00
Schichtzykluszeit [min]	17,38			
Gesamtdauer Druckabschnitt 1 [h]	5,79			

Die Vorgangsdauer der Druckstrecke entspricht dem Reziproken der Druckgeschwindigkeit. Die Schichtzykluszeit ist vor allem durch den Druckprozess des Materials und die Anzahl der Störstellen geprägt. Die Anzahl der Ecken und T-Verbindungen ist für alle Druckabschnitte gleich. Entscheidend für die Beeinflussung der Schichtzykluszeit durch den Einbau eines Stützmaterials ist die Anzahl an freien Wandenden. Der Ansatz „FW“ wurde für die Herstellung der Fenster- und Türleibungen herangezogen. Dadurch sollen die Qualitätsansprüche an die Oberflächen erfüllt werden. Hierbei ist zu beachten, dass auch von einer ebenen Stirnfläche am Stützmaterialfilament ausgegangen wird, weshalb sich diese Störstelle zweimal je Kontaktfläche Stützmaterial/Beton einstellt. Falls die Qualitätsansprüche für Fenster- und Türleibungen auch ohne diesen Ansatz ausreichen, wäre die Anzahl an FW nur noch halb so groß. Die damit eingesparte Zeit liegt allein beim ersten Druckabschnitt bei ungefähr 30 Minuten. Dieser Effekt verstärkt sich für den zweiten Druckabschnitt (Tabelle 22).

Tabelle 22 fasst die Eckdaten der Ausführungszeiten für alle Druckabschnitte zusammen. Ausführliche Informationen zur Berechnung der Dauer von einzelnen Druckabschnitten ist in Tabelle 41, Anhang A.4, zu finden.

Tabelle 22: Übersicht über die Dauer aller Druckabschnitte.

Druckabschnitt	Schichtzykluszeit [min]	Gesamtdauer FW [min]	Gesamtdauer [h]
1	17,38	64	5,79
2	24,30	201,6	8,50

3	13,41	0	4,47
Gesamt		265,6	18,76

Abbildung 72 stellt die kalkulierten Ausführungszeiten für den 3D-Druck des Gebäudemodells mit dem Einsatz des Stützmaterials dar. Anzumerken ist, dass sich die Ausführungsdauer mit dem Einbau des Stützmaterials fast verdoppelt hat [58].

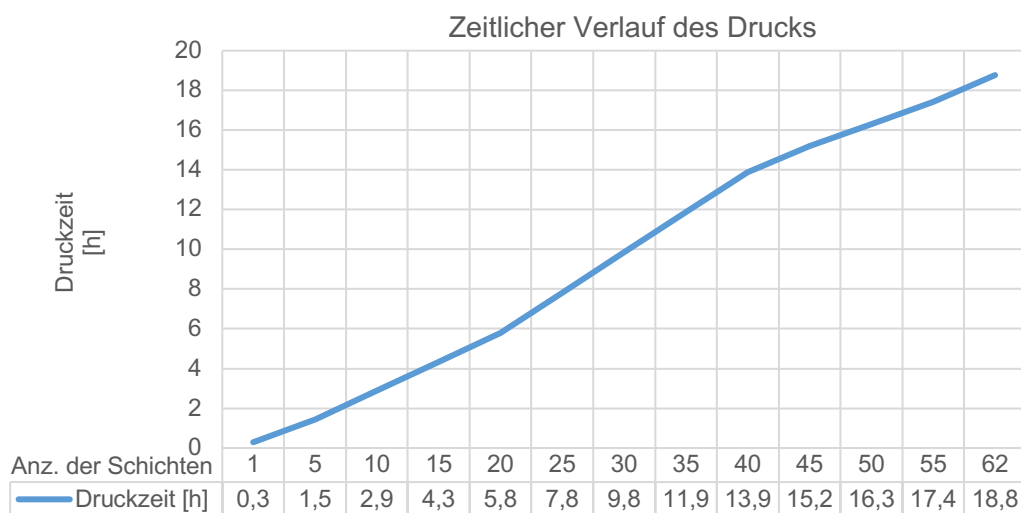


Abbildung 72: Zeitlicher Verlauf des Drucks des Gebäudemodells.

6.2 Wirtschaftlichkeitsuntersuchung zu Materialkosten unter Berücksichtigung der Wiederverwendbarkeit

Angesichts des aktuellen Entwicklungsstands der 3D-Drucktechnologie mit Beton wird davon ausgegangen, dass die Errichtung von Fundamenten, Decken und Dächern voraussichtlich mit konventionellen Methoden erfolgen wird. Aus diesem Grund sind die Herstellungskosten dieser Bauelemente zunächst für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung unbedeutend. Die zukünftige Entwicklung der 3D-Drucktechnologie bzw. spezifisch des CONPrint3D®-Verfahrens sieht den Einsatz eines modifizierten Druckkopfs vor, der zwischen dem Drucken von Beton und Stützmaterial alteriert. Die hier vorgestellte Kalkulation basiert auf den veröffentlichten Kennwerten und Kalkulationsansätzen in [58]. Das dort vorgestellte Gebäudemodell und die Kostenansätze werden weiterhin verwendet. Sie wurden unter Rücksichtnahme auf den Baupreisindex und aktuelle Angaben des Baukosteninformationszentrums (BKI) an das Jahr 2019 angepasst. Dies schafft die Grundlage für einen Vergleich zur nahezu vollautomatisierten Herstellung unter Verwendung des holzbasierten Stützmaterials geschaffen. Nachfolgend wird der Aufbau der Kalkulationen erläutert und die Wirtschaftlichkeit des Stützmaterial Einsatzes bewertet.

6.2.1 Herangehensweise und Methodik

Grundlage der Kalkulation ist die DIN 276 – Kosten im Bauwesen [61]. Diese regelt unter anderem die Gliederung und den Aufbau zur Ermittlung von Baukosten. Die DIN 276 gliedert

die Kosten in verschiedene Kostenarten und die Tiefe der Kalkulation, also die Genauigkeit, in verschiedene Stufen. Die im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbewertung angestellte Kalkulation basiert auf der 3. Stufe der Kostenermittlung, d.h. der Kostenberechnung. Die angestellte Kalkulation ist in vier Kostenarten unterteilt: Gerätekosten, Lohnkosten, Materialkosten und Sonstige Kosten (SoKo). Die ermittelten Kosten ergeben sich durch die Multiplikation der Mengen bzw. Zeitspannen mit den gewählten Ansätzen.

Grundlage für die Berechnungen der Leistungen ist die Mengenermittlung (*Kapitel 6.2.3*). Die Mengenermittlung wurde mit zwei verschiedenen Ansätzen erstellt. Einerseits wurden die Mengen nach DIN 18330, VOB Vergabe und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Mauerarbeiten berechnet [59]. Die Abrechnung nach VOB/C stellt den Regelfall im Bauwesen dar. Für die Kalkulation der Kosten für den SM-integrierten Aufbau wurden jedoch die tatsächlichen Mengen herangezogen, um eine möglichst genaue Kalkulation der Kosten zu erstellen.

Der Baupreisindex des Statistischen Bundesamtes gibt die Entwicklung der Preise für Positionen und Bauwerke an. Er wird vierteljährlich aktualisiert. Dabei wird alle 5 Jahre das Basisjahr gewechselt, auf das sich die Indizes berufen. Das aktuelle Basisjahr ist 2015, das als Durchschnitt den Index 100 hat. Somit können, mithilfe der Indizes, Preise an andere Jahre angepasst werden. Die für die Anpassung der Preise verwendeten Preisindizes beziehen sich auf die Entwicklung der Preise für Rohbauarbeiten für den Neubau von Wohngebäuden [62]. Hierbei bietet das Statistische Bundesamt zusätzlich einen Überblick zur Entwicklung der Preise unterteilt nach Arbeitskosten und Materialkosten an.

Es wurden die Preisindizes aus dem dritten Quartal des Jahres 2019 herangezogen. Für die Materialkosten ergibt sich ein Index von 108,6 und für die Arbeitskosten ein Index von 112,9. Der Preisindex des dritten Quartals für Mauerarbeiten an Wohngebäuden beträgt 114,8 [62]. Für die Anpassung der Gerätekosten wird der Erzeugerpreisindex für Baumaschinen in Deutschland herangezogen. Dieser Preisindex beträgt 105,4 [62]. Die Berechnung der neuen Preise erfolgt durch die Multiplikation der alten Preise mit dem neuen Index dividiert durch den alten Index: $\text{Kosten [alt]} \times \text{Index [neu]} / \text{Index [alt]} = \text{Kosten [neu]}$ [63].

6.2.2 Analyse der Einflussfaktoren

Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit des Stützmaterials beinhaltet die Analyse die vier Kostenarten Lohnkosten des eingesetzten Personals für Ein- und Abbau des Stützmaterials, Materialkosten des Stützmaterials, Gerätekosten, und Sonderkosten (SoKo). Die folgenden Abschnitte beschreiben diese Kostenarten detailliert.

Lohnkosten

Gemäß des Rechenansatzes in [58] wird für Prüfung, Justierung und Bedienung der Maschine ein Maschinenführer angesetzt. Zusätzlich wird für Nachbearbeitungen, Einlegen von Stürzen und Prüfungsarbeiten ein Bauhelfer vorgesehen. In Anbetracht des automatisierten Einbaus des Stützmaterials ist der Maschinenführer für die gesamte Errichtungsdauer eingeplant. Allerdings ändert sich das Aufgabenfeld des Bauhelfers dadurch, dass das Einlegen des Sturzes entfällt.

Es ist in Frage zu stellen, inwiefern ein Bauhelfer bei der größtenteils automatisierten Errichtung mittels 3D-Druck nötig ist. Solange Nachbearbeitung der gedruckten Strukturen vorgesehen ist, wird davon ausgegangen, dass auch ein Bauhelfer nötig ist. Allerdings kann bei der Weiterentwicklung der Technologie der automatisierten Herstellung von Stützstrukturen der Einsatz eines Bauhelfer wegfallen. In Anlehnung an [58] wurde ein Stundenlohn von 26 € und für den Maschinenführer ein Stundenlohn von 44 € angenommen. Die Lohnkosten lassen sich jedoch an das Jahr 2019 anpassen (*Tabelle 23*).

Tabelle 23: Anpassung der Lohnkosten.

Kostenpunkt	Preis je Arbeitsstunde	Preisindex Ausgangsjahr	Preisindex 3. Quartal 2019	Neupreis
Maschinenführer	44,00 €	100	112,9	49,68 €
Bauhelfer	26,00 €	100	112,9	29,35 €

Die Arbeitszeit richtet sich nach der im *Kapitel 6.1* berechneten Ausführungszeit von rund 19 Stunden. Für die Justier- und Rüstzeiten der Maschinen wird zusätzlich eine Stunde für den Maschinenführer angesetzt. Für Abriss, Wiederaufbereitung und Transport des Stützmaterials werden zusätzlich für den Bauhelfer vier Arbeitsstunden kalkuliert. Diese ergeben sich aus einer geschätzte Dauer von jeweils einer Stunde für Abriss und Zerkleinerung sowie An- und Abtransport des Materials.

Materialkosten

Zu den Materialkosten für den Beton kommen die Kosten für das Stützmaterial hinzu. Die Betonkosten lassen sich durch die Multiplikation des gewählten Kostenansatzes mit den ermittelten Mengen berechnen. Für den Beton werden die Kosten von 130 €/m³ in Anlehnung an [58] angesetzt. Die Materialkosten lassen sich ebenfalls an das betrachtete Jahr anpassen (*Tabelle 24*).

Tabelle 24: Anpassung der Materialkosten.

Kostenpunkt	Preis je m ³	Preisindex Ausgangsjahr	Preisindex 3. Quartal 2019	Neupreis
Material: Beton	130,00 €	103,075	108,6	136,97 €

Die relativ hohen Betonkosten entstehen durch Zusatzmittel, z.B. Verzögerer oder Fließmittel, die nötig sind, um die Konsistenz des Beton pump- und 3D-druckfähig einzustellen. Mit der Anpassung an den Preisindex ist der gewählte Ansatz verglichen mit den Kosten eines pumpfähigen Transportbetons eines örtlichen Anbieters in der Region Dresden als konservativ zu bewerten [64].

Die Kalkulation der Materialkosten für das Stützmaterial ist im Vergleich zur Kalkulation der Materialkosten für den druckbaren Beton erheblich komplexer. Für die aktuelle Berechnung wird eine gipsbasierte Rezeptur verwendet. Die Materialkosten für das Stützmaterial hängen

vom Aufwand seiner Wiederaufbereitung ab. Der aktuelle Stand erfordert erhebliche, kostenintensive Investitionen in die Anlagentechnik, die sich vor allem aus der notwendigen Trocknung des Stützmaterials ergeben. Hinzu kommen die laufenden Kosten für den hohen Energieverbrauch der Trocknung und das notwendige Personal für die Durchführung der Wiederaufbereitung und der Qualitätssicherung. Für diesen Fall ist davon auszugehen, dass die Herstellung und Wiederaufbereitung des Stützmaterials nur durch einen externen Anbieter, wie beispielsweise ein Transportbetonwerk oder Wertstoffhof, wirtschaftlich realisiert werden könnte. Diese Annahme ist damit zu begründen, dass das benötigte Stützmaterial je Objekt relativ gering ist und ein externer Anbieter die entsprechenden Leistungen für mehrere Bauunternehmen übernehmen kann. Dadurch wird eine bessere Auslastung und Amortisierung der Anlagentechnik erzielt. Da die Kalkulation der Kosten eines externen Anbieters nur hypothetisch erstellt werden können, wird für die Kalkulation der Stützmaterialkosten von einem idealisierten Material ausgegangen, dessen Prozesskette durchgehend durch einen Generalunternehmer realisiert wird. Idealerweise soll das Stützmaterial selbstständig austrocknen, mehrere Male ohne Qualitätssicherung bedenkenfrei eingesetzt werden können und für die Verarbeitung lediglich mit Wasser und erneut etwas Fließmittel angemischt werden. Dadurch werden die potenziell hohen Kosten der Trocknung umgangen. Die Anzahl der Wiederaufbereitungen des Materials wird in der Kalkulation variiert, um den Umfang einer potenziellen Kosteneinsparung durch die Wiederverwendung abschätzen zu können.

Bei der Berechnung der Materialkosten ist zu beachten, dass die Preise je Kilogramm von der Bestellmenge abhängig sind, weshalb eine Preisspanne für alle Materialien angegeben wird. Die Mindestbestellmengen sind dabei größtenteils von der Komponente abhängig und können zwischen 100 kg und mehreren Tonnen liegen (*Tabelle 25*). Es wurde versucht ein Mittelwert der Preisgrenzen zu schätzen.

Tabelle 25: Preisangaben für Komponenten des Stützmaterials.

Komponente des Stützmaterials	Mindestpreis [€/kg]	Maximalpreis [€/kg]
Maisstärke	0,3	0,5
Holzpartikel	0,05	0,1
Stuckgips	0,1	0,15
Guarkernmehl	1,5	3,0
Fließmittel	0,45	0,7
Wasser	0,002	0,002
Gesamt	2,1	3,95

Im Weiteren wird ein Stützmaterialvolumen von 5 m³ angenommen. Dies ist bewusst mehr als das Ergebnis der Mengenermittlung, um mögliche Materialverluste zu berücksichtigen.

Gerätekosten

Mit dem höheren Automatisierungsgrad der Herstellung stellt sich ein größerer Bedarf an Geräten ein. Mischen, Transportieren, Fördern und Wiederaufbereiten erfordern jeweils den Einsatz von Maschinen. Um die Gerätekosten in die Kalkulation einfließen zu lassen, wird ein

Wert kalkuliert, der die Gerätekosten je Einsatzstunde beschreibt. Dieser Wert wird anhand der erwarteten Nutzungsdauer, der monatlichen Einsatzzeit, ihrer kalkulatorischen Abschreibung (A), der kalkulatorischen Verzinsung (V) und Reparaturkosten (R) ermittelt. Um die Abschreibung, Verzinsung und Reparaturkosten (AVR) der modifizierten Gerätetechnik des CONPrint3D®-Verfahrens zu bestimmen, werden die Ansätze einer Autobetonpumpe aus der Baugeräteliste (BGL) übernommen. Analog zur Ausgangskalkulation wird dafür die Autobetonpumpe BGL 2015: Position B.7.61.0827 herangezogen.

Zusätzlich zu den Kosten der Autobetonpumpe fallen Investitionskosten für einen *Dualen Druckkopf* (DDK) und der zugehörigen Gerätesteuerung an. Der DDK soll in der Lage sein, sowohl den Beton als auch das Stützmaterial zu extrudieren. Zu bemerken ist, dass die Autobetonpumpen nicht dafür ausgelegt sind, zwei Materialien parallel zu fördern. Daher ist zusätzlich zu einem DDK eine Vorrichtung anzusetzen, die das Stützmaterial am Ausleger der Autobetonpumpe entlang leitet und pumpt. Die Kosten dieser Förderleitung und der generellen Modifizierung der Autobetonpumpe sollen in dem geschätzten Ansatz der Investitionskosten des DDK enthalten sein. In Anlehnung an [58] werden für einen Betondruckkopf 50.000 € und für die Gerätesteuerung 100.000 € angesetzt. Für einen DDK inklusive der zusätzlichen Förderleitung am Ausleger der Autobetonpumpe werden in der hier angestellten Kalkulation 100.000 € angenommen und für die modifizierte Gerätesteuerung 120.000 €. Die Kosten der zusätzlichen Förderleitung sollen dadurch kompensiert werden, dass die Grundlage für den Druckkopf und die für das CONPrint3D®-Verfahren notwendige Technik bereits geschaffen sind und dadurch weniger Entwicklungskosten anstehen. Die höheren Kosten für die Gerätesteuerung sind auf die Implementierung des Stützmaterialaufbaus zurückzuführen. Es wird angenommen, dass die Gerätesteuerungskosten vor allem durch die aufwendige Sensorik und die Datenverarbeitung entstehen. Davon ausgehend sind die zusätzlichen geschätzten 20 % als konservativ einzustufen. Weiterhin wird eine stationäre Betonpumpe benötigt, die das Stützmaterial zum DDK pumpt. Da der Volumenstrom je Stunde des zu pumpenden Stützmaterials bei 5 m³ über 10 Stunden gering ist, wurde die kleinste Dimensionierung einer Kolbenpumpe angenommen. Weiterhin stellt sich die Frage, wie Mischen, Wiederaufbereitung, Lagerung und Transport realisiert werden. Angenommen wird, dass das Material auf der Baustelle gemischt wird. Hinsichtlich des geringen Volumens des gesamten Stützmaterials, der hohen Schichtzykluszeiten von über 20 min und der wesentlich geringeren Mischzeiten des Materials von unter 10 min wird davon ausgegangen, dass die kleinste Dimensionierung eines Betonzwangsmischers mit 0,5 m³ Nenninhalt ausreicht. Für die Zerkleinerung wird ein Walzenbrecher vorgesehen. Der Walzenbrecher ist für die Nachzerkleinerung von Materialien geeignet und erbringt mit einer Spaltbreite von 1-3 mm eine ausreichende Zerkleinerung bei weniger als einem Drittel der Anschaffungskosten einer Rohrmühle. Für den Transport des Materials zur Baustelle und zurück ist ein Muldenbehälter mit 5,5 m³ vorgesehen und ein Lastkraftwagen mit der Zusatzausrüstung, um die Mulde auf- und abladen zu können. Für die Lagerung des granulierten Materials auf dem Bauhof wird ein Hochsilo mit einer Kapazität von 13 m³ vorgesehen. In diesem Silo können mehr als eine Charge für das Gebäudemodell gelagert werden. Eine Übersicht aller veranschlagten Geräte, ihren zugehörigen BGL-Positionen und für die Kalkulation relevanten Kennwerte ist in *Tabelle 26* dargestellt.

Tabelle 26: Auflistung der benötigten Anlagetechnik.

Geräte	Nummer	Mittlerer Neuwert	Monatlicher Satz für Reparaturkosten	Monatlicher Satz für Abschreibung und Verzinsung	Nutzungsjahre	Vorhaltemonate
Autobetonpumpe inklusive Investitionskosten für DDK	B.7.61.0827	489.000 €	2,10%	2,7%-3%	6	45-40
Stationäre Betonpumpe, Zweizylinder-Kolbenpumpe	B.7.10.0055	91.600 €	2,10%	2,7%-3%	7	45-41
Beton-Zwangsmischer (Tellerischer)	B.4.00.0750	43.100 €	2,10%	2,9%-3,3%	5	40-35
Walzenbrecher	A.1.05.0504	45.700 €	1,30%	2,8%-3,2%	8	65-60
Absetzmulde	P.7.00.0055	1.150 €	2,60%	4,4%-5,5%	3	25-40
LKW ohne Allradantrieb inkl. Absetzeinrichtung für Mulden	P.2.00.0075-AG	73.920 €	2,20%	2,9%-3,2%	9	45-40
Hochsilo	B.1.10.0015	9500	95	2,1%-2,3%	8	60-55

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Preisspannen der monatlichen Ansätze für die Abschreibung und die Verzinsung von den Vorhaltemonaten abhängen. In der Kalkulation wird nur für die modifizierte Autobetonpumpe (ABP) und den Lastkraftwagen (LKW) der höhere Prozentsatz angenommen. Das ist damit zu begründen, dass die übrigen Geräte ausschließlich für die Anwendung des Stützmaterials gedacht sind und dadurch nur gering beansprucht werden. Deshalb wird für diese die maximale Nutzungsdauer angenommen. Für die Kalkulation der ABP ist die errechnete Ausführungszeit von 19 Stunden zuzüglich einer Stunde für Justier- und Rüstzeit anzusetzen. Die stationäre Betonpumpe und der Betonzwangsmischer werden lediglich für die 15 Stunden benötigt, in denen auch das Stützmaterial verarbeitet wird. Der Walzenbrecher benötigt bei einem Massendurchsatz von 4-6 Tonnen je Stunde nicht länger als eine Stunde für die Aufbereitung des Materials. Der Muldenbehälter inklusive Trockenmaterial muss vor dem Start des Druckvorgangs auf der Baustelle zur Verfügung stehen und verbleibt dort bis zum Ende des Abrisses des Stützmaterials. Es wird davon ausgegangen, dass das Stützmaterial 24 Stunden nach der Fertigstellung des Objekts abzureißen ist. Die Herstellung des Objekts beansprucht bei 19 Stunden Herstellungsdauer und einer täglichen Arbeitszeit von acht Stunden ungefähr 2,5 Arbeitstage im Einschichtbetrieb. Inklusive 24 Stunden Wartezeit werden für die Mulde 3,5 Arbeitstage, also 28 Stunden kalkuliert. Für das Hochsilo wird auch die gesamte Ausführungsdauer von 2,5 Arbeitstagen (d.h. 20 Stunden) angesetzt. Für den LKW wird jeweils eine Stunde für Lieferung und Abholung der Mulde eingeplant. Die in der BGL

enthaltenen mittleren Neuwerte sind für das Jahr 2015 mit dem Preisindex 100 angegeben. Es folgt die Preisanpassung an das Jahr 2019 mit dem Erzeugerpreisindex für Baumaschinen von 105,4 (Tabelle 27).

Tabelle 27: Anpassung der mittleren Maschinen-Neuwerte an das Jahr 2019, bezogen auf 2015.

Gerät	Nummer	Mittlerer Neuwert 2015	Mittlerer Neuwert 2019
Autobetonpumpe inkl. Investitionskosten für DDK	B.7.61.0827	489.000 €	515.406 €
Stationäre Betonpumpe, Zweizylinder-Kolbenpumpe	B.7.10,0055	91.600 €	96.546 €
Beton-Zwangsmischer (Tellermischer)	B.4.00.0750	43.100 €	45.427 €
Walzenbrecher	A.1.05.0504	45.700 €	48.168 €
Absetzmulde	P.7.00.0055	1.150 €	1.212 €
LKW ohne Allradantrieb inkl. Absetzeinrichtung für Mulden	P.2.00.0075-AG	73.920 €	77.912 €
Hochsilo	B.1.10.0015	9.500 €	10.013 €

Sonderkosten

In der ursprünglichen Kalkulation ist eine Sonderkostenpauschale in Höhe von 10 % der restlichen Kosten angedacht. Dieser Ansatz wird übernommen, da eventuelle Mehrkosten, die sich durch die Integration des Stützmaterials ergeben, durch die prozentuale Berechnung abgedeckt werden sollen. Hinsichtlich der großen Investitionssummen für eine modifizierte Anlagentechnik und der eindeutigen Preissteigerung gegenüber der Ursprungskalkulation ist davon auszugehen, dass eine derartige 10%-Pauschale der Sonderkosten ein verbleibendes Restrisiko der Kalkulation vollständig abdeckt. Die Strom- und Wasserkosten aller Prozesse sollen in dieser Pauschale ebenfalls enthalten sein.

6.2.3 Kalkulation der Prozess- und Materialkosten

Für die Berechnung der Lohnkosten werden die gewählten Kostenansätze mit den jeweiligen Arbeitsstunden multipliziert (Tabelle 28).

Tabelle 28: Lohnkosten.

Kostenstelle	Kosten je Arbeitsstunde	Arbeitsstunden [h]	Lohnkosten
Maschinenführer	49,68 €	20	993,52 €
Bauhelfer	29,35 €	23	675,14 €
Gesamt	-	-	1.668,66 €

Anschließend erfolgt die Berechnung der Materialkosten durch Multiplikation der gewählten Kostenansätze und den Ergebnissen der Mengenermittlung. Um den Bezug zwischen Mengenermittlung und Materialkosten herzustellen, muss zunächst der Kubikmeterpreis der

Mischung bestimmt werden. Bei einer Dichte von 1018 kg/m³ entspricht 1 m³ des auf z.B. Holz-Stärke basierenden Stützmaterials 1018 kg. Anhand des prozentualen Masseanteils und der minimalen bzw. maximalen Preise der einzelnen Komponenten werden die Kostenanteile errechnet. *Tabelle 29* stellt die anteiligen Kosten der SM-Komponenten für 1 m³ der Mischung dar. In dieser Tabelle werden alle Komponenten erfasst, die durch die Wiederaufbereitung erhalten bleiben. Das bedeutet, dass diese Kosten durch die Anzahl der Wiederverwendungen geteilt werden können. Hinzu kommen die Komponenten Wasser und Fließmittel, welche bei jeder Mischung erneut hinzugefügt werden müssen (*Tabelle 30*).

Tabelle 29: Kosten der rezyklierbaren Komponenten des Stützmaterials je m³.

Komponenten	Masseanteil [%]	Masse in kg je m ³ SM	Preis je kg, min	Preis je kg, max	Preis je m ³ SM, min	Preis je m ³ SM, max
Holzpartikel	13,1	133,358	0,05 €	0,10 €	6,67 €	13,34 €
Maisstärke nativ	18,7	190,366	0,30 €	0,50 €	57,11 €	95,18 €
Guarkernmehl	4,7	47,846	1,50 €	4,00 €	71,77 €	191,38 €
Gesamt	36,5	-	-	-	135,55 €	299,90 €

Tabelle 30: Kosten der nicht rezyklierbaren Komponenten des Stützmaterials je m³.

Komponenten	Massenanteil [%]	Masse in kg je m ³ SM	Preis je kg, min	Preis je kg, max	Preis je m ³ SM, min	Preis je m ³ SM, max
Wasser	60,7	617,926	0,002 €	0,002 €	1,24 €	1,24 €
Fließmittel	2,8	28,504	0,45 €	0,70 €	12,83 €	19,95 €
Gesamt	63,5	-	-	-	14,06 €	21,19 €

Abhängig von der möglichen Anzahl der Wiederaufbereitungen des Materials können die Materialpreise reduziert werden. Mit der Wiederaufbereitung entstehen allerdings auch Kosten für die dafür erforderlichen Geräte. *Tabelle 31* zeigt die Entwicklung der Stützmaterialkosten in Abhängigkeit von der Anzahl der Wiederaufbereitungen, ohne dabei die Gerätekosten mit einzubeziehen.

Tabelle 31: Entwicklung der SM-Kosten für 1 m³ nach „x“ Anwendungen.

Anzahl x der Anwendungen	Kosten RC-Komponenten für x Anwendungen	Kosten nicht RC-Komponenten für x Anwendungen	Gesamtkosten SM für x Anwendungen
1	135,6 €	14,1 €	149,6 €
5	27,1 €	14,1 €	41,2 €
10	13,6 €	14,1 €	27,6 €
20	6,8 €	14,1 €	20,8 €
30	4,5 €	14,1 €	18,6 €
40	3,4 €	14,1 €	17,4 €
50	2,7 €	14,1 €	16,8 €

Tabelle 32 gibt die gesamten Materialkosten für das gewählte Gebäudemodell abhängig von der Anzahl der Wiederverwendungen des Stützmaterials an. Die Anzahl der Anwendungen wird

durch die Zahl in der Spalte Kostenpunkt wiedergegeben. Um eventuelle Materialverluste zu kompensieren wurden die Mengen auf ganze Zahlen aufgerundet.

Tabelle 32: Materialkosten abhängig von Anzahl der Wiederaufbereitungen.

Kostenpunkt	Kosten je m ³	Aufgerundete Menge in m ³	Materialkosten
Beton	136,97 €	47	6.437,51 €
SM-1*	149,61 €	5	748,05 €
SM-5	41,17 €	5	205,85 €
SM-20	20,8375	5	104,19 €
SM-50	16,771	5	83,86 €
Gesamt-1	-	-	7.185,56 €
Gesamt-5	-	-	6.643,36 €
Gesamt-20	-	-	6.541,69 €
Gesamt-50	-	-	6.521,36 €

*SM: Stützmaterial

Für die Kalkulation der Gerätekosten muss ein stündlicher Satz der Vorhaltekosten berechnet werden. Dieser ergibt sich aus der Division der monatlichen Ansätze für die AVR durch die monatliche Geräteauslastung, d.h. der Einsatzzeit in einem Monat. Entsprechend der Ausgangskalkulation wird eine mittlere Maschinenauslastung von 145 Stunden je Monat angenommen [58]. Durch die Multiplikation der stündlichen Vorhaltekosten mit den gewählten Ansätzen für die Einsatzstunden der entsprechenden Geräte ergeben sich die gesamten Gerätekosten (Tabelle 34). Zusätzlich zu diesen Gerätekosten ist eine Anfahrtspauschale in Höhe von 300 € für die ABP einzuplanen [58].

Tabelle 33: Vorhaltekosten der Geräte für eine Auslastung von 145 h/Monat.

Gerät	Mittlerer Neuwert 2019	Monatssatz Reparaturkosten	Monatssatz Abschreibung und Verzinsung	Vorhaltekosten je Stunde
ABP inkl. DDK	515.406 €	2,10 %	3,00 %	181,28 €
Stationäre Betonpumpe	96.546 €	2,10 %	2,70 %	31,96 €
Zwangsmischer	45.427 €	2,10 %	2,90 %	15,66 €
Walzenbrecher	48.168 €	1,30 %	2,80 %	13,62 €
Absetzmulde	1.212 €	2,60 %	4,40 %	0,59 €
LKW	77.912 €	2,20 %	3,20 %	29,02 €
Hochsilo	10.013 €	1,00 %	2,10 %	2,14 €

Tabelle 34: Gesamtüberblick über die Gerätekosten.

Gerät	Vorhaltekosten je Stunde	Einsatzstunden [h]	Gerätekosten
ABP inkl. DDK	181,28 €	20	3.625,61 €
Stationäre Betonpumpe	31,96 €	15	479,40 €
Zwangsmischer	15,66 €	15	234,97 €
Walzenbrecher	13,62 €	1	13,62 €
Absetzmulde	0,59 €	28	16,38 €

LKW	29,02 €	2	58,03 €
Hochsilo	2,14 €	20	42,81 €
Gesamtkosten	-	-	4.470,84 €

6.2.4 Bewertung der Prozess- und Materialkosten

Die Mengenermittlung hat bereits auf den Unterschied zwischen den realen Mengen und den Mengen nach DIN 18330 aufmerksam gemacht. Demnach sind die Betonmengen nach dieser DIN über 5 m³ höher. Bei einem Betonpreis von rund 137 €/m³ (vgl. *Tabelle 24*) ergibt das einen Kostenunterschied von 685 €, der bei der Abrechnung nach DIN zusätzlich anfällt. In *Tabelle 35* sind die Kosten für das CONPrint3D®-Verfahren einschließlich eines integrierten Stützmaterialaufbaus mit den Betonmengen nach DIN dargestellt.

Tabelle 35: Gesamtkosten CONPrint3D®-Verfahren einschließlich des automatisierten Stützmaterialaufbaus unter Anwendung der DIN 18330. Es wird ein einmaliges Wiederaufbereiten des Stützmaterials angenommen.

Kostenstelle	Ansatz	Kosten netto	Anteil an den Gesamtkosten
Lohn	20 h Maschinenführer, 25 h Bauhelfer	1.727 €	11%
Material	52,3 m ³ Beton, 5 m ³ SM ohne Wiederaufbereiten	7.911 €	50%
Geräte	Verschiedene Geräte + 300 € Pauschalkosten	4.771 €	30%
SoKo	z.B. Kosten für Nachbehandlung und Baustoffprüfung	1.566 €	10%
Gesamt		15.976 €	100%

Durch die Integration eines Stützmaterials in den 3D-Druck von Beton entstehen Mehrkosten in Höhe von 5.171 €. Diese Summe errechnet sich durch die Subtraktion der Gesamtkosten des CONPrint3D®-Verfahrens ohne SM-einsatz von den Gesamtkosten des CONPrint3D®-Verfahrens einschließlich des automatisierten Stützmaterialaufbaues, siehe *Tabelle 35* und *Tabelle 36*. Anzumerken ist hierzu jedoch, dass eine Wiederaufbereitung des Stützmaterials nicht berücksichtigt wurde. Wenn die Gesamtkosten für das CONPrint3D®-Verfahren ohne SM-einsatz als absoluter Wert betrachtet werden, entspricht die Steigerung der Kosten im Fall eines automatisierten Stützmaterialaufbaus von 5.171 € einer Erhöhung der Gesamtkosten auf rund 48 %.

Tabelle 36: Gesamtkosten CONPrint3D®-Verfahren, ohne SM-einsatz.

Kostenstelle	Ansatz	Kosten netto	Anteil an Gesamtkosten
Lohn	10 h Maschinenführer, 10 h Bauhelfer	790 €	7%
Material	52,3 m ³ Beton	7.164 €	66%
Geräte	ABP: 10 h Maschineneinsatz + 300 € Pauschale	1.792 €	17%
SoKo	z.B. Kosten für Nachbehandlung und Baustoffprüfung	1.059 €	10%
Gesamt		10.805 €	100%

6.3 Gesamtwirtschaftlichkeitsbetrachtung der Herstellung von Fenster- und Türstrukturen

Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung wurden die Herstellungskosten für die Wände eines einstöckigen Einfamilienhauses betrachtet. Dabei sollte die Herstellung von Öffnungen ohne manuelles Einlegen von Fenster- oder Türstürzen erfolgen. Zusätzlich wurden Ansätze und Kosten bestimmt, die eine mögliche Wiederaufbereitung des Stützmaterials beschreiben. Dabei wurde das Potenzial ersichtlich, die Materialkosten bereits nach 5 bis 10 Anwendungen durch die Wiederaufbereitung zu reduzieren. Im Rahmen dieser Kalkulation wurde von einem idealen Stützmaterial ausgegangen. *Abbildung 73* stellt die Kostenentwicklung für das Stützmaterial in Abhängigkeit der Anzahl der Rezyklierungszyklen dar.

Die Kosten für den Gebäudeaufbau mittels modifizierter Anlagentechnik in Form eines dualen Druckkopfes liegen bei rund 148 % der ursprünglichen Kosten des CONPrint3D®-Verfahrens. Der größte Anteil der Mehrkosten liegt bei den Lohn- und Gerätekosten, welche sich im Wesentlichen durch höhere Investitionskosten für die Anlagentechnik und eine Verlängerung der Ausführungszeit ergeben. Anhand des Vergleichs von unterschiedlichen Kostenarten können die Kostenunterschiede grafisch dargestellt werden (*Abbildung 74*).

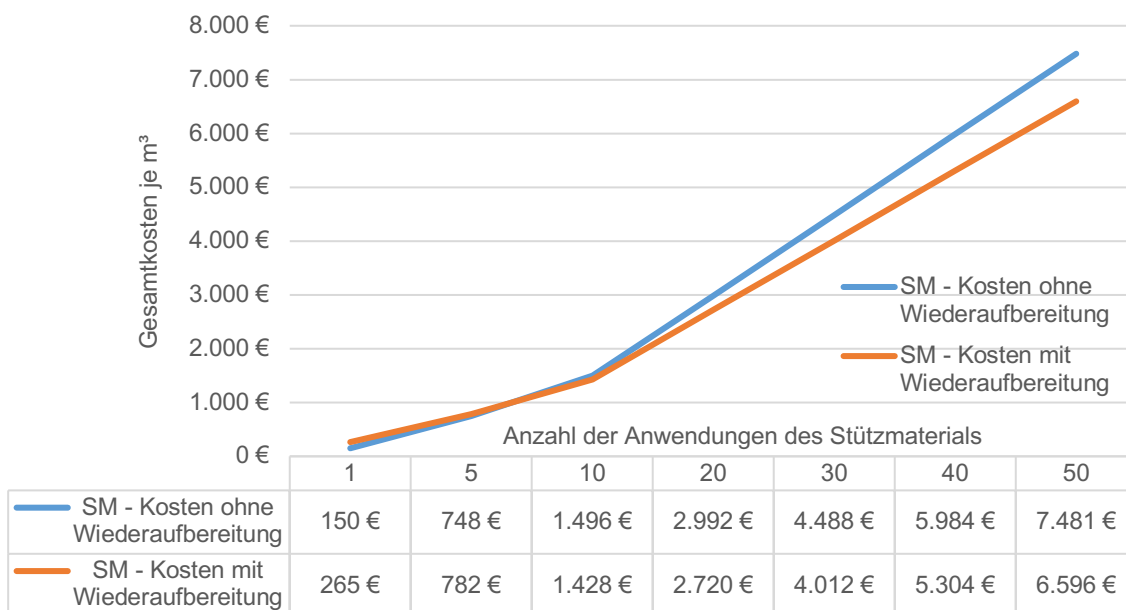


Abbildung 73: Vergleich der Kosten für den Stützmaterial Einsatz mit und ohne Wiederaufbereitung.

Hinsichtlich Ausführungszeiten und Kosten konnte ein Einsparungspotenzial identifiziert werden. In diesem Fall muss auf den DDK verzichtet und stattdessen eine zusätzliche Anlagentechnik verwendet werden. Dieser Ansatz ist allerdings kritisch zu betrachten, da sich dadurch weitere Herausforderungen hinsichtlich der Gerätesteuerung ergeben. Die Integration eines Stützmaterialaufbaus in das CONPrint3D®-Verfahren verursacht in jedem Fall

wesentliche Mehrkosten im Bereich der Anlagentechnik, die durch die Kosten für die Rezyklierung des Stützmaterials nicht kompensiert werden können. Dadurch birgt allerdings die Optimierung der verfahrenstechnischen Parameter und die damit verbundene Reduzierung der Ausführungszeiten bedeutende wirtschaftliche Vorteile. Hinsichtlich schneller steigender Lohnkosten im Vergleich zu Material- und Gerätekosten (siehe Baupreisindex) ist davon auszugehen, dass der Wettbewerbsvorteil des CONPrint3D®-Verfahrens mit einem automatisierten Aufbau des Stützmaterials weiter zunimmt.

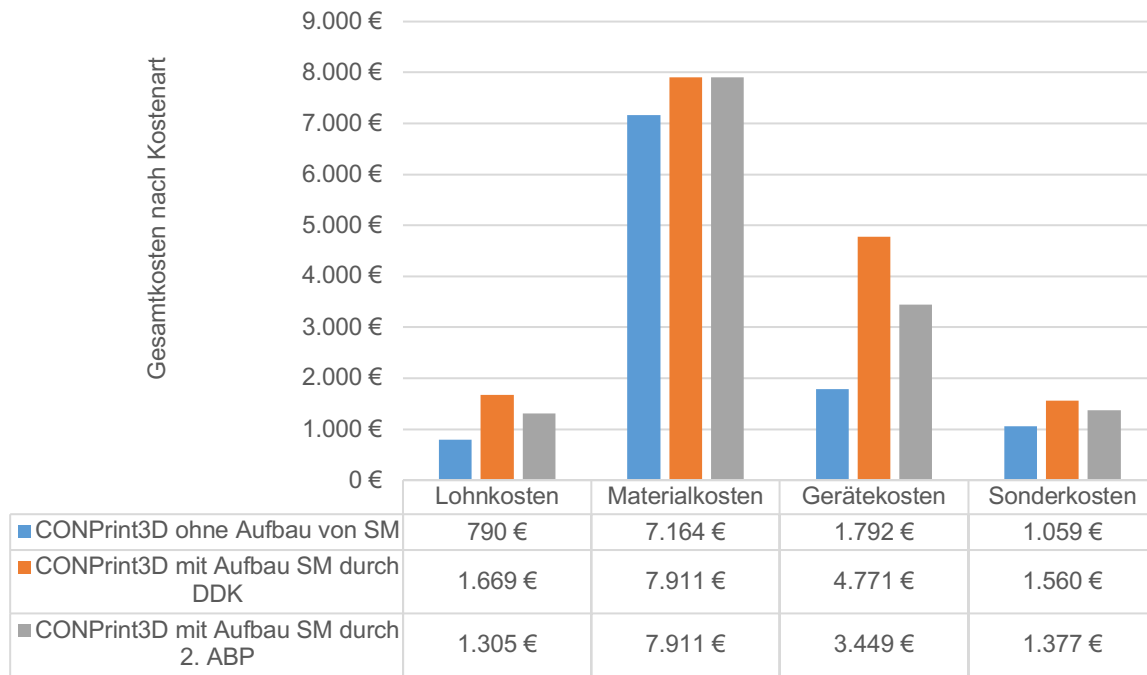


Abbildung 74: Vergleich der Kostenarten unterschiedlicher Verfahrenstechniken für das CONPrint3D®-Verfahren (SM: Stützmaterial).

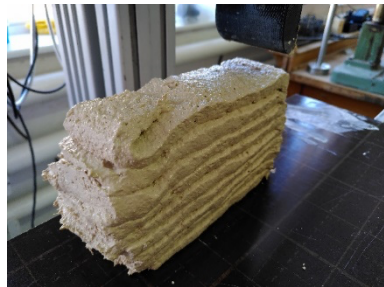
7 Prozesstest im Labormaßstab und Aufbau von Demonstratorstrukturen

7.1 Herstellung von gestützten Betondruckteilen im Labormaßstab

Abbildung 75 stellt Stützmaterialstrukturen aus unterschiedlichen Rezepturen dar. Alle diese wandartigen Strukturen wurden mittels eines Extruders mit Exzentrerschneckenpumpe hergestellt (Details zur Pumpe siehe Kapitel 4). Alle untersuchten Stützmaterialrezepturen konnten extrudiert und schichtweise aufeinander abgelegt werden. Die Eigenschaften des Stützmaterials waren jedoch entscheidend für die Stabilität der Struktur.

Eine fließfähige Konsistenz des Stützmaterialgemisches, wie es der Fall bei den Rezepturen M-4-Ref und M-5 war, ist vorteilhaft für Extrudierbarkeit und Pumpbarkeit. Allerdings beeinträchtigt eine hohe Fließfähigkeit des Stützmaterials die Formstabilität der Stützstruktur

(M-5, *Abbildung 75b*). Wenn die Aufbau- und die damit verbundene Aufbau des hydrostatischen Drucks die Festigkeitsentwicklung des Stützmaterials überschreitet, deformiert sich zunächst und am meisten die unterste Schicht (M-5, *Abbildung 75b*, und M-18, *Abbildung 75e*). Demgegenüber trägt eine steifere Konsistenz des Stützmaterials zur Erhaltung der von der Düse vorgegebenen Form bei (M-17, *Abbildung 75d*, und M-25 *Abbildung 75f*).



(a) M-4-Ref



(b) M-5



(c) M-16



(d) M-17



(e) M-18



(f) M-25

Abbildung 75: 3D-gedruckte wandartige Stützstrukturen unter Verwendung ausgewählter Rezepturen.

In *Abbildung 76* ist die wandartige Stützstruktur der Rezeptur M-4-Ref dargestellt. Deutlich ist insbesondere in der Perspektive von *Abbildung 76c* zu sehen, dass durch die Verformung der ersten Schichten die Gesamtstabilität der gesamten Struktur gefährdet ist. Zu bemerken ist, dass die Schichten des Stützmaterials fortlaufend mit der Bewegung der Düse vor- und rückwärts extrudiert wurden.

Abgesehen davon, dass die Rezepturen mit Calciumsulfat höhere Druckfestigkeiten in einem späteren Zeitraum vorweisen als die Rezeptur auf Holz-Stärke-Basis, zeigt das auf Holz-Stärke-basierte Stützmaterial eine höhere Formstabilität nach der Extrusion. So war es möglich, auf ein Holz-Stärke-basiertes Stützmaterial Betonschichten abzulegen (*Abbildung 77*). Das Zeitintervall zwischen Ablage der Stützmaterial- und Betonschichten betrug 30 Sekunden.

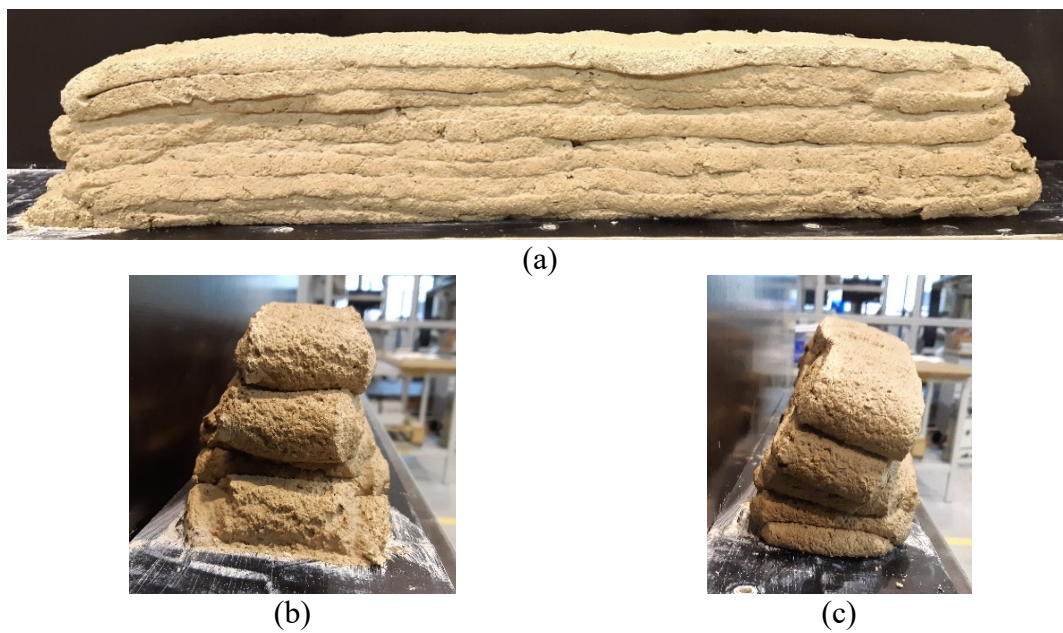


Abbildung 76: Wandartige Stützstruktur hergestellt mit dem Stützmaterial M-4-Ref aus verschiedenen Perspektiven.



Abbildung 77: Ablage eines Betonfilaments auf die Stützstruktur, Rezeptur M-3.

Auf die Stützstruktur wurden insgesamt sechs Betonschichten darauf abgelegt (Abbildung 78a). Allerdings offenbarte sich etwa nach fünf Minuten nach dem Auflegen der Betonschichten eine deutliche Verformung der Stützstruktur (Abbildung 78b). Dieser Verlust an Formstabilität erforderte die Weiterentwicklung des Stützmaterials, d.h. für den Bau weiterer Demonstratorobjekte wurden verbesserte Rezepturen mit Calciumsulfat verwendet.

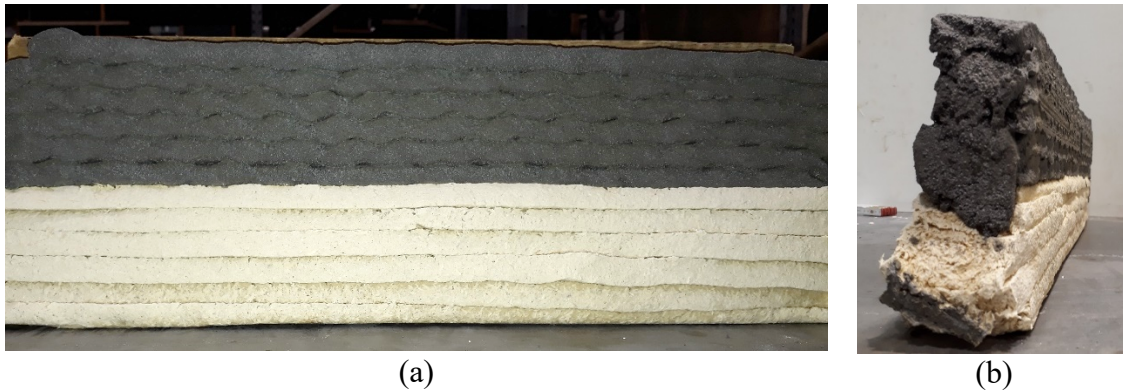


Abbildung 78: Stützstruktur (Rezeptur M-3) mit darauf abgelegten, 3D-gedruckten Betonschichten: (a) Seitenansicht, (b) Frontansicht.

7.2 Prüfung der Entfernbareit des Stützmaterials im Labormaßstab

Die Entfernbareit des Stützmaterials stellt eine wichtige Aufgabe für eine problemlose Wiederverarbeitung dar. Daher ist die Interaktion des Stützmaterials, abgesehen von der Möglichkeit der mechanischen Entfernung, in der Kontaktzone mit dem Beton zu untersuchen (Abbildung 79).



Abbildung 79: Kontaktbereich des Stützmaterials mit darauf 3D-gedrucktem Beton (Schnitt durch den erhärteten Festkörper).

Die Untersuchungen zur Entfernbareit des Stützmaterials vom Beton zeigten, dass beim Trennen sowohl Betonanhaftungen am Stützmaterial als auch Stützmaterialanhaftungen am Beton verbleiben (siehe *Abbildung 62*, auch *Abbildung 80*). Um das Ausmaß der Anhaftungen von Beton an der Grenzfläche es Stützmaterials zu analysieren, wurde ein besonderer Versuchsaufbau entwickelt. Eine würfelförmige Schalung wurde zunächst bis zur Hälfte mit dem Stützmaterial (Rezeptur M-3) und anschließend mit dem druckbaren Beton C-2 gefüllt (Betonrezeptur siehe [54]). Der Kompositprobekörper wurde bei der kontrollierten Temperatur von $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchte von $(65 \pm 5) \%$ für 24 Stunden gelagert, bevor das Stützmaterial vom Beton abgetrennt wurde. *Abbildung 80* zeigt die Oberfläche des Stützmaterials nach dem Entfernen des Betons.



Abbildung 80: Grenzfläche des Stützmaterials nach dem Entfernen des Betons nach 24 Stunden Lagerung.

Für die Quantifizierung der Betonanhaftungen wurde ein automatisiertes, softwaregestütztes Bildanalyseverfahren verwendet (digitales Lichtmikroskop VHX 6000, Keyence Deutschland GmbH, Neu-Isenburg, inklusive hochauflösendes Bildanalysetool). Die Oberfläche des Stützmaterials wurde mit 20-facher Vergrößerung aufgenommen (Abbildung 81a). Im nächsten Schritt wurde das Bild binarisiert (Abbildung 81b), so dass das Stützmaterial hellgrau und die Betonanhaftungen schwarz dargestellt erscheinen.

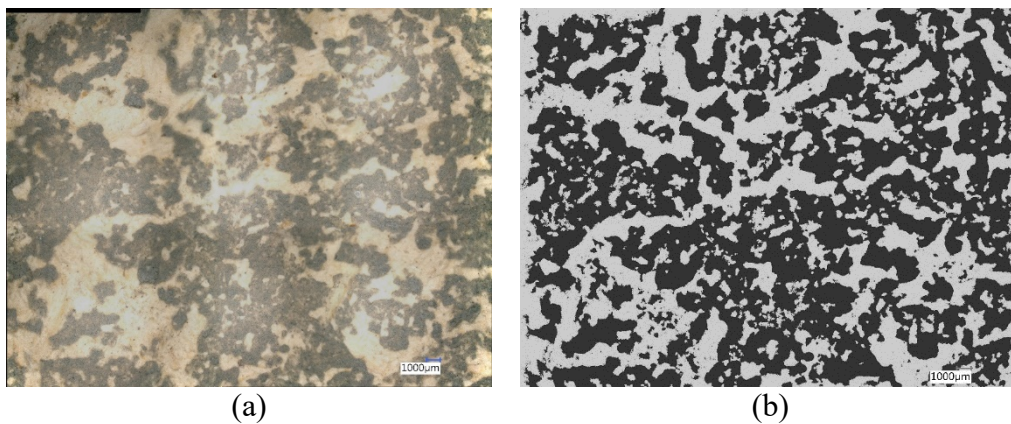


Abbildung 81: Quantifizierung der flächenmäßigen Betonanhaftungen mittels Bildanalysesoftware: (a) aufgenommenes Bild der Kontaktfläche, (b) binarisiertes Bild (hellgrau: Stützmaterial, schwarz: Beton).

Diese Quantifizierung wurde dreimal wiederholt. Zusammenfassend wurde ein flächenmäßiger Anteil der Betonanhaftungen zwischen 50 und 65 % festgestellt. Somit ist davon auszugehen, dass die Betonanhaftungen nach einer bisher unbestimmten Anzahl an Rezyklierungszyklen wahrscheinlich die Eigenschaften des Stützmaterials beeinflussen können.

7.3 Prüfung der Bauteileigenschaften und Charakterisierung der Mikrostruktur der gedruckten Betonbauteile, insbesondere in den Grenzbereichen zum entfernten Stützmaterial

In Relation zum sehr wahrscheinlichen Einfluss der Betonanhaftungen am Stützmaterial auf die Stützmate­rialeigenschaften in aufeinanderfolgenden Rezyklierungsstufen sollte experimentell analysiert werden, welchen Einfluss die Stützmaterialanhaftungen auf den unmittelbar an die Grenzschicht anschließenden Beton haben können. Hierzu wurde sowohl beton- als auch stützmaterialseitig mikrostrukturell-morphologische bzw. chemische Elementanalytik im Bereich dieser Grenzflächen nach der mechanischen Trennung ausgeführt (*Tabelle 37*).

Tabelle 37: Versuchsschema zur Analyse der Kontaktzone Stützmaterial/Beton.

Kurzbeschreibung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Manuelles Entfernen des Stützmaterials ▪ Rasterelektronenmikroskopie und EDX
Versuchszeitpunkt	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beton-Stützmaterial-Trennung nach einem Tag ▪ Verbundzonenbetrachtung an abgebundenem Material
Aufzunehmende Größen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ qualitativ

Der direkte Kontakt des Betons mit dem Stützmaterial bestimmt neben der Oberflächenstruktur auch gegebenenfalls erforderliche Nachbearbeitungsstrategien und er kann die Dauerhaftigkeit des Bauwerks beeinflussen. Nach der Stützmaterialentfernung wurden ausgewählte Kontaktzonen im Rasterelektronenmikroskop (REM) betrachtet (Quanta FEG 250, Thermo Fisher Scientific, vormals FEI, Eindhoven/NL) und mittels energiedispersiver Röntgenanalytik (EDX Quantax 400, Bruker, Billerica/MA/USA) qualitativ und quantitativ die chemischen Elemente an besonders interessierenden Formationen bzw. Stellen detektiert.

Die Mikrostrukturanalytik offenbarte in der Stützmaterialrezeptur M-25 verschiedene Calciumsulfatmorphologien von typisch nadeligen Kristallen über Plättchen bis zu kompakten Strängen. Der Großteil der Matrix trat jedoch in Gestalt dichter Filze aus kurzen Stäbchen auf (*Abbildung 82a*). Markant war zudem, dass die Oberfläche der offenbar intakten Stärkekörner nur geringfügig mit Gipskristallen besetzt war (*Abbildung 82b*, *Abbildung 82c*). Dies lässt die Vermutung zu, dass Maisstärke nicht zur sekundären heterogenen Keimbildung beiträgt und lediglich als Füllstoff im Gefüge vorliegt. Demgegenüber zeigten sich die Holzpartikel gut in die Matrix eingebunden (*Abbildung 82d*).

Das Eindringen von Sulfationen SO_4^{2-} aus dem Stützmaterial in den 3D-gedruckten Beton wurde mittels EDX bezüglich des Elements Schwefel analysiert, um ein mögliches Schädigungspotenzial abschätzen zu können. Hierzu wurde entlang einer Betonbruchfläche senkrecht zur Druckrichtung ein EDX-Intensitätsprofil des Schwefels von der Grenzfläche zum Stützmaterial hinunter bis 2 mm tief in den Beton aufgezeichnet (*Abbildung 83*).

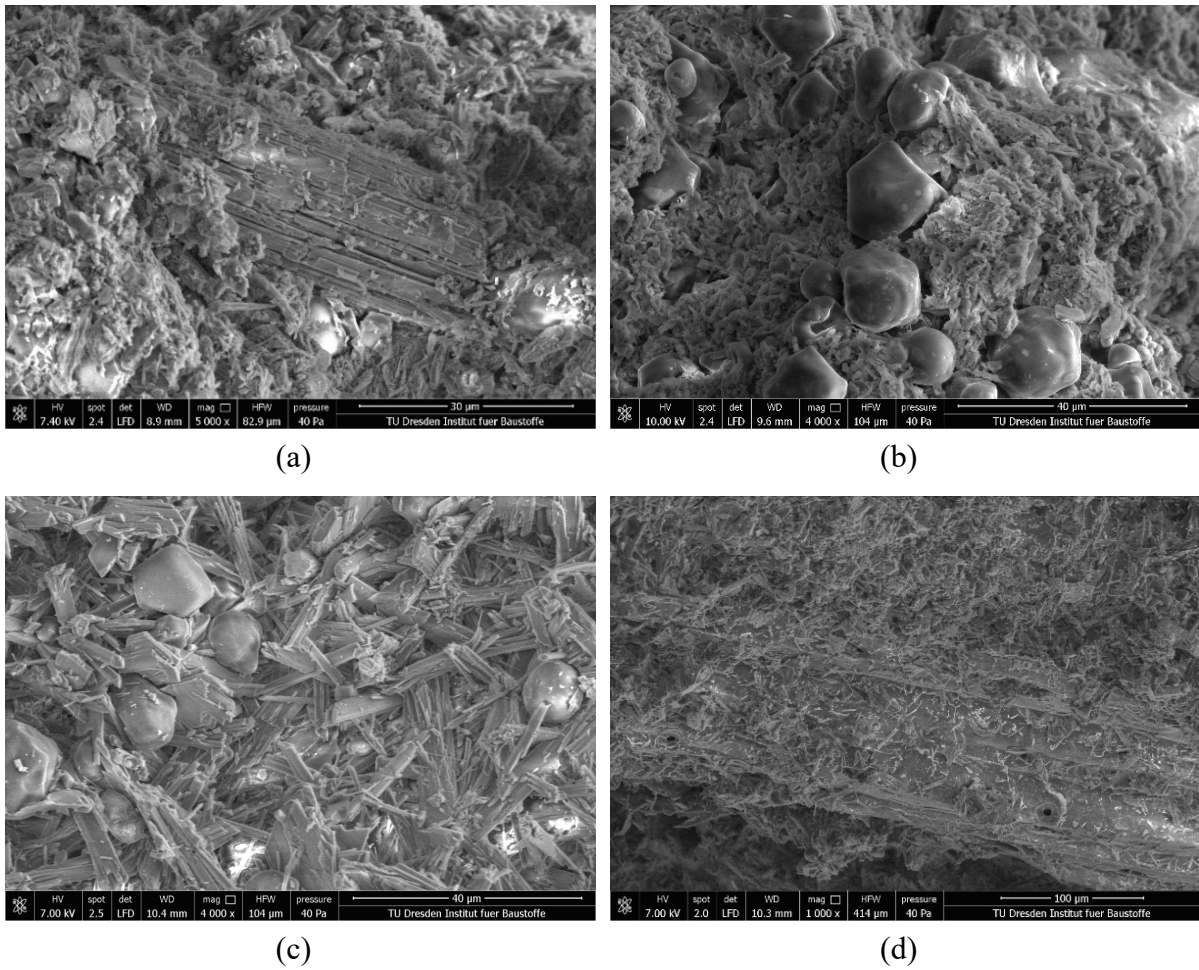


Abbildung 82: REM-Aufnahmen von Stützmaterial M-25: a) eingebundene Gipsstruktur, b) Stärkekörner in Gipsmatrix, c) in Gipsmatrix aus stäbchenförmigen Kristallen eingebettete Stärkekörner, d) von Gipskristallen überwachsener Fichtenholzpartikel.

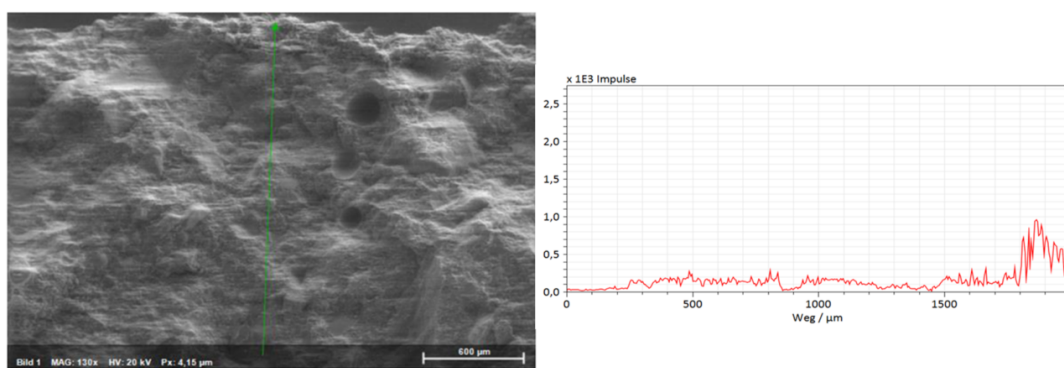


Abbildung 83: Links: REM-Bild einer Betonbruchfläche, Bildoberseite Kontaktzone mit dem Stützmaterial, Richtung unten in die 3D-gedruckte Schicht hinein; Rechts: EDX-Intensitätsprofil des Elements Schwefel entlang der grün markierten Linie im REM-Bild, Weg-Achse aus der Tiefe (0 µm) bis zur Grenzfläche zum Stützmaterial (2000 µm)

Die EDX-Analyse zeigt eine erhöhte Konzentration von Schwefel im Bereich von der Grenzfläche bis etwa 200 µm in die Tiefe des Betons, die aus dem Stützmaterial in den Beton

eingedrungene Sulfationen SO_4^{2-} repräsentiert. Sulfat aus dem Gips dringt demnach nur oberflächlich in den Beton ein. Obwohl die Konzentration in dieser dünnen Schicht gegenüber dem Bulk eindeutig erhöht ist, ist davon auszugehen, dass eine Schädigung des Betonbauteils infolge des Stützmaterialkontakts unwahrscheinlich ist. Einerseits ist die Konzentration nur mäßig erhöht. Andererseits wird perspektivisch-baupraktisch die Entfernung des Stützmaterials nach bereits 24 Stunden, d.h. demselben Zeitpunkt wie im vorliegenden Versuch, dazu führen, dass sich die eindringende Konzentration nicht weiter erhöhen kann.

Diese Ergebnisse legen die Empfehlung nahe, tatsächlich nach möglichst kurzer Zeit Beton und Stützmaterial voneinander zu trennen. Darüber hinaus sollten trockene Verfahren zur Beseitigung des Stützmaterials bevorzugt werden, um ein Wandern von löslichem Sulfat aus dem Stützmaterial in den Beton zu unterbinden. Um tatsächlich sicher zu gehen, sollte in weiteren Untersuchungen geprüft werden, ob und wie eine Migrationsbarriere für Wasser und darin gelöste Ionen (z.B. in Form einer eingebrachten Polyethylenfolie an der Materialgrenze) in den automatisierten Prozess integriert werden kann.

7.4 Herstellung einer Demonstratorstruktur

Für die Herstellung der Demonstratorstruktur wurde die Stützmaterialrezeptur M-25 und ein druckbarer Beton C-2 verwendet [54]. Die geplante Öffnung sollte 50 cm lang und 12,5 cm hoch sein. Der Betonextruder wurde mit einer rechteckigen Düse mit einer Öffnung von 15 mm x 49,5 mm und der verwendete Stützmaterialextruder mit einer rechteckigen Düse mit einer Öffnung von 15 mm x 50 mm ausgestattet. Unmittelbar im Anschluss an die Herstellung der Stützstruktur wurde ein wandartiger Betonprobekörper der gleichen Höhe extrudiert. Der wandartige Betonprobekörper wurde in der Mitte getrennt und die beiden Hälften jeweils links und rechts der Stützstruktur aufgestellt. Als Nächstes wurden auf der entstandenen, nun durchgehenden Oberseite weitere Betonschichten abgelegt (*Abbildung 84*).

Die einzelnen Bauabschnitte folgten unmittelbar aufeinander, sodass frisch-in-frisch gedruckt wurde. Jedoch erschwerten Probleme in der Abstimmung der vorhandenen Steuerungen der Fahrprofile der beiden Druckköpfe das abwechselnde Extrudieren von Beton und Stützmaterial. Nachfolgende Projekte zum Beton-3D-Druck sollten sich auch der Bereitstellung eines integrierten Steuerungssystems mit benutzerfreundlich programmierter Bedienungsfläche des Steuerungsprogramms widmen, das die Herstellung gestützter Betonbauteile erleichtert. Derart entwickelte Softwarelösungen für die Untersuchungen im Labormaßstab können eine Basis für die Steuerung des Dualen Extruders in der Baustellenanwendung bilden.

Abbildung 85 zeigt die fertiggestellte Demonstratorstruktur.

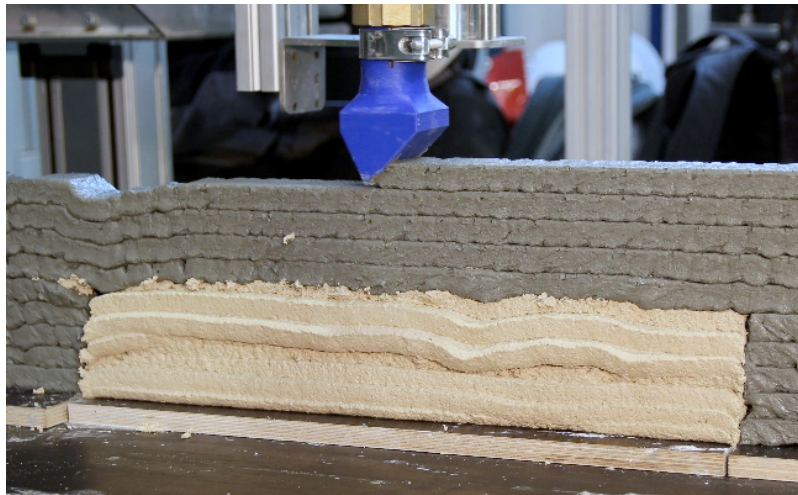


Abbildung 84: Herstellungsprozess eines Demonstrators des kontinuierlichen Betonbaus: Extrusion der fünften durchgehenden Betonschicht auf dem zusammengesetzten Fundament aus aus 3D-gedrucktem Beton (links und rechts) und Stützmaterial M-25 (in der Mitte, Drucklänge 50 cm, Zielhöhe 12,5 cm).



Abbildung 85: Fertige Demonstratorstruktur: Mittig unten Stützmaterial (Rezeptur M-25), links und rechts anschließend separat 3D-gedruckte Betonwandabschnitte, sowie kontinuierlich darüber gedruckter, durchgehender Beton.

Als experimenteller Höhe- und Abschlusspunkt des Forschungsprojekts wurde demonstriert, dass es bereits zum gegenwärtigen Zeitpunkt und Kenntnisstand prinzipiell möglich ist, die ursprünglich angepeilte Bauteilgeometrie zu realisieren: Auf frisch 3D-gedrucktem, leicht entfernbarem Stützmaterial, beidseitig eingerahmt durch ebenso frisch 3D-gedruckte, anschließende Betonwandteile konnten durchgehende Betonschichten kontinuierlich mittels fortgesetztem Beton-3D-Druck aufgesetzt werden.

Die Stützstruktur leistete ihre lastabtragende Funktion bis zur Erhärtung des Betons. Spalten im Anschluss- bzw. Eckbereich der obersten Beton-Stützmaterial-Beton-Lage haben die Stabilität der Gesamtstruktur nicht beeinflusst. Allerdings begünstigten diese Spalten ein Absenken der Betonschichten, deutlich zu erkennen in *Abbildung 85* im rechten Bereich. Neben dem bereits skizzierten Steuerungs-/Softwareanliegen soll daher die Weiterentwicklung der Anlagentechnik zur Vermeidung von Spalten in den Anschlussbereichen zwischen Stützmaterial und dem Beton beitragen.

Auf die hier demonstrierte Weise könnte tatsächlich eine Betonüberhangsstruktur nach der Entfernung des Stützmaterials erhalten werden. Jedoch traten ab etwa 24 Stunden nach

Erstellung des Demonstrators mit bereits bloßem Auge deutlich erkennbare Schwindrisse in den hochgelegenen Betonschichten auf (Details aus *Abbildung 85* siehe *Abbildung 86*).

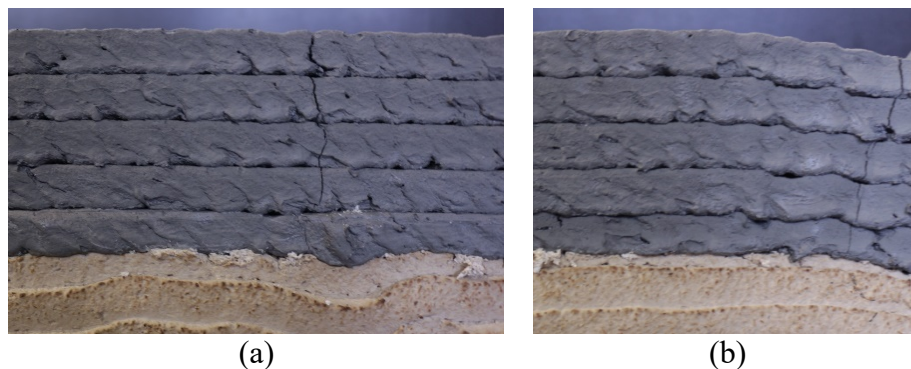


Abbildung 86: Schwindrissbildung a) im mittleren Bereich des Stützmaterials und b) im Eckbereich der Aussparung.

Der Grund für diese Risse ist das ausgeprägt starke plastische Schwinden des 3D-gedruckten Betons. Dies ist unabhängig vom Projektgegenstand der Stützmaterial-Thematik. Gedruckte Elemente haben im Vergleich zu konventionell mit Schalung hergestellten Betonelementen eine erheblich größere freie Oberfläche, die der Trocknung ausgesetzt ist. Dies begünstigt die Wasserverdunstung. In Kombination mit spezifischen Materialeigenschaften der druckbaren Betone, z.B. niedriger Wasserzementwert und hoher Leimgehalt, sorgt sie für einen intensiven und schnellen Aufbau eines Unterdrucks in den Kapillarporen [65]. Die Risse entstehen, sobald die entstandene innere Spannung die (Früh-)Festigkeit des Betons übersteigt und die Verformbarkeit der Betonstruktur behindert ist. Die Verformung des Betons wird durch die Rauheit der Grenzflächen Stützmaterial/Beton sowie durch die zwischen beiden Materialien wirkenden Adhäsionskräfte behindert. Das Schwindverhalten der seitlich aufgeführten Wandteile unterscheidet sich folglich von dem der Stützstruktur und auch von dem der oben aufliegenden Betonschichten. Es ist davon auszugehen, dass die Verformungsbehinderungen die Rissbildung begünstigt haben. Nachfolgende Studien bezüglich des plastischen Schwindens von 3D-gedrucktem Beton sollen sich demnach nicht nur mit dem Beton an sich befassen, sondern auch die Kombination mit Stützmaterialien berücksichtigen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Resultate dieses Forschungsprojektes stellen einen wesentlichen Erkenntnisgewinn dar. Wie dargelegt, sind jedoch weitere Entwicklungsschritte bis zur baupraktischen Einsetzbarkeit erforderlich. Die Ergebnisse weisen nach, dass holzbasierte, calciumsulfatgebundene Stützmaterialien für den Beton-3D-Druck geeignet sind. Der zeitliche Horizont bis zur erstmaligen Anwendung wird dabei von der Entwicklungsgeschwindigkeit des Beton-3D-Drucks mitbestimmt.

Im Projekt wurde unter anderem das Verhalten des Stützmaterials in Abhängigkeit von der Fördertechnologie untersucht. Der Werkstoff zeigte sich robust gegen Scherbeanspruchungen.

Es konnte die grundsätzliche Eignung von Exzentrerschnecken- und Kolbenpumpen mit Einschränkungen auch von Schneckenförderern gezeigt werden.

Rheologische Experimente bestätigen die Beobachtung von pseudoplastischem und thixotropem Verhalten des Stützmaterials.

Im Rahmen orientierender Versuche wurde auch die grundsätzliche Rezyklierbarkeit des Stützmaterials bewiesen. Weiterhin sind alle untersuchten Rezepturen als umweltverträglich einzuschätzen. Neben der Vergleichsmöglichkeit wurde auf diese Weise ein umfangreiches Eigenschaftsprofil aufgezeichnet. Um den Einfluss der einzelnen Materialkomponenten auf die Aufbereitung und erneute Nutzung sowie die Eigenschaften des wiederverwendeten Materials zu ergründen, sind weitere Versuche erforderlich. Dazu wäre die Identifikation der Calciumsulfatphasen im Rezyklat mittels Rasterelektronenmikroskopie gegebenenfalls ergänzt um Pulverdiffraktometrie oder energiedispersiver Röntgenanalytik denkbar.

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes sprechen für den Ausschluss oder die Substitution der Rezepturbestandteile Lignosulfonat, Maisstärke und Guarkernmehl. Weiterführend wäre zu ermitteln, wie das Stützmaterial auf einen jeweiligen Ausschluss reagiert. Im Fall des Verflüssigers sollte ein Test auf den Thresholdeffekt einbezogen werden.

Es wird weiterhin empfohlen, die Integration von Trennlagen zwischen Stützmaterial und Beton in den automatisierten Druckprozess in Betracht zu ziehen.

Offen bleibt, inwiefern sich das in diesem Projekt entwickelte Stützmaterial in der Konkurrenzsituation mit anderen Stützkonzepten behaupten kann. In dem von ConPrint3D® adressierten Wohnungsbau sprechen Vorteile wie unproblematische Bewehrungsintegration, geringe Prozessverzögerungen und Entfall des Stützstrukturrückbaus für Fertigteilstürze. Die Stärken des extrudierbaren Stützmaterials liegen gerade bei Abweichungen von orthogonalen Regelgeometrien wie geneigte oder mehraxial gekrümmte Bauteile.

9 Literaturverzeichnis

- [1] *Duballet, R.; Baverel, O.; Dirrenberger, J.:* Classification of building systems for concrete 3D printing. *In: Automation in Construction* 83 (2017), S. 247-258.
- [2] *Ngo, T.D.; Kashani, A.; Imbalzano, G. et al.:* Additive manufacturing (3D printing) – A review of materials, methods, applications and challenges. *In: Composites Part B: Engineering* 143 (2018), S. 172-196.
- [3] Rudenko 3D Printer, 2020, <https://www.youtube.com/watch?v=O2vkBmsRn2I> [Zugriff am: 29.03.2020].
- [4] ICON: Frequently Asked Questions | ICON, 2020, <https://www.iconbuild.com/about/faq> [Zugriff am: 29.03.2020].
- [5] *Kaufhold, J.; Kohl, J.; Nerella, V.N. et al.:* Wood-based support material for extrusion-based digital construction. *In: Rapid Prototyping Journal* 4 (2019), Heft 12, S. 690-698.
- [6] *Vanek, J.; Galicia, J.A.G.; Benes, B.:* Clever Support: Efficient Support Structure Generation for Digital Fabrication. *In: Computer Graphics Forum* 33 (2014), Heft 5, S. 117-125.

-
- [7] REVOSax: Sächsische Bauordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 11. Mai 2016.
- [8] *Markin, V.; Nerella, V.N.; Schröfl, C. et al.*: Material Design and Performance Evaluation of Foam Concrete for Digital Fabrication. *In: Materials* 12 (2019), Heft 15, S. 2433.
- [9] *Mechtcherine, V.; Markin, V.; Will, F. et al.*: CONPrint3D® Ultralight – Herstellung monolithischer, tragender, wärmedämmender Wandkonstruktionen durch additive Fertigung mit Schaumbeton. *In: Bauingenieur* (2019), S. 405-415.
- [10] MC-Bauchemie: Produktdatenblatt: MC-DUR CFK-System.
- [11] *Ogura, H.; Nerella, V.N.; Mechtcherine, V.*: Developing and Testing of Strain-Hardening Cement-Based Composites (SHCC) in the Context of 3D-Printing. *In: Materials* (Basel, Switzerland), Vol. 11 (2018), Iss. 8.
- [12] *Soltan, D.G.; Li, V.C.*: A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing. *In: Cement and Concrete Composites* 90 (2018), S. 1-13.
- [13] *Weng, Y.; Qian, S.; Li, M. et al.*: 3D printable high performance fiber reinforced cementitious composites for large-scale printing. *In: 3rd International Conference on Progress in Additive Manufacturing* (2018).
- [14] Baunit BauMinator – Zukunft in Beton, 2020, <https://baunit.at/bauminator> [Zugriff am: 30.03.2020].
- [15] Sticknoticias: Schneider Electric participa en la construcción de la primera casa impresa en 3D de España, 2018, <https://sticknoticias.com/schneider-electric-participa-en-la-construccion-de-la-primera-casa-impresa-en-3d-de-espana/> [Zugriff am: 29.03.2020].
- [16] *Tay, Y.W.D.; Li, M.Y.; Tan, M.J.*: Effect of printing parameters in 3D concrete printing: Printing region and support structures. *In: Journal of Materials Processing Technology* 271 (2019), S. 261-270.
- [17] Xtree: XtreeE - 3D Printed Wall with integrated window frame, 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=0byQtXW5Gm8> [Zugriff am: 30.03.2020].
- [18] *Roussel, N.*: Rheological requirements for printable concretes. *In: Cement and Concrete Research* 112 (2018), S. 76-85.
- [19] *Reiter, L.; Wangler, T.; Roussel, N. et al.*: The role of early age structural build-up in digital fabrication with concrete. *In: Cement and Concrete Research* 112 (2018), S. 86-95.
- [20] *Adam, M.*: Vorlesungsskript: "Versuchsplanung und Auswertung". Masterstudiengang „Simulations- und Experimentaltechnik“, https://zies.hs-duesseldorf.de/Lehre/Lehrveranstaltungen/Versuchsplanung%20und%20Auswertung/Documents/0_DoE_Vorlesung_Skript_aktuell.pdf [Zugriff am: 18.05.2021].
- [21] *Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T.*: Statistische Versuchsplanung – Design of Experiments (DoE), VDI-Buch Ser, Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2017.
- [22] Design of Experiments, 2018, <http://www.reiter1.com/Glossar/DoE.htm> [Zugriff am: 18.05.2021].
-

-
- [23] StatSoft Europe GmbH: StatSoft Europe GmbH: Startseite, 2021, <https://www.statsoft.de/de/home> [Zugriff am: 15.05.2021].
- [24] *Belitz, H.-D.; Grosch, W.; Schieberle, P.*: Lehrbuch der Lebensmittelchemie – Mit 634 Tabellen, Springer-Lehrbuch, Springer, Berlin, 2008.
- [25] *Blankenstein, P.*: Großer Beleg gemäß Diplomstudienordnung Bauingenieurwesen: "Untersuchung des Einflusses von Prozessrouten und Materialzusammensetzungen auf Verarbeitungs- und Bauteileigenschaften von Holzpartikelverbunden als Stützmaterial für Beton-3D-Druck-Verfahren". Dresden, Technische Universität Dresden, Belegarbeit, 2017.
- [26] *Matissek, R.*: Lebensmittelchemie. Springer Berlin Heidelberg; Springer Spektrum, Berlin, 2019.
- [27] *Sharma, P.; Kaur, A.; Aggarwal, P.*: Physicochemical, thermal, rheological, and morphological properties of flour from different guar seed (*Cyamopsis tetragonoloba*) cultivars. *In: International Journal of Food Properties* 20 (2017), Heft 6, S. 1280-1289.
- [28] *Feldheim, W.*: Guar I. Lebensmittelrechtliche Situation, botanische und chemisch physikalische Charakteristik und Verwendung von Guarmehl in der Lebensmittelindustrie. *In: Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und -Forschung* 153 (1973), Heft 4, S. 234-239.
- [29] Bundesverband der Gipsindustrie e. V: GIPS-Datenbuch. Berlin. Bundesverband der Gipsindustrie e. V, https://www.gips.de/fileadmin/user_upload/gipsdatenbuch_2013.pdf [Zugriff am: 18.05.2021].
- [30] Bundesverband der Gipsindustrie e. V: Das System CaSO₄ & H₂O, 2021, <https://www.gips.de/wissen/rohstoffe/das-system-caso4-h2o/> [Zugriff am: 18.05.2021].
- [31] MUEG Mitteldeutsche Umwelt- und Entsorgung GmbH: Gipsrecycling, 2021, <https://www.youtube.com/watch?v=u7XOVLpFOHo> [Zugriff am: 18.05.2021].
- [32] *Sigloch, H.*: Technische Fluidmechanik. Springer, Berlin, 2012.
- [33] *Szczukowski, C.*: Experimentelle Untersuchung eines Reaktors zur thermochemischen Energiespeicherung für den Hochtemperaturbereich. Köln, Universität Stuttgart, Diplomarbeit, 2012.
- [34] JRS - J. Rettenmaier & Söhne GmbH + Co KG: Arbocel C100 – Typenbeschreibung, 2013, https://www.jrs.de/jrs_de/ [Zugriff am: 18.05.2021].
- [35] Rettenmaier & Söhne GmbH + Co KG: Lignocel® Type 9 – Typenbeschreibung, 2021, https://www.jrs.de/jrs_de/holzfaser/lignocel.php?highlight=Lignocel [Zugriff am: 18.05.2021].
- [36] *Benedix, R.*: Bauchemie – Einführung in die Chemie für Bauingenieure und Architekten. Springer Fachmedien Wiesbaden; Springer Vieweg, Wiesbaden, 2020.
- [37] *Schneider, J.*: Beitrag zur Wirkungsweise von Verzögerern beim Abbinden von Stuckgipsen. Freiberg: Technische Universität Bergakademie Freiberg, Dissertation. Betreuung: Voigt, W., et al. (2010).
-

- [38] *Plank, J.*: Applications of biopolymers and other biotechnological products in building materials. *In: Applied microbiology and biotechnology*, Vol. 66 (2004), Iss. 1, pp. 1-9.
- [39] RENCOM: Refines forest lignin to bioplastic, 2021, <https://www.lignin.se/> [Zugriff am: 18.05.2021].
- [40] *Chen, Q.; Indraratna, B.*: Shear behaviour of sandy silt treated with lignosulfonate. *In: Canadian Geotechnical Journal* 52 (2015), Heft 8, S. 1180-1185.
- [41] *Alrawashdeh, A.I.; Al-Rawajfeh, A.E.; Al-Bedoor, A.e.a.A.*: Production of plaster from gypsum deposits in south Jordan – Improvement of the setting time. *In: Journal of Chemical Technology & Metallurgy* 49 (2014), S. 293-302.
- [42] *Kirste, B.*: Stereochemie der Weinsäure, 2021, <https://www.chemie.de/lexikon/Weins%C3%A4ure.html> [Zugriff am: 18.05.2021].
- [43] *Baab, K.* Weinsäure (E 334): Anwendung und Besonderheiten des Zusatzstoffes [online]. *In: Utopia*, 2020 [Zugriff am: 18.05.2021], <https://utopia.de/ratgeber/weinsaure-e-334-anwendung-und-besonderheiten-des-zusatzstoffes/>.
- [44] *Gordon, S. M., Avery, R. K.*: Aspergillosis in lung transplantation: incidence, risk factors, and prophylactic strategies. *In: Transplant Infectious Disease* 3 (2001), S. 161-167.
- [45] *Lootens, D.; Jousset, P.; Martinie, L. et al.*: Yield stress during setting of cement pastes from penetration tests. *In: Cement and Concrete Research* 39 (2009), Heft 5, S. 401-408.
- [46] *Mechtcherine, V.; Nerella, V.N.*: 3-D-Druck mit Beton: Sachstand, Entwicklungstendenzen, Herausforderungen. *In: Bautechnik* 95 (2018), Heft 4, S. 275-287.
- [47] *Hoffmann, K.*: Fördertechnik – Maschinensätze, Fördermittel, Tragkonstruktionen, Logistik. Oldenbourg Verlag, Wien.
- [48] *Patolla, A.*: Pumpen- & Mischtechnik - Rührwerke, Fasspumpen und Pumpen aller Art, Mischtechnik - A. Patolla, 2020, <https://www.pumpen-mischen.de/index.html?fasspumpen/exzentrerschneckenpumpen-prinzip.html> [Zugriff am: 03.04.2020].
- [49] *Surek, D.*: Pumpen für Abwasser- und Kläranlagen: Auslegung und Praxisbeispiele. Springer Fachmedien Wiesbaden, s.l., 2014.
- [50] NETZSCH Pumpen & Systeme GmbH: NEMO® Exzentrerschneckenpumpen – Anspruchsvolle und kompromisslose Lösungen in allen Industrien, <https://pumps-systems.netzsch.com/de/produkte-und-zubehoer/nemo-exzentrerschneckenpumpen> [Zugriff am: 18.05.2021].
- [51] *Moscicki, L.*: Extrusion-Cooking Techniques – Applications, theory and sustainability. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2011.
- [52] Progressive Cavity Pumps and Typical Start-up Procedure - EnggCyclopedia, 2011, <https://www.enggcyclopedia.com/2011/10/startup-procedure-progressive-cavity-pump/> [Zugriff am: 04.04.2020].

-
- [53] *Rusell, B.; Willson, D.; Blackburn, S.*: On-line Monitoring of Pastes Undergoing Extrusion. *In: 4th World Congress on Particle Technology, (2002).*
- [54] *Nerella, V.N.; Hempel, S.; Mechtcherine, V.*: Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing. *In: Construction and Building Materials 205 (2019), S. 586-601.*
- [55] *Mechtcherine, V.; Nerella, V.N.; Will, F. et al.*: Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing. *In: Automation in Construction 107 (2019), S. 102933.*
- [56] *Ivaniuk, E.*: Project report submitted in partial fulfilment of the requirement for the award of the M. Sc. degree: Investigations on very early strength of 3D-printable cementitious materials (2019).
- [57] VDI/VDE 2602 Blatt 2: Oberflächenprüfung – Rauheitsmessung mit Tastschnittgeräten (Tastschnittverfahren) Aufbau, Messbedingungen, Durchführung. Ausgabe Dezember 2020.
- [58] *Schach, R.; Krause, M.; Näther, M. et al.*: CONPrint3D: Beton-3D-Druck als Ersatz für den Mauerwerksbau. *In: Bauingenieur 92 (2017), Heft 9, S. 355-363.*
- [59] DIN 18330:2016-09, VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen- Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen(ATV)- Mauerarbeiten.
- [60] *Krause, M.*: Baubetriebliche Optimierung des vollwandigen Beton-3D-Drucks. Dresden, Technische Universität Dresden, Dissertation, 2020.
- [61] DIN 276:2018-12, Kosten im Bauwesen.
- [62] Statistisches Bundesamt: Preisindizes für die Bauwirtschaft - Fachserie 17 Reihe 4 - November 2019.
- [63] Baupreisindex 2020: Aktueller Baupreisindex & Daten aus vorherigen Jahren | BKI, 2021, <https://bki.de/baupreisindex.html> [Zugriff am: 06.08.2021].
- [64] TBO Transportbeton Ottendorf-Okrilla GmbH & Co. KG: Herstellung und Lieferung von Transportbeton, 2021, <https://www.kieswerkbeton.de/> [Zugriff am: 06.08.2021].
- [65] *Slowik, V.; Schmidt, M.; Fritzschn, R.*: Capillary pressure in fresh cement-based materials and identification of the air entry value. *In: Cement and Concrete Composites 30 (2008), Heft 7, S. 557-565.*

10 Abbildungsverzeichnis

<u>Abbildung 1: Beispiele aus der Praxis für die Herstellung der Überhangsstrukturen: (a) 3D-gedrucktes Hotel, Totalcustom, USA [3]; (b) 3D-Betondruck eines Wohnhauses bei Icon, Mexiko [4].</u>	9
<u>Abbildung 2: Grundprinzip der Holz-Stärke-Komposite als 3D-gedrucktes Stützmaterial für die Überhangsstrukturen [5].</u>	10
<u>Abbildung 3: Darstellung anspruchsvoller Stellen für den Einsatz des Stützmaterials.</u>	10
<u>Abbildung 4: Einfluss der Druckstrategie auf die Material- und Zeitersparnis beim 3D-Druck von Kunststoffen [6].</u>	11
<u>Abbildung 5: Drei unterschiedliche Szenarien für die Anwendungen des Stützmaterials: (a) Türdurchbruch mit lastenden Betonfilamenten in Höhe von 90 cm, (b) Türdurchbruch mit lastenden Betonfilamenten in Höhe von 40 cm, (c) Fenster mit mit lastenden Betonfilamenten in Höhe von 50 cm.</u>	13
<u>Abbildung 6: Visualisierung der aufkommenden Lasten auf das Stützmaterial einschließlich der mit der Zeit zunehmenden Scherfestigkeit des Betons: (a) Lastverteilung der auf dem Stützmaterial liegenden Betonschichten sowie die Ursachen für die Selbsttragfähigkeit der Betonschichten, (b) Öffnung mit Verstärkungslamelle.</u>	14
<u>Abbildung 7: Konzept für die Beschreibung der Anforderung an die Druckfestigkeit des Stützmaterials: in gelb sind die Trendlinien für den Stützmaterial und in rot für den Beton angezeichnet.</u>	15
<u>Abbildung 8: 3D-gedruckte Betonburg bei A. Rudenko: (a) Kleinteilige auskragende Elemente der Fassade, (b) Erreichter Neigungswinkel der Wand durch eine versetzte Ablage der Filamente.</u>	16
<u>Abbildung 9: Bauelemente mit schräg abgelegten Filamenten, Baunit, Österreich [14].</u>	16
<u>Abbildung 10: Fehlstellen im Türöffnungsbereich. 3D-Betondruck eines Wohnhauses bei Schneider Electric, Spanien [15].</u>	17
<u>Abbildung 11: Geschwindigkeits- und Austragsprofil für die Bewegung des Druckkopfs und Steuerung der Förderrate des Stützmaterials; V entspricht der Fahrgeschwindigkeit des Druckkopfs, Q der Förderrate des Stützmaterials.</u>	18
<u>Abbildung 12: 3D-Druck einer Überhangsstruktur mit Beton als Stützstruktur: (a) Variation der Druckgeschwindigkeit bei einer festgelegten Fördermenge, (b) 3D-gedrucktes Objekt, (c) 3D-gedrucktes Objekt nach der Nachbehandlung [16].</u>	19
<u>Abbildung 13: Mögliche Druckstrategien von Stützmaterial und Beton (SM: Stützmaterial).</u>	19
<u>Abbildung 14: Automatisierter Einbau von Fensterrahmen bei Xtree, Frankreich [17].</u>	20
<u>Abbildung 15: Prozesskette beim 3D-Druck des Stützmaterials.</u>	21
<u>Abbildung 16: Prozesskette der Stützmaterialherstellung mit Stärkeverkleisterung. Als „Zusatz“ wird in dieser Studie ein Hydrokolloid zugegeben.</u>	25
<u>Abbildung 17: Korngrößenverteilung der verwendeten Holzpartikel.</u>	27
<u>Abbildung 18: Konventionelle Methoden zweifaktorieller Versuchspläne nach [20].</u>	28
<u>Abbildung 19: Schaubild zum Gipskreislauf [30].</u>	32
<u>Abbildung 20: Lichtmikroskopische Aufnahmen: (a) Fichtenholzmehl, (b) Fichtenholzspäne.</u>	33
<u>Abbildung 21: Anpassung der Düsengeometrie für die Extrusion des Stützmaterials.</u>	36
<u>Abbildung 22: Diskontinuitäten im Querschnitt des 3D-gedruckten Stützmaterialfilaments.</u>	36
<u>Abbildung 23: Steuerungstechnische Herausforderungen beim 3D-Druck von Stützmaterial: (a) Verwölbung der Schichten, (b) Anhäufung der Fehler.</u>	37

<u>Abbildung 24: Materialbedingte Herausforderungen beim 3D-Druck der Holz-Stärke-basierten Stützmaterialien: Fortbewegung des Filaments entgegen der Bewegungsrichtung des Druckkopfs.</u>	37
<u>Abbildung 25: Schwindmaß von drei Probekörpern der Rezeptur M-16.</u>	39
<u>Abbildung 26: Qualität der Schwindmaßregression anhand der Gegenüberstellung von berechnetem und gemessenem Schwindverhalten binnen sieben Tagen.</u>	39
<u>Abbildung 27: Pilzbildung im 3D-gedruckten wandartigen Probekörper des Stützmaterials M-3: Links Foto des aufgeschnittenen Probekörpers, rechts Aufnahmen von Pilzsporen im markierten Bereich mittels Rasterelektronenmikroskop.</u>	41
<u>Abbildung 28: Schimmelbefall bei Rezeptur M-15.</u>	43
<u>Abbildung 29: Freibewitterungsversuch für die Stützmaterialrezepturen M-4-Ref und M-25.</u>	43
<u>Abbildung 30: Beispielhafte Schimmelpilzbildungen bei Stützmaterialprobekörpern, die der freien Bewitterung ausgesetzt waren.</u>	44
<u>Abbildung 31: Ausgespülte Gipsmatrix einer horizontalen Oberfläche infolge Niederschlagseinwirkung.</u>	44
<u>Abbildung 32: Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines Druckversuchs an der Rezeptur M-20.</u>	45
<u>Abbildung 33: Bruchbild eines Druckversagens.</u>	45
<u>Abbildung 34: Qualität der Druckfestigkeitsregression anhand der Gegenüberstellung berechneter und gemessener Daten.</u>	46
<u>Abbildung 35: Gemessene, geglättete sowie gemittelte Verläufe der zeitlichen Festigkeitsentwicklung der Rezeptur M-25.</u>	47
<u>Abbildung 36: Zeitlicher Verlauf der Druckfestigkeiten der Rezepturen M-25 und M-4-Ref.</u>	48
<u>Abbildung 37: Gegenüberstellung von Druckfestigkeits- und Scherfestigkeitsverläufen der Rezepturen M-25 und M-4-Ref.</u>	49
<u>Abbildung 38: : Übersicht über die Methoden zur Förderung von Stützmaterial: (a) Schneckenpumpe [51],(b) Exzentrerschneckenpumpe [52], (c) Kolbenextruder [53].</u>	51
<u>Abbildung 39: Versuchsvorrichtung für die Bestimmung der Extrudierbarkeit des Stützmaterials mittels Kolbenextruder.</u>	52
<u>Abbildung 40: Mit dem Kolbenextruder hergestellte Stützstruktur aus dem Holz-Stärke-Komposit der Rezeptur M-1: (a) Extrusionsvorgang des Materials, (b) Probekörper aus dem Strängen.</u>	52
<u>Abbildung 41: Experimentelle Ergebnisse während der Extrusion unterschiedlicher Stützmaterialien.</u>	53
<u>Abbildung 42: Versuchsaufbau für die Bewertung der Extrudierbarkeit des Stützmaterials: (a) Extruder ausgestattet mit einer Schneckenpumpe, (b) Extruder ausgestattet mit Exzentrerschneckenpumpe.</u>	54
<u>Abbildung 43: Konstruktionsskizze der Fördereinheit für die Extrusion des Stützmaterials.</u>	54
<u>Abbildung 44: Erschwerte Zufuhr durch Anhaftung des Stützmaterials an den Zufuhrschaufeln des Extruders. Die weißen Pfeile stellen die Drehrichtung der Extruderschnecke bzw. der Zufuhreinheit dar sowie die durch die Anhaftung verursachte Rotation des Stützmaterials.</u>	55
<u>Abbildung 45: Granulierung des Stützmaterials für die Gewährleistung einer ungehinderten Materialzufuhr: (a) Verwendete Siebe für die manuelle Granulierung des Stützmaterials, (b) granuliertes Stützmaterial.</u>	55
<u>Abbildung 46: Untersuchungen zur Zufuhr des Stützmaterials: (a) Ungestörte Zufuhr mit Eigengewicht des Stützmaterial; (b) Manueller Nachschub des Stützmaterials.</u>	56

<u>Abbildung 47: Zwei Arten der Fördereinheit: (a) Extruder mit einer indirekten Materialzufuhr auf die Extruderschnecke, (b) Extruder mit direkter Materialzufuhr auf die Extruderschnecke.</u>	57
<u>Abbildung 48: Versuchsstand für kontinuierliches 3D-Drucken von Beton und Stützmaterialextrusion.</u>	57
<u>Abbildung 49: Ablauf des kontinuierlichen 3D-Drucks von Beton mit dem Einsatz des Stützmaterials.</u>	58
<u>Abbildung 50: Konzeptionelle Darstellung der Methoden zur Erhöhung der Festigkeitsparameter des Stützmaterials.</u>	59
<u>Abbildung 51: Prüfvorrichtung für die Untersuchung zur Beschleunigung der Stützmaterialtrocknung: (a) Induzierte Heißluftströmung mittels Heißluftpistole, (b) In-line Erwärmung des Stützmaterials durch Erhitzen des Extrudersgehäuses, (c) Erhitzen des Stützmaterials durch einen Infrarotstrahler.</u>	60
<u>Abbildung 52: Zeitabhängiger Gewichtsverlust beim Einsatz des Heißluftföns und des Infrarotstrahlers.</u>	60
<u>Abbildung 53: Konzepteschema zur Beschleunigung der Aushärtung des Stützmaterials unter Baustellenbedingungen.</u>	61
<u>Abbildung 54: Ablauf des Experiments zur Simulation der Trocknung des Stützmaterials auf der Baustelle.</u>	62
<u>Abbildung 55: Probekörper des Stützmaterials: links vor der Prüfung, rechts nach der Prüfung.</u>	62
<u>Abbildung 56: Ablaufplan für Vorbereitung und Verarbeitung der Verformungsbilder [56].</u>	63
<u>Abbildung 57: Spannungs-Dehnungs-Diagramme aus dem einaxialen Druckversuch der Rezeptur M-3: (a) 60 min nach dem Zeitpunkt der Wasserzugabe gelagert im normalen Raumklima; (b) 60 min nach dem Zeitpunkt der Wasserzugabe, wobei der Probekörper während der letzten 20 min im Windkanal behandelt wurde; (c) 180 min nach dem Zeitpunkt der Wasserzugabe gelagert im normalen Raumklima; (d) 180 min nach dem Zeitpunkt der Wasserzugabe, wobei der Probekörper innerhalb der letzten 120 min im Windkanal behandelt wurde.</u>	63
<u>Abbildung 58: Vergleich der Druckfestigkeit von gedrucktem und manuell hergestelltem Stützmaterial M-3, 24 Stunden nach Wasserzugabe; nicht belüftete Probekörper, gelagert unter 60 % relativer Luftfeuchte bei 20 °C.</u>	65
<u>Abbildung 59: Druckfestigkeit des manuell hergestellten Probekörpers aus Stützmaterial M-3 nach 24 Stunden Belüftung im Windkanal mit einer Windgeschwindigkeit von 5 m/s.</u>	65
<u>Abbildung 60: Probekörper zur Untersuchung der Entfernbareit des Stützmaterials.</u>	66
<u>Abbildung 61: Mechanische Entfernung des Stützmaterials.</u>	66
<u>Abbildung 62: Anhaftungen des Stützmaterials im Bereich der Kontaktzone Beton-Stützmaterial: (a) Reste des Stützmaterials an der Betonoberfläche, (b) Betonoberfläche nach mechanischem Abbrechen (links) und durch Bürsten gereinigte Betonoberfläche (rechts).</u>	68
<u>Abbildung 63: Lichtmikroskopische Aufnahmen der Oberflächen der Stützmaterialrezepturen (a) M-25 und (b) M-4-Ref.</u>	69
<u>Abbildung 64: Rauheitsprofil der Oberfläche von Stützmaterial M-25. Schwarz: Primärprofil; Blau: Rauheitsprofil; Grün: Welligkeitsprofil.</u>	69
<u>Abbildung 65: Recycling des Stützmaterials: (a) Holz-Stärke-Gemisch M-3 nach der Trocknung, (b) Trocknungsprozess des Holz-Gips-Gemisches M-4-Ref, (c) Mühle zur Aufbereitung des Granulats.</u>	71
<u>Abbildung 66: Konsistenz der Stützmaterialrezeptur M-4-Ref (a) vor dem ersten Rezyklierungszyklus, (b) nach dem ersten Rezyklierungszyklus.</u>	72
<u>Abbildung 67: Gemessene Extrusionswiderstände der Rezepturen M-25 und M-04-Ref nach dreifachem Recycling.</u>	73

<u>Abbildung 68: Mittels Penetrationsversuch gemessene Scherfestigkeit; RC-steht für Rezyklierungszyklus.....</u>	73
<u>Abbildung 69: Grundrissmodell für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zum Einsatz des Stützmaterials für die Herstellung der Überhangsstrukturen in Anlehnung an [58].</u>	74
<u>Abbildung 70: Aufteilung der Druckabschnitte; Südansicht des Gebäudemodells.</u>	75
<u>Abbildung 71: Arten der sogenannten Störstellen bei 3D-Druck mit Beton oder Stützmaterial.</u>	76
<u>Abbildung 72: Zeitlicher Verlauf des Drucks des Gebäudemodells.</u>	79
<u>Abbildung 73: Vergleich der Kosten für den Stütz Materialeinsatz mit und ohne Wiederaufbereitung.</u>	89
<u>Abbildung 74: Vergleich der Kostenarten unterschiedlicher Verfahrenstechniken für das CONPrint3D®-Verfahren (SM: Stützmaterial).</u>	90
<u>Abbildung 75: 3D-gedruckte wandartige Stützstrukturen unter Verwendung ausgewählter Rezepturen.</u>	91
<u>Abbildung 76: Wandartige Stützstruktur hergestellt mit dem Stützmaterial M-4-Ref aus verschiedenen Perspektiven.</u>	92
<u>Abbildung 77: Ablage eines Betonfilaments auf die Stützstruktur, Rezeptur M-3.</u>	92
<u>Abbildung 78: Stützstruktur (Rezeptur M-3) mit darauf abgelegten, 3D-gedruckten Betonschichten: (a) Seitenansicht, (b) Frontansicht.</u>	93
<u>Abbildung 79: Kontaktbereich des Stützmaterials mit darauf 3D-gedrucktem Beton (Schnitt durch den erhärteten Festkörper).</u>	93
<u>Abbildung 80: Grenzfläche des Stützmaterials nach dem Entfernen des Betons nach 24 Stunden Lagerung.</u>	94
<u>Abbildung 81: Quantifizierung der flächenmäßigen Betonanhaftungen mittels Bildanalysesoftware: (a) aufgenommenes Bild der Kontaktfläche, (b) binarisiertes Bild (hellgrau: Stützmaterial, schwarz: Beton).</u>	94
<u>Abbildung 82: REM-Aufnahmen von Stützmaterial M-25: a) eingebundene Gipsstruktur, b) Stärkekörner in Gipsmatrix, c) in Gipsmatrix aus stäbchenförmigen Kristallen eingebettete Stärkekörner, d) von Gipskristallen überwachsener Fichtenholzpartikel.</u>	96
<u>Abbildung 83: Links: REM-Bild einer Betonbruchfläche, Bildoberseite Kontaktzone mit dem Stützmaterial, Richtung unten in die 3D-gedruckte Schicht hinein; Rechts: EDX-Intensitätsprofil des Elements Schwefel entlang der grün markierten Linie im REM-Bild, Weg-Achse aus der Tiefe (0 μm) bis zur Grenzfläche zum Stützmaterial (2000 μm)</u>	96
<u>Abbildung 84: Herstellungsprozess eines Demonstrators des kontinuierlichen Betonbaus: Extrusion der fünften durchgehenden Betonschicht auf dem zusammengesetzten Fundament aus aus 3D-gedrucktem Beton (links und rechts) und Stützmaterial M-25 (in der Mitte, Drucklänge 50 cm, Zielhöhe 12,5 cm).</u>	98
<u>Abbildung 85: Fertige Demonstratorstruktur: Mittig unten Stützmaterial (Rezeptur M-25), links und rechts anschließend separat 3D-gedruckte Betonwandabschnitte, sowie kontinuierlich darüber gedruckter, durchgehender Beton.</u>	98
<u>Abbildung 86: Schwindrissbildung a) im mittleren Bereich des Stützmaterials und b) im Eckbereich der Aussparung.</u>	99
<u>Abbildung 81: Klimadiagramm des Bewitterungszeitraums sowie zeitlich eingeordnete Beobachtungen der Schimmelpilzbildung.</u>	112

11 Tabellenverzeichnis

<u>Tabelle 1: Zusammenfassung der Anforderung an die Druckfestigkeit des Stützmaterials.</u>	15
<u>Tabelle 2: Materialanforderungen an ein extrudierbares Stützmaterial [5].</u>	23
<u>Tabelle 3: Materialrezeptur des Stützmaterials.</u>	24
<u>Tabelle 4: Mischprotokoll für die Herstellung des Stützmaterials.</u>	25
<u>Tabelle 5: Modifizierte Stützmaterialrezepturen.</u>	25
<u>Tabelle 6: Referenzrezeptur des Stützmaterials mit Zugabe von Calciumsulfat-Halbhydrat.</u>	26
<u>Tabelle 7: Verbesserte Rezeptur des Stützmaterials mit Zugabe von Calciumsulfat-Halbhydrat.</u>	27
<u>Tabelle 8: Gewichtung der Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Versuchspläne [20].</u>	28
<u>Tabelle 9: Belegungstabelle für die Variation von sieben Einflussfaktoren um jeweils $\pm 15\%$.</u>	29
<u>Tabelle 10: Versuchsschema zur Charakterisierung des Schwindverhaltens.</u>	38
<u>Tabelle 11: Zusammenstellung der Kennzahlen des Schwindens und deren statistische Verteilung für die Rezepturen M-17 und M-4-Ref.</u>	40
<u><i>Tabelle 12: Zusammenstellung zu Kennzahlen der zeitlichen Festigkeitsentwicklung und deren statistischer Verteilung für die Rezepturen M-25 und M-4-Ref.</i></u>	48
<u>Tabelle 13: Übersicht über untersuchte Geschwindigkeiten bei Schneckenpumpe und Exzentrerschneckenpumpe.</u>	54
<u>Tabelle 14: Gewichtsverlust des Stützmaterials im Zeitraum der Messung bei Nutzung des Heißluftföns bzw. des Infrarotstrahlers.</u>	61
<u>Tabelle 15: Versuchsschema zur Bewertung der Oberflächenrauheit.</u>	69
<u>Tabelle 16: Zusammenstellung von Rauheitskennzahlen und deren statistische Verteilung für die Stützmaterialrezepturen M-25 und M-4-Ref.</u>	70
<u>Tabelle 17: Ablauf und experimentelle Ergebnisse aus der Trocknung des Stützmaterials.</u>	71
<u>Tabelle 18: Übersicht des zeitabhängigen Geschwindigkeitsprofils des Extruders.</u>	77
<u>Tabelle 19: Übersicht der zeitlichen Verzögerungen des Druckkopfs bei unterschiedlichen Störstellen.</u>	77
<u>Tabelle 20: Ergebnisse der Mengenermittlung.</u>	78
<u>Tabelle 21: Ausführungszeiten Druckabschnitt 1.</u>	78
<u>Tabelle 22: Übersicht über die Dauer aller Druckabschnitte.</u>	78
<u>Tabelle 23: Anpassung der Lohnkosten.</u>	81
<u>Tabelle 24: Anpassung der Materialkosten.</u>	81
<u>Tabelle 25: Preisangaben für Komponenten des Stützmaterials.</u>	82
<u>Tabelle 26: Auflistung der benötigten Anlagentechnik.</u>	84
<u>Tabelle 27: Anpassung der mittleren Maschinen-Neuwerte an das Jahr 2019, bezogen auf 2015.</u>	85
<u>Tabelle 28: Lohnkosten.</u>	85
<u>Tabelle 29: Kosten der rezyklierbaren Komponenten des Stützmaterials je m^3.</u>	86
<u>Tabelle 30: Kosten der nicht rezyklierbaren Komponenten des Stützmaterials je m^3.</u>	86

<u>Tabelle 31: Entwicklung der SM-Kosten für 1 m³ nach „x“ Anwendungen.....</u>	86
<u>Tabelle 32: Materialkosten abhängig von Anzahl der Wiederaufbereitungen.....</u>	87
<u>Tabelle 33: Vorhaltekosten der Geräte für eine Auslastung von 145 h/Monat.....</u>	87
<u>Tabelle 34: Gesamtüberblick über die Gerätekosten.....</u>	87
<u>Tabelle 35: Gesamtkosten CONPrint3D®-Verfahren einschließlich des automatisierten Stützmaterialaufbaus unter Anwendung der DIN 18330. Es wird ein einmaliges Wiederaufbereiten des Stützmaterials angenommen.....</u>	88
<u>Tabelle 36: Gesamtkosten CONPrint3D-Verfahren, ohne SM-einsatz.....</u>	88
<u>Tabelle 37: Versuchsschema zur Analyse der Kontaktzone Stützmaterial/Beton.....</u>	95
<u>Tabelle 38: Zusammenstellung der untersuchten Stützmaterialrezepturen in Rahmen der Optimierung der Referenzrezeptur. Alle Angaben sind im Massenprozent.....</u>	113
<u>Tabelle 39: Aufgenommene Messdaten und daraus gewonnene Kennzahlen des statistischen Versuchsfelds.....</u>	114
<u>Tabelle 40: Mengenermittlung für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit des Einsatzes des Stützmaterials.....</u>	118
<u>Tabelle 41: Berechnung der Ausführungszeiten für Druckabschnitt 2 und 3.....</u>	119

12 Anhang

A.1 Klimadiagramm Bewitterungsdauer

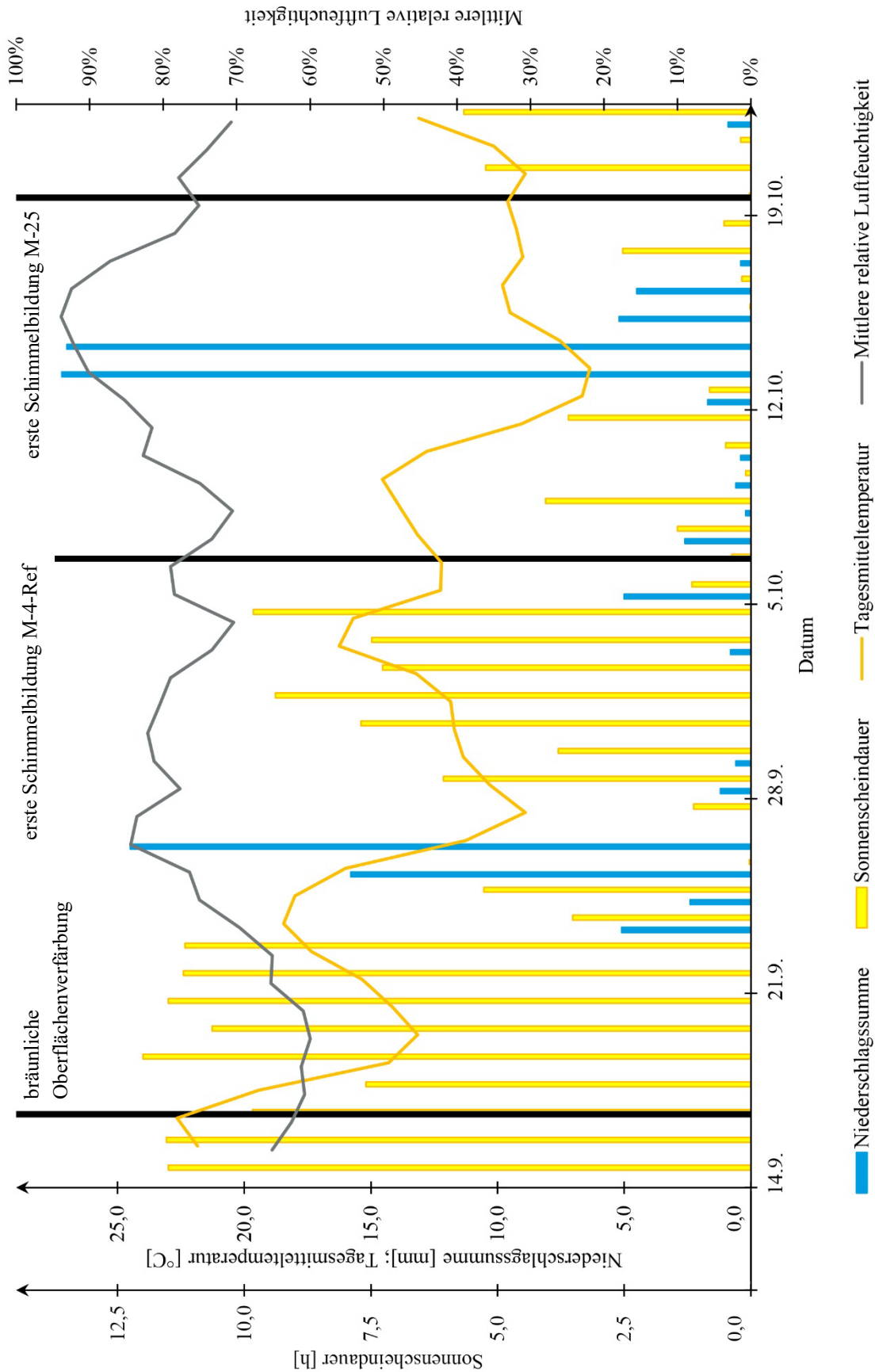


Abbildung 87: Klimadiagramm des Bewitterungszeitraums sowie zeitlich eingeordnete Beobachtungen der Schimmelpilzbildung.

A.2 Untersuchte Rezepturen

Tabelle 38: Zusammenstellung der untersuchten Stützmaterialrezepturen in Rahmen der Optimierung der Referenzrezeptur. Alla Angaben sind im Massenprozent.

[%]	Rezeptur	Stärke	C100	T9	CaSO ₄	Wasser	Lignosulfonat	Weinsäure	CaOH	Guar
Vorversuche	M-4	0,00	13,76	9,11	30,11	45,11	1,69	0,00	0,00	0,23
	M-5	7,20	6,65	6,65	27,20	50,60	1,50	0,00	0,00	0,20
	M-6	3,87	9,98	6,72	27,14	50,50	1,50	0,10	0,00	0,20
	M-7	4,10	9,90	6,60	27,00	50,60	1,50	0,10	0,00	0,20
	M-8	3,30	11,99	5,32	27,00	50,60	1,50	0,10	0,00	0,20
	M-9	4,10	9,91	6,60	27,00	50,60	1,50	0,10	0,00	0,20
	M-10	3,54	8,52	8,55	27,00	50,60	1,50	0,10	0,00	0,20
	M-11	5,60	9,00	6,01	27,00	50,60	1,50	0,10	0,00	0,20
	M-12	5,92	6,61	8,07	27,00	50,60	1,50	0,10	0,00	0,20
	M-13	4,92	0,00	15,69	27,00	50,60	1,50	0,10	0,00	0,20
statistischer Versuchsplan	M-5	7,19	6,65	6,65	26,99	50,59	1,50	0,10	0,13	0,20
	M-14	9,43	6,45	6,45	26,17	49,05	1,96	0,10	0,13	0,26
	M-15	5,98	7,47	5,52	22,43	56,89	1,24	0,10	0,13	0,22
	M-16	6,84	8,54	8,54	25,65	48,08	1,92	0,10	0,13	0,19
	M-17	6,43	5,94	8,03	32,62	45,18	1,33	0,10	0,13	0,24
	M-18	7,19	6,64	6,64	26,99	50,60	1,50	0,10	0,13	0,20
	M-19	7,92	5,41	7,32	21,98	55,75	1,22	0,10	0,13	0,16
	M-20	8,50	7,85	5,81	31,91	44,21	1,31	0,10	0,13	0,17
	M-21	5,63	5,19	5,19	28,53	53,48	1,58	0,10	0,13	0,16
	M-22	8,56	5,85	6,90	32,14	44,53	1,55	0,10	0,13	0,24
	M-23	8,00	5,75	7,25	30,55	46,50	1,50	0,10	0,13	0,22
	M-24	8,25	6,00	8,75	30,00	45,00	1,50	0,10	0,13	0,22
M-25	8,27	5,52	8,02	31,09	45,44	1,20	0,10	0,13	0,22	

A.3 Aufgenommene Messdaten

Tabelle 39: Aufgenommene Messdaten und daraus gewonnene Kennzahlen des statistischen Versuchsfelds.

	M-5	M-14	M-15	M-16	M-17	M-18	M-19	M-20	M-21
Belegungstabelle									
Stärke	[]	0	+	-	-	+	+	+	-
C100	[]	0	-	+	-	+	-	+	-
T9	[]	0	-	+	+	+	+	-	-
CaSO ₄	[]	0	-	-	+	+	-	+	+
Wasser	[]	0	-	-	-	+	+	-	+
Lignosulfonat	[]	0	+	+	-	+	-	-	+
Weinsäure	[]	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca(OH) ₂	[]	0	0	0	0	0	0	0	0
Guar	[]	0	+	-	+	+	-	-	-
Rezepturen									
Stärke	[%]	7,19	9,43	5,98	6,84	6,43	7,19	7,92	8,50
C100	[%]	6,65	6,45	7,47	8,54	5,94	6,64	5,41	7,85
T9	[%]	6,65	6,45	5,52	8,54	8,03	6,64	7,32	5,81
CaSO ₄	[%]	26,99	26,17	22,43	25,65	32,62	26,99	21,98	31,91
Wasser	[%]	50,59	49,05	56,89	48,08	45,18	50,60	55,75	44,21
Lignosulfonat	[%]	1,50	1,96	1,24	1,92	1,33	1,50	1,22	1,31
Weinsäure	[%]	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Ca(OH) ₂	[%]	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
Guar	[%]	0,20	0,26	0,22	0,19	0,24	0,20	0,16	0,17

Fortsetzung auf Folgeseite

	M-5	M-14	M-15	M-16	M-17	M-18	M-19	M-20	M-21	
Klimabedingungen										
Mischungstemperatur	[°C]	29,20	27,30	28,30	26,50	27,10	27,30	26,50	25,90	25,80
relative Luftfeuchtigkeit	[%]	25,00	33,00	33,00	51,00	47,00	42,00	36,00	37,00	39,00
Eignung qualitativ										
Gleichmäßigkeit der Extrusion	[]	4,0	4,5	1,0	2,0	2,0	5,0	1,0	3,0	1,0
Bemerkungen		Deformation unter Eigengewicht	Deformation unter Eigengewicht	sehr flüssig	rissige Oberfläche	ausgeprägt stockend	Deformation unter Eigengewicht	sehr flüssig	sehr gut extrudierbar aber zu fest	sehr flüssig
Mischungsstabilität	[]	1,0	1,5	2,0	2,0	1,8	1,4	1,0	2,0	2,0
Bemerkungen		Bluten	geringfügiges Bluten	/	/	marginales Bluten	Bläschenbildung	Bläschenbildung	/	/
Scherverhalten										
Extrusionswiderstand	[N]	190,2	201,0	30,0	1161,6	637,2	216,6	69,0	1222,2	50,0
maximaler Förderdruck	[kPa]	16,82	17,77	2,65	102,71	56,34	19,15	6,10	108,07	4,42
Zeitabhängiges Verhalten										
Verarbeitungszeit	[min]	77,4	130,7	216,7	72,6	76,7	114,7	150,7	87,8	125,8
Erhärtungsende	[min]	104,5	163,2	249,5	112,2	106,1	170,2	186,5	126,3	163,9
Erhärtungszeit	[min]	27,1	32,5	32,8	39,6	29,4	55,5	35,8	38,5	38,1
<i>Fortsetzung auf Folgeseite</i>										
42,6										

		M-5	M-14	M-15	M-16	M-17	M-18	M-19	M-20	M-21
Dichte										
Feuchtdichte	[g/cm ³]	1,17	1,13	1,18	1,19	1,21	1,16	1,08	1,25	1,17
Würfeldichte	[g/cm ³]	0,65	0,77	0,62	0,73	0,82	0,64	0,54	0,86	0,65
Dichteabnahme	[%]	0,44	0,32	0,48	0,39	0,33	0,45	0,50	0,32	0,44
Schwindverhalten										
Länge 17.08. 11:25	[mm]		53,45							
Länge 17.08. 12:35	[mm]		53,40							
Länge 17.08. 13:50	[mm]		53,50							
Länge 17.08. 18:20	[mm]	73,97								
Länge 18.08. 09:05	[mm]	73,85	53,50	115,45						
Länge 18.08. 11:40	[mm]			115,10	109,60	147,65				
Länge 18.08. 16:25	[mm]						84,63			
Länge 19.08. 09:50	[mm]	73,83	53,55	114,78	109,48	147,63	84,52			
Länge 19.08. 15:55	[mm]								148,10	150,97
Länge 20.08. 09:55	[mm]	74,00	53,38	114,65	109,50	147,67	84,67	151,20	148,08	150,55
Länge 21.08. 09:00	[mm]	73,82	53,43	114,40	109,47	147,63	84,68	151,23	148,08	150,93
Länge 24.08. 08:05	[mm]	73,70	53,23	114,45	108,90	147,50	84,38	151,07	147,70	150,90
Länge 25.08. 07:15	[mm]				108,92	147,45	84,40	151,30	147,82	150,52
Länge 26.08. 07:05	[mm]							151,12	147,70	150,45
Schwindmaß binnen 7 Tagen	[%]	0,30	0,47	0,88	0,70	0,30	0,30	0,08	0,18	0,09

Fortsetzung auf Folgeseite

	M-5	M-14	M-15	M-16	M-17	M-18	M-19	M-20	M-21	
Festkörpermechanik										
Druckfestigkeit	[N/mm ²]	0,69	0,94	0,13	1,11	1,61	0,82	0,17	1,56	0,34
Biegezugfestigkeit	[N/mm ²]	/	/	0,12	0,41	0,50	/	0,11	0,40	0,27
bezogene Biegezugfestigkeit	[]	/	/	0,93	0,37	0,31	/	0,63	0,25	0,78
Nachhaltigkeit										
Treibhauspotenzial	[kg _{CO2 äq} /kg]	-0,11	-0,09	-0,12	-0,18	-0,12	-0,11	-0,10	-0,11	-0,07
Ozonschichtabbaupotenzial	[kg _{R11 äq} /kg]	6,71E-10	8,77E-10	5,60E-10	7,61E-10	6,05E-10	6,71E-10	6,34E-10	6,77E-10	6,24E-10
Ozonbildungspotenzial	[kg _{C2H4 äq} /kg]	1,30E-05	1,41E-05	1,20E-05	1,41E-05	1,30E-05	1,30E-05	1,20E-05	1,39E-05	1,21E-05
Versauerungspotenzial	[kg _{SO2 äq} /kg]	6,28E-04	7,81E-04	5,50E-04	6,40E-04	5,78E-04	6,28E-04	6,46E-04	7,14E-04	5,17E-04
Eutrophierungspotenzial	[kg _{PO4 äq} /kg]	2,01E-04	2,49E-04	1,76E-04	2,05E-04	1,85E-04	2,01E-04	2,06E-04	2,23E-04	1,71E-04
Rezepturkosten	[€/t]	85,91	95,90	75,30	86,31	90,88	85,91	80,83	96,48	78,65
	[€/m ³]	100,67	108,70	88,81	102,29	110,30	99,52	87,56	120,80	92,03

A.4 Mengenermittlung

Tabelle 40: Mengenermittlung für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit des Einsatzes des Stützmaterials.

Außenwand KS L-R 24cm, tragend		Länge [m]	Höhe [m]	Anzahl	Fläche [m ²]	Volumen [m ³]
Nord	Mauerwerk	13,06	3,00	1	39,18	9,40
	Öffnung: Fenster 1	1,01	1,01	1	1,02	0,24
	Öffnung: Fenster 2	2,20	1,01	1	2,22	0,53
Ost	Mauerwerk	13,06	3,00	1	39,18	9,40
	Öffnung: Fenster 2	2,20	1,01	2	4,44	1,07
Süd	Mauerwerk	13,06	3,00	1	39,18	9,40
	Öffnung: Fenster 1	1,01	1,01	1	1,02	0,24
	Öffnung: Fenster 2	2,20	1,01	1	2,22	0,53
	Öffnung: Tür	0,90	2,01	1	1,80	0,43
West	Mauerwerk	13,06	3,00	1	39,18	9,40
	Öffnung: Fenster 1	1,01	1,01	2	2,04	0,49
Menge nach DIN 18330		39,40	-	-	156,72	37,61
Menge Real		52,24	-	-	135,47	32,51
Innenwand KS L-R 17,5cm tragend		Länge [m]	Höhe [m]	Anzahl	Fläche [m ²]	Volumen [m ³]
Nord-Süd, Achse	Mauerwerk	12,82	3,00	1	38,46	6,73
	Öffnung: Tür	0,90	2,01	1	1,80	0,31
Nord-Süd	Mauerwerk	6,73	3,00	1	20,18	3,53
	Öffnung: Tür	0,90	2,01	1	1,80	0,31
Ost-West	Mauerwerk	8,21	3,00	1	24,62	4,31
	Öffnung: Tür	0,90	2,01	1	1,80	0,31
Menge nach DIN 18330		27,75			83,25	14,57
Menge Real		27,75			77,85	13,62
Menge Stützmaterial (gesamt)		16,42			20,16	4,49

Tabelle 41: Berechnung der Ausführungszeiten für Druckabschnitt 2 und 3.

Druckabschnitt 2 (H:100-201)	Länge gesamt [cm]	Anzahl [n]	Dauer je Vorgang [s]	Dauer je Schicht [s]
Druckstrecke	7999,00	1	0,07	533,27
Start/Stop		60	0,38	22,50
Störstelle: FW		48	12,00	576,00
Störstelle: E		4	27,50	110,00
Störstelle: TV		6	26,00	156,00
Wechsel Druckkopf		12	5,00	60,00
Schichtzykluszeit [min]				24,30
Gesamtdauer Druckabschnitt 2 [h]				8,50

Druckabschnitt 3 (H:201-300)	Länge gesamt [cm]	Anzahl [n]	Dauer je Vorgang [s]	Dauer je Schicht [s]
Druckstrecke	7999,00	1	0,07	533,27
Start/Stop		14	0,38	5,25
Störstelle: FW		0	12,00	0,00
Störstelle: E		4	27,50	110,00
Störstelle: TV		6	26,00	156,00
Wechsel Druckkopf		0	5,00	0,00
Schichtzykluszeit [min]				13,41
Gesamtdauer Druckabschnitt 3 [h]				4,47