Hochschule Konstanz
Fakultät Bauingenieurwesen

HTWG Konstanz

Hochschule für Technik, Wirtschaft und Gestaltung

Fakultät Bauingenieurwesen

Masterthesis

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Engineering

zum Thema

Weiterentwicklung zirkulärer und automatisierter Bauweisen des modernen Lehmbaus

Beispielhafte Untersuchungen der Stampflehmherstellung und des 3D-Drucks mit Lehm

---

von

Selina Huber

Matrikelnummer:	[redacted]
Studiengang:	MBU – Bauingenieurwesen
Vertiefungsrichtung:	Baubetrieb & Baumanagement
Anschrift:	[redacted]
	[redacted]
E-Mail:	selina.huber@htwg-konstanz.de
Erstprüfer/ Betreuer:	Prof. Dr.-Ing. Michael Bühler
Zweitprüfer:	Prof. Dr.-Ing. Alexander Michalski

Eingereicht am: 30.04.2023

Abstract

Clay once was the predominant building material in Germany. This was largely displaced by the first industrial revolution and replaced by industrialized building materials such as concrete. With the fourth industrial revolution and the growing awareness of the impact of resource waste and waste production on the environment, traditional earthen construction is set to regain economic momentum through digitization and automation. Building with clay offers the opportunity for a systematic transformation of the construction industry towards carbon neutrality. Currently, the construction industry is responsible for more than 30% of global greenhouse gas emissions. This could change in the future by using regional, circular materials that are ideally obtained from the construction site itself. Clay occurs extensively and abundantly in almost all parts of the world and can be supplemented with various regionally available additives. Through product standardization and technological advances, earthen construction could be mass produced and compete with conventional reinforced concrete construction or timber construction in the future.

This master thesis focuses on the modernization of earthen buildings in the form of digitized and automated additive manufacturing processes such as rammed earth construction or 3D printing with clay for wall components. The aim of the master thesis is to develop a technical design for one of the mentioned additive manufacturing processes. In order to achieve this goal, the different manufacturing processes and types are compared according to the state of the art. The best evaluated one is chosen. Exemplary investigations using a clay 3D printer serve as a practical basis for the choice of manufacturing process. In the process, test specimens are printed with and without additives, also there are test specimens created with different degrees of filling. The specimens are tested in the laboratory for their compressive strength. The following work shows the many potentials of earthen building as a circular and modern construction method, while also shedding light on the challenges that still need to be solved.

Kurzfassung

Der einst vorherrschende Baustoff in Deutschland war Lehm. Dieser wurde durch die erste industrielle Revolution weitgehend verdrängt und durch industrialisierte Baustoffe wie Beton ersetzt. Mit der vierten industriellen Revolution und dem steigenden Bewusstsein der Auswirkungen der Ressourcenverschwendung und Abfallproduktion auf die Umwelt, soll der traditionelle Lehmbau durch Digitalisierung und Automatisierung wieder an ökonomischem Aufschwung gewinnen. Bauen mit Lehm bietet die Chance einer systematischen Transformation der Bauindustrie in Richtung Kohlenstoffneutralität. Bisher ist die Bauindustrie für mehr als 30 % der weltweiten Treibhausgasemissionen verantwortlich. Durch die Verwendung regionaler, zirkulärer Materialien, die idealerweise aus der eigenen Baugrube gewonnen werden, könnte sich dies in Zukunft ändern. Lehm kommt in nahezu allen Teilen der Welt flächendeckend und zur Genüge vor und kann mit verschiedenen regional vorhandenen Additiven ergänzt werden. Durch Standardisierung der Produkte und technologischen Fortschritt könnte der Lehmbau in eine Massenproduktion überführt werden und in Zukunft mit dem konventionellen Stahlbetonbau oder Holzbau konkurrieren.

Diese Masterarbeit konzentriert sich auf die Modernisierung von Lehmbauten in Form von digitalisierten und automatisierten additiven Fertigungsverfahren wie der Stampflehmbau oder das 3D-Drucken mit Lehm für Wandbauteile. Ziel der Masterthesis ist es, einen Bauablauf für eines der genannten additiven Fertigungsverfahren zu entwickeln. Um dieses Ziel zu erreichen, werden die verschiedenen Fertigungsverfahren und Arten nach Stand der Technik miteinander verglichen und sich für das am besten bewertete entschieden. Als praktische Grundlage für die Wahl des Fertigungsverfahren dienen beispielhafte Untersuchungen mit einem Lehm 3D-Drucker. Dabei werden Prüfkörper mit und ohne Additive gedruckt sowie Prüfkörper mit unterschiedlichen Füllgraden erstellt und anschließend im Labor auf ihre Druckfestigkeit geprüft. Die folgende Arbeit zeigt die vielen Potenziale des Lehmbaus als zirkuläre und moderne Bauweise auf und beleuchtet zugleich die Herausforderungen, die es noch zu lösen gilt.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis ..... **I**

Tabellenverzeichnis ..... **III**

Abkürzungsverzeichnis ..... **IV**

1 Einführung **1**

1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit 1

1.2 Aufbau der Arbeit 2

1.3 Forschungskonzept 4

2 Bauen mit Lehm **6**

2.1 Historie 6

2.2 Grundlagen zum Baustoff Lehm 8

2.3 Anwendungen von Lehm im Bauwesen 9

2.4 Traditioneller Stampflehmbau 12

2.5 Nachhaltige Stabilisierung 15

2.5.1 Kasein 17

2.5.2 Zellulose- /Holzfasern 18

2.6 Zirkuläres Bauen mit Lehm 18

3 Moderner Lehmbau **23**

3.1 Additive Fertigungsverfahren mit Lehm 24

3.2 Stand der Technik 24

3.2.1 Moderner Stampflehmbau 26

3.2.2 3D-Druck mit Lehm 31

3.3 Vergleich additiver Fertigungsverfahren 34

3.4 Art der Fertigung 38

4 Praktischer Teil: Lehm 3D Druck **40**

4.1 Ziel der Probedrucke 40

4.2 Vorbereitungen und Versuchsaufbau 40

4.3 Material 42

4.4 Geometrie 46

4.5 Herstellung der Lehmprüfkörper ... 47
4.6 Durchführung der Druckversuche ... 52
4.7 Auswertung der Ergebnisse ... 55
5 Bauablauf für eine on-site Stampflehmvorfertigung ... 62
5.1 Baustelleneinrichtung ... 63
5.2 Materialgewinnung ... 64
5.3 Urban-Mining-Plattform ... 65
5.4 Materialaufbereitung ... 66
5.5 Materialförderung ... 67
5.6 Verdichtung ... 69
5.7 Lagerung ... 73
5.8 Montage ... 74
5.9 Bewertung des entwickelten Konzeptes ... 75
6 Schlussfolgerung ... 76
6.1 Resümee ... 76
6.2 Ausblick und weitere Forschungsfragen ... 78
Literaturverzeichnis ... 83
Anhangverzeichnis ... 89
Anhang A: Technische Zeichnungen ... 90
a. Bauablauf: on-site Vorfertigung von Stampflehmelementen ... 90
b. Verdichtungsmaschine mit Materialförderungsanlage ... 91
c. Materialförderungsanlage ... 92
d. Verdichtungsmaschine ... 93
e. Verdichtungseinheit ... 94
f. Prinzip der Vorsatzschalung ... 95
Anhang B: Technische Datenblätter der Baustoffe (praktischer Teil) ... 96
Anhang C: Auswertung der Prüfkörper & Druckversuche ... 100
g. Auswertung der Prüfkörper ... 100
h. Skalierung der Prüfkörper ... 110

i. Vergleich der Schwindmaße 110

j. Abmessungen der Prüfkörper 111

k. Massekonstanz 112

l. Auswertung der Druckversuche 113

m. Kraft-Weg-Diagramme 115

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wüstenstadt Shibam, Jemen [13] 7
Abbildung 2: Stampflehmhaus Weilburg an der Lahn von 1830 [12] 7
Abbildung 3: Touristenunterkunft "Otto Cottage" von Paul Marais [14] 7
Abbildung 4: Anwendungsmöglichkeiten von Lehmbaustoffen [11] 11
Abbildung 5: Übersicht Zusatzstoffe [23] 16
Abbildung 6: Übersicht Zusatzmittel [23] 16
Abbildung 7: Stoffkreislauf von Lehmbaustoffen [4] 19
Abbildung 8: Ablauf Urban Mining [32] 20
Abbildung 9: EPEA Gebäudepass (Drees & Sommer) 21
Abbildung 10: Karte der gemeldeten DMEC-Projekte auf der ganzen Welt zwischen 2011 und 2021 [8] 26
Abbildung 11: Mischen des Materials in der Baugrube mittels Anbaufräsen bei ERNE AG [44] 27
Abbildung 12: Robotische Vorfertigung in der Zelthalle von ERNE AG [45] 27
Abbildung 13: Lagerung u. Lufttrocknung der fertigen Stampflehmelemente der ERNE AG [45] 27
Abbildung 14: Visualisierung Büroneubau ERNE AG [45] 28
Abbildung 15: Bauzustand Büroneubau ERNE AG (eigene Aufnahme) 28
Abbildung 16: erster Prototyp von Form Earth [48] 29
Abbildung 17: "Freeform" von Form Earth [13] 29
Abbildung 18: Aufbau der maschinellen Vorfertigung, M. Rauch [9] 30
Abbildung 19: Schneidemaschine, M. Rauch [50] 30
Abbildung 20: robotisch gefertigte Stampflehmwand der TU Braunschweig [52] 31
Abbildung 21: neues Konzept zur vollautomatisierten Stampflehmbauweise, TU Braunschweig [2] 31
Abbildung 22: Projekt Tecla- wabenförmiger Wandaufbau von WASP 32
Abbildung 23: Projekt Tecla- visualisierter Bauablauf von WASP 32
Abbildung 24: Herstellung eines 3D gedruckten, gebogenen Bauteils mit Stroh stabilisiertem Lehm [59] 34
Abbildung 25: Entwurf robotergestützter 3D-Druck mit Kartuschen [59] 34
Abbildung 26: Aufbau Lehm 3D-Drucker mit WASP Düse an der HTWG Konstanz 41
Abbildung 27: Konsistenzprüfung der Mischung ohne Additive 43
Abbildung 28: Mischung mit 0,4 % Holzfasern 44
Abbildung 29: Material mit Kalkkasein im Schlauch entmischt 44
Abbildung 30: Anrühren von Kasein & Soda im Mixer 45

Abbildung 31: PrusaSlicer 2.5.0 Erstellung des G-Codes mit Bienenwaben-Infill 47
Abbildung 32: Druckfehler der ersten Versuche mit Prüfkörper der Kantenlänge 10 cm..... 48
Abbildung 33: Druck der Prüfkörper (von links: ohne Additiv, mit 1,23 % Holzfasern, mit 1,5 % Kasein) 49
Abbildung 34: Prüfkörper mit 100 % geradlinigem-Infill (ohne Additiv VD2)..... 50
Abbildung 35: Ansiedlung von Schimmelpilzen auf Kasein Prüfkörper nach Ausschalen 50
Abbildung 36: Versuchsreihe P1-P5 ohne Additiv geglättet..... 51
Abbildung 37: Wärmeschrank mit Prüfkörpern, Wasserschalen und Messgerät..... 52
Abbildung 38: Messdaten der Lagerung der Lehmprüfkörper..... 53
Abbildung 39: Prüfung der Ebenheit mit Haarlineal 54
Abbildung 40: max. Druckfestigkeiten bei 40 % Bienenwaben-Infill mit und ohne Additive.. 55
Abbildung 41: max. Druckfestigkeiten der Prüfkörper unterschiedlicher Füllgrade 56
Abbildung 42: Prüfkörper mit Kasein nach Druckversuchen in der Druckpresse 57
Abbildung 43: Kraft-Weg Diagramm, Prüfkörper ohne Additive, Versuchsreihe P1-P5..... 58
Abbildung 44: Kraft-Weg Diagramm der Prüfkörper mit den unterschiedlichen Additiven.... 59
Abbildung 45: Kraft-Weg Diagramm der unterschiedlichen Additiven & Füllgraden..... 60
Abbildung 46: Bauablauf-Vorfertigung in Stampflehmbauweise auf der Baustelle..... 62
Abbildung 47: Materialgewinnung (Pos. 1) durch Auflockerung und Durchmischung der Schichten mit dem Bagger 65
Abbildung 48: Schüttflix App zur Lieferung von Schüttgütern 66
Abbildung 49: Materialaufbereitung (Pos. 2) durch Mischen mit Anbaufräse u. integrierter Wassereinsprühanlage 67
Abbildung 50: Sieblöffel MB-LS170 S2 von MB Crusher [75] 68
Abbildung 51: Sieblöffel als Anbaugerät für Radlader oder Bagger von MB Crusher [75].... 68
Abbildung 52: Materialförderung (Pos. 3) mit Radlader und Sieblöffel..... 69
Abbildung 53: Stampffußbandage mit Tiefenwirkung, Wacker Neuson [78] 70
Abbildung 54: Stampffußbandage mit Abstreiferzähne von Vibromax [79] 70
Abbildung 55: Verdichtungsmaschine (Pos. 4) auf Abrollplattform 71
Abbildung 56: Verdichtungseinheit (Pos. 4) aus Stampffußwalze und zwei leicht versetzten Stampfern 72
Abbildung 57: Schnitt durch Verdichtungseinheit (Pos. 4) mit Prinzip der Ausgleichsplatte und Vorsatzschalung 72
Abbildung 58: Lagerung (Pos. 5) der Stampflehmelemente in einer Zelthalle 73
Abbildung 59: Montage der Stampflehmelemente; Ricola Kräuterzentrum Laufen CH, M. Rauch [81] 74
Abbildung 60: Retuschieren der Fugen; Ricola Kräuterzentrum Laufen CH, M. Rauch [82] 74

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eigenschaften und Kennwerte von Stampflehmwänden [9, 15, 20] 14
Tabelle 2: Übersicht zu bedeutenden Referenzprojekten zum Thema digitale, additive Fertigungsverfahren von Stampflehmwänden 25
Tabelle 3: Übersicht zu bedeutenden Referenzprojekten zum Thema 3D-Druckverfahren/Extrusionsverfahren von Lehmwänden 25
Tabelle 4: Vergleich additiver Fertigungsverfahren (Nutzwertanalyse) [2, 8, 9, 46, 51, 53, 58, 59, 61]..... 37
Tabelle 5: Vergleich der Fertigungsarten für die Stampflehmbauweise (Nutzwertanalyse).. 39
Tabelle 6: Mischungszusammensetzungen in [%] mit Nass- u. Trockendichte in [g/cm^3] 45

Abkürzungsverzeichnis

BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
BIM	Building Information Modeling
BMWSB	Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen
DMEC	Digital Manufacturing for Earth Construction, (Digitale Fertigung für den Erdbau)
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule
IP	Ingress Protection (Schutz der Eingänge)
ITE	Institut für Tragwerksplanung
LCA	Life Cycle Assessment (Lebenszyklusbetrachtung)
OIL	Open Innovation Lab
Pos.	Position
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
v. u. Z.	vor unserer Zeitrechnung

1 Einführung

1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit

Die Baubranche ist für bis zu 38 % der weltweiten Treibhausgase verantwortlich. Dabei stammen etwa 10 % aus der Herstellung von Baumaterialien, welche dem sogenannten verkörperten Kohlenstoffäquivalent zugeschrieben werden [1]. Einer der größten Verursacher der globalen CO_2-Emissionen in der Baubranche ist die Zementindustrie, welche allein schon für 5-8% der weltweiten CO_2-Emissionen verantwortlich ist [2, S. 1]. Diese sucht seit einigen Jahren nach Lösungen für dekarbonisierten Zement. Doch möglicherweise liegt die Lösung nicht im Beton und in der Erforschung neuer Baumaterialien, sondern darin, ein altbekanntes Baumaterial wie Lehm wieder zu entdecken und zu modernisieren. Lehm kommt in nahezu allen Teilen der Welt vor und gilt als zirkulärer, gesundheitlich unbedenklicher Baustoff. Bauen mit Lehm lässt bereits auf eine Jahrtausende alte Tradition zurückblicken [3, S. 2]. Durch die Industrialisierung wurde Lehm als Baustoff in Deutschland weitestgehend zurückgedrängt und hat bis heute den Ruf eines „Öko Baustoffes“. In Entwicklungsländern gilt Lehm oftmals als „Baustoff der Armen“ [3, S. 11]. Diese Masterthesis entstand aus der Motivation heraus, einen Beitrag zur zirkulären Baukultur zu leisten und der Neugier, mit neuen Technologien Lehm wieder attraktiver und konkurrenzfähig zu Beton, Stahl, Ziegel und Co. zu machen.

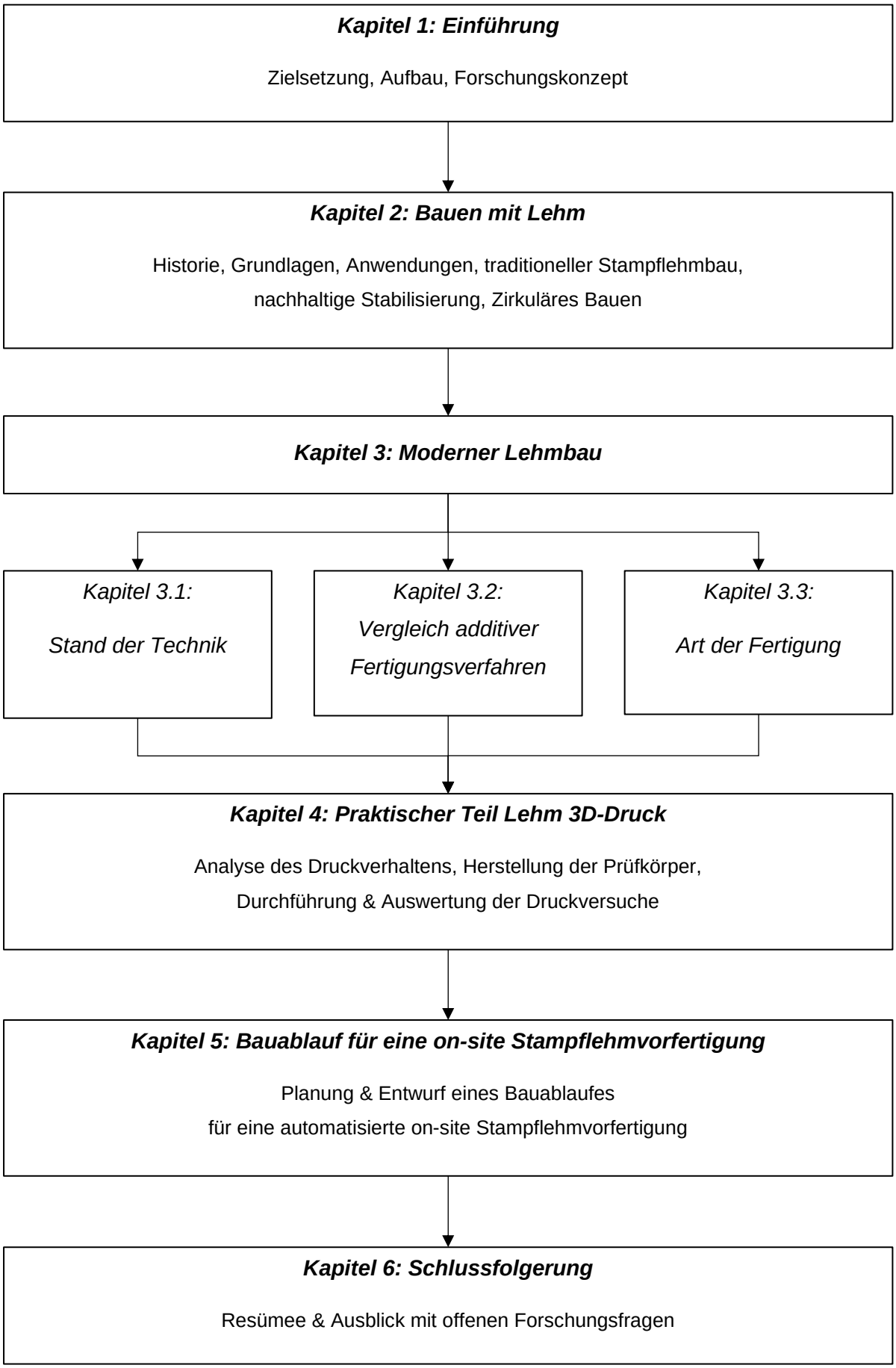
Ziel der Masterthesis ist die Entwicklung eines technischen Konzeptes für die additive (schichtweise) Fertigung mit Lehm. Genauer gesagt ein automatisiertes digitales Fertigungsverfahren für Lehmwände. Dabei sollen die Herausforderungen und Schwierigkeiten des Lehmbaus analysiert und mit Hilfe von Experten neue Möglichkeiten aufgezeigt werden. Die Herstellung ist bisher sehr zeit- und arbeitsintensiv [4, S. 153]. Das Verdichten mit dem Stampflehmhammer ist zudem körperlich anstrengend. Die ökonomischen Faktoren überwiegen derzeit die vielen ökologischen Vorteile des Lehmbaus, was mitunter auf die fehlenden technologischen Fortschritte sowie einer Standardisierung im Lehmbau zurückzuführen ist.

Das Thema zirkuläre Kreislaufwirtschaft ist allgegenwärtig und gilt als Grundsatz für die folgende Arbeit. Bauen bedeutet immer einen Eingriff in natürliche Ressourcen und Kreisläufe zu nehmen. Dabei kommt es auf die tiefe der Eingriffe an und wie man diese minimieren kann [3, S. 22]. Im Jahr 2020 waren etwa 55 % des Abfallaufkommens in Deutschland Bau- und Abbruchabfälle, die nur teilweise wieder in die Kreislaufwirtschaft eingebracht werden können [5]. Hier bietet der Lehmbau durch seine einfache Wiederverwendbarkeit und des weltweiten Vorkommens in Zukunft eine nachhaltige Lösung.

Der Grundgedanke des Lehmbaus, wie ihn auch Martin Rauch beschreibt, besteht darin aus Erde und Wasser ein Gebäude zu errichten, ein Dach darauf zu setzen und das Gebäude zu nutzen, am Ende der Nutzungsdauer das Dach rückzubauen und der Lehmbau zersetzt sich durch den natürlichen Verwitterungsprozess wieder in Erde [6, 3:46-4:23]. Aus diesem Grund beschäftigt sich diese Arbeit ausschließlich mit nachhaltigen Additiven, die am Ende der Nutzungsdauer nicht von der Erde separiert werden müssen und wieder in den Ressourcen Kreislauf zurückgeführt werden können.

1.2 Aufbau der Arbeit

Um den Aufbau dieser Arbeit zu strukturieren und nachzuvollziehen, gibt dieses Kapitel eine Übersicht über den Ablauf der Masterthesis. In der Einführung wird die Zielsetzung definiert und das Forschungskonzept erklärt. Das zweite Kapitel soll dem Leser die Grundlagen des Lehmbaus näherbringen. Es wird dabei auf die Historie, die Eigenschaften und die Anwendungen im Lehmbau eingegangen. Der traditionelle Stampflehmbau wird aufgrund seiner Bedeutung für den weiteren Verlauf der Arbeit in einem eigenen Unterkapitel beschrieben. Im Kapitel nachhaltige Stabilisierung werden die Additive für den praktischen Teil ausgewählt und ihre Eigenschaften beschrieben. Das Unterkapitel zirkuläres Bauen mit Lehm schließt das zweite Kapitel ab und soll die Notwendigkeit zirkulären Bauens in Zukunft unterstreichen. In Kapitel 3 wird zunächst der Unterschied zwischen dem traditionellen und dem modernen Lehmbau beschrieben. Anschließend werden die zwei additiven Fertigungsverfahren (Stampflehmbau, Lehm 3D-Druck) erklärt. Im Unterkapitel 3.2 wird der aktuelle Stand der Technik der wichtigsten Forscher- und Praxisgruppen dargestellt. Auf Grundlage dessen sowie der vorhergegangenen Recherchen und Expertisen von Fachexperten erfolgt anhand von Nutzwertanalysen die Entscheidung für ein additives Fertigungsverfahren sowie für eine Art der Fertigung. Der praktische Teil dieser Arbeit unterstützt die Entscheidung zur Auswahl eines Fertigungsverfahrens und wird im vierten Kapitel ausführlich dargestellt. Im fünften Kapitel wird schließlich ein ganzheitlicher Bauablauf für das ausgewählte Fertigungsverfahren geplant und ein technisches Konzept inkl. Zeichnungen erstellt. Das letzte Kapitel der Arbeit fasst nochmals die wesentlichen Aspekte zusammen und gibt mit weiteren Forschungsfragen einen Ausblick in die Zukunft. Nachstehend ist eine Übersicht des Aufbaus dargestellt.


Kapitel 1: Einführung
Zielsetzung, Aufbau, Forschungskonzept
Kapitel 2: Bauen mit Lehm
Historie, Grundlagen, Anwendungen, traditioneller Stampflehmbau,
nachhaltige Stabilisierung, Zirkuläres Bauen
Kapitel 3: Moderner Lehmbau
Kapitel 3.1:
Stand der Technik
Kapitel 3.2:
Vergleich additiver
Fertigungsverfahren
Kapitel 3.3:
Art der Fertigung
Kapitel 4: Praktischer Teil Lehm 3D-Druck
Analyse des Druckverhaltens, Herstellung der Prüfkörper,
Durchführung & Auswertung der Druckversuche
Kapitel 5: Bauablauf für eine on-site Stampflehmvorfertigung
Planung & Entwurf eines Bauablaufes
für eine automatisierte on-site Stampflehmvorfertigung
Kapitel 6: Schlussfolgerung
Resümee & Ausblick mit offenen Forschungsfragen

1.3 Forschungskonzept

Die Masterthesis soll der Skalierung des zirkulären industriellen Bauens mit Boden dienen und im Rahmen des nationalen Forschungsantrages der HTWG Konstanz an die Carl-Zeiß-Stiftung bearbeitet werden. Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt „ReBuild - Recyclable and Efficient Building with Urban/Industrial Landfill Material and Debris“ untersucht innovative Substratgemische aus verschiedenen Bodensorten (Sand, Schluff, Ton) und Kombinationen mit größeren Gesteinskörnungen aus Recyclingmaterialien zur Herstellung von Wandelementen im Hochbau. Das Forschungsprojekt hat das Ziel, die Bauweise mit den genannten Materialien so umzugestalten, dass sie als Massenproduktionstechnik skaliert und über eine digitale Urban-Mining-Plattform als standardisiertes Produkt in den Bauprozess integriert werden kann. Damit soll das Potential von automatisch aus dem Substratgemisch hergestellten Wandelementen als schnelle, wettbewerbsfähige, emissionsfreie und kreislauforientierte Bauweise im Vergleich zum traditionellen Mauerwerks- und Betonbau voll ausgeschöpft werden. Der Forschungsantrag an die Carl-Zeiss-Stiftung konzentriert sich auf deren Schwerpunktthema der Ressourcen-Effizienz. Die Masterthesis wird als Forschungsvorarbeit unter Betrachtung einzelner Forschungsfragen erstellt. Die Forschungsfragen sind untenstehend aufgelistet und beziehen sich vorwiegend auf Bauweisen mit Lehm und ggf. Additive ohne Recyclingmaterialien. Um die Fragen bestmöglich bearbeiten zu können und Interessenten für das Forschungsprojekt „ReBuild“ zu finden, werden Gespräche mit verschiedenen Fachexperten aus der Praxis und Wissenschaft geführt. Mit den Erkenntnissen aus Recherche und Experten-Befragungen wird eine technische Skizze für eine digitale, additive Bauweise mit Lehm entwickelt. Schließlich werden praktische Versuche mit einem Lehm 3D-Drucker durchgeführt und diese anschließend im Labor der Hochschule Konstanz auf deren Druckfestigkeiten geprüft und miteinander verglichen.

Die Masterthesis befasst sich mit den folgenden Fragen:

- Welche Lehmbautechniken im Stampflehmbau sowie im Lehm 3D-Druck sind Stand der Technik/State of the Art?
- Was sind die Herausforderungen und Schwierigkeiten der zirkulären additiven Fertigungsverfahren?
- Wie verhält sich Lehm mit und ohne Additive als Stabilisatoren in einem 3D-Drucker? Welche Druckfestigkeiten können erreicht werden?
- Wie kann ein mögliches Konzept für ein additives Fertigungsverfahren mit Lehm aussehen?

Im Rahmen der Masterthesis werden die folgenden methodischen Schritte umgesetzt:

- Literaturrecherche: Grundlagen & State of the Art
- Konzeptionelle Entwicklung eines Bauablaufes für ein additives Fertigungsverfahren mit Lehm inkl. Konzeptskizze
- Praktischer Teil: 3D-Druck mit Lehm an der HTWG inkl. Druckfestigkeitsprüfung
- Befragung von Fachexperten
    - Lehmbau:
        - [redacted], ERNE AG Laufenburg
    - Nachhaltige Additive für den Lehmbau
        - [redacted], BAM-Bundesanstalt für Materialforschung u. -prüfung Berlin
    - 3D-Druck:
        - [redacted], HTWG Konstanz-Open Innovation Lab (OIL)
    - Prüfung der Probekörper:
        - [redacted], HTWG Konstanz- öffentliche Baustoffprüfstelle
        - [redacted], HTWG Konstanz- öffentliche Baustoffprüfstelle
    - Maschinenbau Konstruktion & Automatisierung:
        - [redacted] HTWG Konstanz
        - [redacted] ERNE AG, Laufenburg

Bisher gibt es wenig Forschung zum modernen Lehmbau. Vorwiegend beruht diese auf qualitativer empirischer Forschung mit wenig vorhandenen Daten und Messungen. Nationale Forschungsprojekte in Deutschland, welche sich gezielt auf die automatisierte additive Fertigung von Lehmwänden konzentrieren sind bis auf das Projekt der TU Braunschweig nicht bekannt. Die TU Braunschweig legte ihren Fokus auf die robotergestützte Herstellung von Stampflehmwänden. Das Forschungsprojekt wurde 2021 abgeschlossen [7]. International, vor allem innerhalb Europa ist die Zahl der Forschungsprojekte in den letzten vier Jahren gestiegen [8]. Neben Frankreich, Spanien, Italien, Schweiz und Österreich, gab es Projekte zur digitalen additiven Fertigung in Australien und den USA. In der Praxis hat sich unter anderem der Österreicher Martin Rauch einen Namen gemacht, welcher seit Jahrzehnten mit seinem Unternehmen „Lehm Ton Erde Baukunst GmbH“ Einfamilienhäuser bis hin zu Fabrikhallen aus Stampflehm baut. Er veröffentlicht sein Wissen in Fachbüchern und lehrt unter anderem seit 2013 als Gastdozent an der ETH Zürich [9].

2 Bauen mit Lehm

2.1 Historie

Neben Naturstein und Holz gehörte vor allem Lehm zu den ersten Baustoffen der Menschheit. In Südwest-Asien setzte nach Überlieferungen die Sesshaftwerdung des Menschen zuerst ein, was erklärt, dass dort die ältesten Lehmbauwerke bzw. deren Reste gefunden wurden. Eines der ältesten Funde sind die Reste der Lehmsteinsiedlung Catal Höyük in Anatolien/Türkei und können bis etwa 6000 v. u. Z. zurückgeführt werden [3, S. 2]. Lehm ist ein nahezu weltweit verfügbarer Baustoff, daher findet man historische Lehmbaukulturen auf der ganzen Welt. Je nach vorherrschendem Klima und Vegetation haben sich verschiedene Lehmbauweisen entwickelt. In trocken-heißen Klimazonen überwiegen massive, tragende Lehmbaukonstruktionen. Diese schützen tagsüber vor intensiver Sonneneinstrahlung und geben in kalten Nächten die gespeicherte Wärme wieder ab. In kälteren Klimazonen nutzte man durch das reiche Holzvorkommen eine Kombination aus Holz und Lehm in Form einer Skelettkonstruktion, die sich später zu den noch heute bekannten Fachwerkhäusern weiterentwickelte. Das Holz hat dabei die lastabtragende Funktion und der Lehm als Ausfachung die raumumschließende Funktion. Eine der bekanntesten historischen Lehmbausiedlungen ist die unter dem Namen „Chigao der Wüste“ bekannte und zum UNESCO Weltkulturerbe ernannte Stadt Shibam im Jemen (Abbildung 1). Diesen Namen erhält die Siedlung durch ihre bis zu siebenstöckigen Gebäuden, die aus sonnengetrockneten Lehmsteinziegeln errichtet wurden. Die vor etwa 500 Jahren erbaute Wüstenstadt zeigt demonstrativ, dass mit Lehm sowohl dauerhafte als auch mehrstöckige Bauten möglich sind [10].

Innerhalb Europas war Holz in vielen Regionen eine reichlich vorhandene Ressource. Daher wurden viele Gebäude aus Kombinationen mit Holz und Lehm gebaut. In den Regionen mit niedrigem Holzvorkommen setzte man vor allem auf massive Stampflehm- oder Wellerlehmbauten mit Stroh. In Deutschland wurde Lehm als vorherrschender Baustoff gegen Ende des 19. Jahrhunderts durch industriell gefertigte Baustoffe verdrängt. Er erlangte lediglich nach den beiden Weltkriegen im letzten Jahrhundert nochmals vorübergehend, als gut verfügbarer Baustoff an Bedeutung. Bis heute gibt es noch 2 Millionen Gebäude in Deutschland, in denen Lehm verbaut wurde [11]. Eines davon ist das sechsstöckige aus Stampflehm errichtete Wohnhaus von 1830 in Weilburg an der Lahn (Abbildung 2) [12].

Abbildung 1: Wüstenstadt Shibam, Jemen [13]

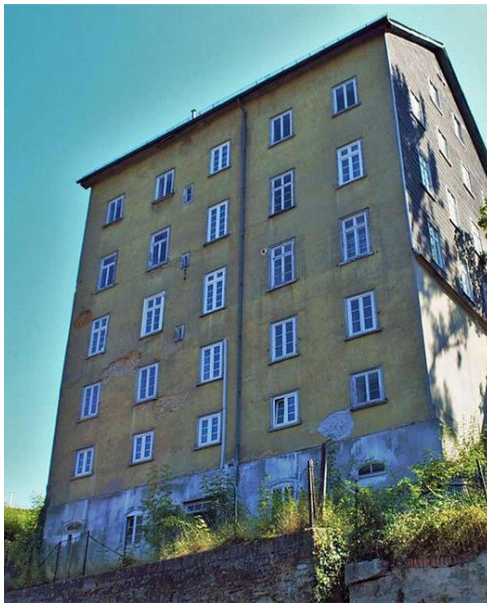


Abbildung 2: Stampflehmhaus Weilburg an der Lahn von 1830 [12]

Etwa ein Drittel der Weltbevölkerung lebt heute noch in Lehmbauten, diese befinden sich überwiegend in Schwellen- und Entwicklungsländern. Dort ist der Lehmbau bis heute eine weit verbreitete Bauweise. Der mit Armut assoziierten Lehmbauweise droht auch in Schwellen- und Entwicklungsländern der Rückgang. Durch das Aufzeigen von modernen Lehmbauten könnte dem Schwund in Zukunft entgegengewirkt werden. Der Architekt Paul Marais aus Südafrika sowie Martin Rauch aus Österreich zeigen mit ihren modernen Stampflehmbauten bereits wie dies für heiße als auch kalte Klimaregionen in Zukunft aussehen kann. Die folgende Abbildung stellt die von Paul Maraise gebaute Touristenunterkunft „Otto-Cottage“ in Botswana dar, welche sich durch die Art der Konzeption perfekt in die natürlichen Gegebenheiten einbettet.

Abbildung 3: Touristenunterkunft "Otto Cottage" von Paul Marais [14]

2.2 Grundlagen zum Baustoff Lehm

Lehm entsteht durch den Verwitterungsprozess fester Gesteine und kommt weltweit flächendeckend in den oberen Bodenschichten vor. Lehme lassen sich je nach Entstehung und Genese klassifizieren in Verwitterungslehm (Berg- oder Gehängelehm), bei welchem der Lehm am Ort seiner Verwitterung verbleibt oder in Lößlehm, Auelehm und Geschiebelehm, bei welchen der Lehm durch äußere Einflüsse wie Wasser, Wind oder Eis umgelagert worden ist. Lehmböden setzen sich aus unterschiedlichen Korngrößen wie Kies, Sand, Schluff und Ton zusammen. Dabei wirkt der Ton mit seinen Tonmineralen als Bindemittel zwischen den größeren Gesteinskörnungen [11, S. 3]. Nicht jeder Naturlehm eignet sich direkt aus dem Boden als Baustoff, je nach Zusammensetzung muss die Körnung angepasst werden, sodass man dann von einem Baulehm mit entsprechender Festigkeit sprechen kann. Wenn Baulehm direkt aus der Grube entnommen wird, ist zu beachten, dass dieser in ausreichender Tiefe ohne Humusanteil oder Wurzeln gewonnen wird [15, S. 4]. Anders als Beton härtet Lehm nicht chemisch aus, sondern erhält seine Festigkeit durch einen rein physikalischen Trocknungsprozess. Mit Wasser kann Lehm daher immer wieder in einen plastischen Zustand gebracht und neu geformt werden. Diese Eigenschaft bedeutet zugleich, dass freiliegende Lehmbauteile vor Witterung geschützt werden müssen bspw. durch einen Dachvorsprung oder Erosionsbremsen in Außenwänden.

Lehm wird besonders für seine Sorptionsfähigkeit geschätzt. Wasserdampf aus der Luft lagert sich an Porenwänden des Lehmbauteils ab. Bei Veränderungen des Innenraumklimas wie z.B. durch das Heizen wird der Wasserdampf zurück an die Raumluft abgegeben. Dadurch entsteht ein ausgeglichenes Raumklima, mit dem zusätzlichen Vorteil, dass unangenehme Gerüche und Schadstoffe aus der Luft entnommen werden. Zudem ist die Gefahr für Schimmelbildung bei normalen Nutzungsbedingungen und wenig organischen Bestandteilen im Lehm sehr gering. Massive Lehmbauteile wie z.B. Stampflehmwände besitzen eine hohe Wärmespeicherkapazität und Schalldämmungsvermögen. Massive Wände können daher kurzfristige Temperatur- und Feuchteschwankungen nahezu vollständig kompensieren. Außerdem ist Lehm nicht brennbar und erreicht hohe Feuerwiderstandsklassen [4, S. 140].

2.3 Anwendungen von Lehm im Bauwesen

Neben den additiven Verfahren des Lehmbaus, wie das Stampflehmverfahren oder das Extrusionsverfahren, auf welchen der Fokus dieser Arbeit liegt, sollen hier weitere Möglichkeiten und Potentiale des Lehmbaus aufgezeigt werden, die mit den additiven Verfahren kombiniert werden können.

Lehmbaustoffe lassen sich in drei verschiedene Kategorien unterteilen. Zum einen gibt es die *ungeformten Baustoffe* wie z.B. Lehmmörtel oder Leichtlehmaufbereitungen und die *geformten Baustoffe* wie z.B. Lehmsteine und Lehmplatten. Neben diesen unterscheidet man in *lastabtragende Lehmbaustoffe* und *Lehmbaustoffe ohne lastabtragende Funktion*. Zu den lastabtragenden Lehmbaustoffen gehören Lehmsteine oder Stampflehm mit ausreichenden Druckfestigkeiten. Zu den Lehmbaustoffen ohne lastabtragende Funktion zählen bspw. Ausfachungen aus Strohlehm oder Leichtlehm. In der dritten Kategorie wird zwischen *feucht und trocken eingebauten Baustoffen* unterschieden. Zu den feucht eingebauten Baustoffen zählen bspw. Wellerlehm oder Stampflehmfußböden. Diese werden vor Ort zum Bauteil geformt oder aufgetragen. Im Trockenbau werden unter anderem Lehmbauplatten als Bekleidung eingesetzt oder trockene Lehmsteine mit Mörtel vermauert. Baustoffe aus Lehm können in der Regel problemlos wiederverwendet werden, in dem sie mechanisch zerkleinert und mit Wasser aufbereitet werden. Eine Ausnahme gilt bei Belastungen durch bauschädliche Salze. [15]

Der Lehmbau bietet viele verschiedene Anwendungsarten, aus unterschiedlichen Mischungen mit und ohne Zuschlagstoffe. *Wellerlehm* wird beispielsweise aus einer Mischung mit Stroh und Lehm hergestellt. Dabei wird die feuchte Mischung ohne Schalung mit einer Gabel aufgeschichtet. Nach ausreichender Abtrocknung wird die Wand fluchtgerecht abgestochen. Auf diese Weise können tragende als auch nichttragende Wände errichtet werden. In *Ausfachungen* von Fachwerkwänden übernimmt der Lehm bis auf sein Eigengewicht und auf die Gebäudehülle wirkenden Windkräfte keine tragende Rolle. Fachwerkwände wirken nicht aussteifend. Die Ausfachungen können mit *Strohlehm, Leichtlehm oder Lehmsteinen* ausgefüllt werden. Wird der Lehm nass eingebaut muss er möglichst rasch trocknen können, damit angrenzende Holzbauteile oder organische Zuschläge nicht verrotten sowie Stahlbauteile nicht korrodieren.

Neben den Ausfachungen für Wände können auch *Balkendecken* mit Lehmbaustoffen wie Strohlehm oder Strohleichtlehm ausgefacht werden. Bei sogenannten Einschubdecken wird eine Schalung aus Holzbrettern oder Lehmtrockenbauplatten zwischen die Balken eingeschoben und anschließend mit Lehm-, Leichtlehm- oder Baulehmschüttungen befüllt. Die Lehmschüttungen können sowohl feucht als auch trocken verbaut werden und wirken

durch ihre Masse positiv auf Schall- und Trittschalldämmung. Leichtlehmmischungen werden vor allem in der obersten Geschossdecke als Wärmedämmung eingesetzt. Anders als Dämmmaterialien aus Hanf oder Zellulose ist die Leichtlehmmischung massiv und wird durch leichte Zuschlagstoffe wie Blähton, Blähglas, Stroh oder Holzhackschnitzel ergänzt. Dadurch kann sie Schall- und Wärmedämmung verbinden und wird daher auch an Außenwänden eingesetzt.

Lehmbauplatten werden üblicherweise als Strangpress-, Einzelpress-, Einstreichverfahren oder in einer Bandproduktion hergestellt. Das Ausgangsmaterial für die Platten bilden Lehm und ggf. Zuschlagstoffe wie Holzstäbe, Bambus oder Schilfrohr. Lehmbauplatten können im Trockenbau allgemein für Bekleidungen verwendet werden. Sie kommen als Innenwand-, Decken- oder Dachbekleidungen sowie bei schalldämmenden Vorsatzschalungen vor. Ihre Oberfläche kann anschließend mit einem Lehmputz gestaltet werden.

Mit Baulehm lassen sich ebenso *Stampflehmfußböden* herstellen. Für die Herstellung wird der Stampflehm ähnlich wie bei Stampflehmwänden schichtweise eingebracht und durch Stampfer oder Rüttler verdichtet. Vor dem Aufbringen der neuen Schicht muss die Schwindrissbildung der darunterliegenden Schicht abgeschlossen sein. Um die Rissbildung zu reduzieren, kann mit magerem Lehm gearbeitet oder Armierungsgewebe eingelegt werden. Ist der Stampflehm weitgehend getrocknet, kann zur Erhöhung der Abriebfestigkeit Öl oder Wachs auf die Oberfläche aufgetragen werden.

Lehmsteine werden im Handstrich-, Press-, oder Strangpressverfahren hergestellt und nicht gebrannt. Sie eignen sich je nach Druckfestigkeit für tragendes und nicht tragendes Mauerwerk. Ist das Mauerwerk der Witterung ausgesetzt, dürfen die Lehmsteine nur ein geringes Quellverhalten aufweisen. Die Stoß- und Lagerfugen werden mit einem ca. 1 cm starken *Lehmmörtel* vollflächig verfugt. Beim Mauern ist die Stampf- oder Pressrichtung in welcher die Steine hergestellt wurden zu beachten. Die Wandlast soll in die Stampf- oder Pressrichtung aufgebracht werden und die Steine müssen dementsprechend vermauert werden. [15] Die Anwendung von Lehmmauerwerk könnte schon bald an Attraktivität gewinnen. Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung in Berlin kurz BAM untersuchte in einem Projekt die mechanischen Eigenschaften und insbesondere die Tragfähigkeit von Lehmmauerwerk. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen fließen in eine neue DIN-Norm ein, die es erstmals ermöglicht Gebäude mit bis zu fünf Geschossen anstelle von herkömmlichen zwei Geschossen aus Lehmmauerwerk zu bauen. Die DIN-Norm soll im April 2023 veröffentlicht werden und damit Planungs- und Ingenieurbüros eine verlässliche Quelle zur Berechnung von Lehmmauerwerk bieten. [16]

Mit Lehm lassen sich alle üblichen Bauteile herstellen. Die folgende Tabelle des Dachverband Lehm e.V. gibt eine Übersicht über die Vielfalt von Lehmbaustoffen und ihre Anwendungsmöglichkeiten.

	Stampflehm	Wellerlehm	Strohlehm	Leichtlehm	Lehmschüttung	Lehmmörtel	Lehmsteine	Lehmplatten
	UNGEFORMTE LEHMBAUSTOFFE						GEFORMT	
Fußboden	○				○			
Wand tragend	○	○				○	○	
Wand nichttragend	○	○	○	○		○	○	○
Decken & Dach			○	○	○		○	○
Trockenbau							○	○
Putz			○	○		○		

Abbildung 4: Anwendungsmöglichkeiten von Lehmbaustoffen [11]

Eine neue Anwendungsmöglichkeit untersucht die ETH Zürich und die Hochschule Stuttgart. Durch eine Kombination aus Holz und Lehm sollen in einem robotergestützten Prozess sogenannten Kappendecken entstehen. Diese Decken bestehen aus Vollholzbalken zwischen denen Bögen aus Stampflehm gespannt werden. Die Bögen werden in einer Schalung zwischen den Holzbalken gestampft und anschließend umgedreht. Die Stampflehmbögen verkeilen zwischen den Holzbalken, sodass diese nicht herausfallen können. Das erste Projekt, in welchem die Konstruktion eingesetzt werden soll, ist das Projekt „Hortus“ in Basel, welches von ZPF Ingenieure und den Architekten Herzog und de Meuron geplant wird [17, 18]. Ein weiteres Pilotprojekt ist das Lehmlärmschutzwand Projekt der Deutschen Bundesstiftung für Umwelt in Kooperation mit der Technischen Hochschule Lübeck und Unterstützung der Firma Lehm Ton Erde Baukunst GmbH. Im Rahmen dieses Projektes wurde 2020 eine Demonstrationswand aus verdichtetem Wellerlehm erstellt, an der verschiedene Messungen durchgeführt wurden. Die Lehmlärmschutzwände sollen in Zukunft eine nachhaltige Lösung für Lärmschutzwände an deutschen Autobahnen darstellen [19].

2.4 Traditioneller Stampflehmbau

Die Tradition und Handwerkskunst des Lehmbaus sind stark gefährdet. Es gibt in unseren Breitengraden nur wenige Handwerker, welche das nötige Wissen und die Praxiserfahrung besitzen. Dennoch gibt es sie vereinzelt noch oder besser gesagt wieder. Dieses Kapitel fasst die Grundlagen zur traditionellen Stampflehmherstellung und den Eigenschaften des Stampflehms zusammen. Aus Stampflehm werden größtenteils Wände hergestellt, aber auch Stampflehmböden sind möglich. Um eine herkömmliche Stampflehmwand traditionell herzustellen, benötigt es die richtigen Ausgangsmaterialien. „Stampflehm gibt es nicht im Baumarkt zu kaufen.“ so Martin Rauch [9, S. 122]. Stampflehm muss selbst gemischt und aufbereitet werden, am besten aus dem eigenen lokalen Material. Aufgrund der weltweiten Lehmvorkommen ist dies nahezu in allen Regionen möglich. Je nach Lehmvorkommen können fehlende Zuschlagstoffe oder Bindemittel zur Stabilisierung hinzugegeben werden. Ein magerer bis fetter Berg- oder Gehängelehm mit einer weit gestuften Körnungslinie eignet sich am besten. Ist der Lehm zu fett, lässt er sich nur schwer zu einer homogenen Mischung verarbeiten und neigt beim Trocknen zu Schwindrissen. Dem kann durch Beimischen von gebrochenen Körnungen entgegengewirkt werden. Ist der Lehm zu mager, kann die Bindekraft durch Zugabe von Tonmehl erhöht werden. Maniatidis et al. empfehlen einen Ton- und Schluffanteil von 20-35 % und einen Sand- und Kiesanteil von 50-75 % [20]. Der erdfeuchte homogene Stampflehm wird herkömmlich an Ort und Stelle verbaut. Da Lehm im feuchten Zustand frostempfindlicher als hydraulisch gebundene Baustoffe ist, darf dieser nicht bei tiefen Temperaturen verbaut werden. Bei traditionellen Stampflehmwänden ergeben sich die Wandstärke mitunter durch die Art der Herstellung, da für den Verdichtungsprozess eine Person in der Schalung stehen muss, welche händisch mit einem manuellen oder pneumatischen Stampflehmhammer die Wand lagenweise verdichtet [9, S. 126]. Die Wände werden anders als beim Stahlbetonbau nicht geschosshoch erstellt, sondern in Segmente eingeteilt. Mehrere Segmente bilden einen Wandabschnitt. Am Ende eines Geschosses wird ein bewehrter Ringanker ringsherum auf den Wänden betoniert. Der Ringanker sorgt dafür, dass die horizontalen Kräfte in die Wände eingeleitet werden können [9]. Nach dem Erstellen eines Segmentes muss die Stampflehmwand ausgeschalt werden, damit das Bauteil gleichmäßig trocknen kann. Das Bauteil ist während des Trocknens vor Regen und intensiver Sonneneinstrahlung zu schützen. Erst durch das Trocknen bekommt die Stampflehmwand ihre endgültige Festigkeit. Für die Weiterverarbeitung der Bauteile ist es ausreichend, wenn diese weitgehend trocken sind, sodass Setzungen und Schwindungen nahezu gänzlich abgeschlossen sind. Die Bauteile sind trocken, wenn sie die Ausgleichsfeuchte erreichen bzw. keine merklichen Gewichtsveränderungen festgestellt werden können [15]. Neben der Herstellung von ganzen Bauteilen lassen sich mit Stampflehm einzelne Lehmsteine durch

Stampfen oder Pressen herstellen. Lehm ist wasserlöslich und daher entsteht über die Jahre eine natürliche Erosion der Oberflächen. Die feinen Partikel werden durch Regen ausgespült, wodurch die größeren Gesteinskörnungen an die Oberfläche treten. Die Erosion wird durch die härteren größeren Gesteinskörnungen verlangsamt. Zudem quellen die zurückliegenden feinen Lehmschichten zwischen den groben Steinen auf und verhindern so, dass das Wasser tiefer in die Wand eintritt. Komplett gestoppt werden kann die Erosion nicht, durch horizontale Erosionsbremsen aus härterem Material wie bspw. Trasskalkmörtel lässt sich jedoch die Fließgeschwindigkeit des Wassers verlangsamen und man verhindert somit einen größeren Lehmabtrag [9]. Zudem sind Stampflehmwände vor Bodenfeuchtigkeit und Spritzwasser zu schützen und müssen daher auf einem mindestens 5 cm hohen wasserfesten Sockel erstellt werden [15]. Bei sachgemäßem Feuchteschutz und guter Bauunterhaltung, beweisen Jahrhunderte alte Gebäude (siehe Kapitel 2.1) eine gute Beständigkeit von Stampflehmbauwerken.

Die Anzahl von neuen Stampflehmgebäuden ist trotz des steigenden Interesses von Bauherren und Architekten gering. Das liegt zum einen an der traditionellen zeitintensiven Herstellung und zum anderen an der fehlenden Standardisierung für den Baustoff. Eine aktuelle Norm zu Materialeigenschaften und Bemessungsverfahren von tragenden Stampflehmwände gibt es nicht. Zur Bemessung werden aktuell die Lehmbau Regeln des Dachverband Lehm e.V. herangezogen, welche das Konzept eines globalen Sicherheitsbeiwertes verfolgen. Der Stampflehmbau beinhaltet große Reserven, die durch den ungenauen, empirischen Ansatz des Bemessungsverfahrens nicht genutzt werden können und somit zu einer Überdimensionierung der Bauteile und einer unwirtschaftlichen Berechnung führen. Zudem ist für Gebäude über zwei Geschosse und zwei Wohneinheiten sowie mit der Verwendung von stabilisiertem Lehm eine Zustimmung im Einzelfall einzuholen [15]. In der folgenden Tabelle sind die wesentlichen Eigenschaften von Stampflehmwänden nochmals aufgezählt.

Eigenschaften	Kennwerte
Kurzbezeichnung Stampflehm	STL
Naturlehmart	idealerweise Berg-oder Gehängelehm
übliche Schichthöhen (verdichtet)	10 bis 15 cm
Mindestwanddicke für Außenwände	32,5 cm
Mindestwanddicke für Innenwände	24 cm
Trockenrohdichte	1700-2400 kg/m^3
Kornzusammensetzung	Ton und Schluff: 20-35 % Sand und Kies: 50-75 %
Druckfestigkeit mit mineralischem Zuschlag	3 bis 5 N/mm^2
Druckfestigkeit mit Faserzuschlag	2 bis 3 N/mm^2

Biegezugfestigkeit (Mindestkennwert)	0,52 N/mm^2
Scherfestigkeit (Mindestkennwert)	0,62 N/mm^2
Schwindmaß	< 2 %, bei Sichtbauteilen < 0,5 %
Kriechmaß	0,20%
Wärmedehnung	0,005 mm/mK
Wärmeleitfähigkeit je nach Material	0,64-0,93 W/mK
Richtwert der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ	5/10, diffusionsoffen
Feuerwiderstandsklasse von Stampflehmwänden ≥ 24 cm	F 90 A (nicht brennbar)
Winddichtigkeit	winddicht ab 900 kg/m^3

Tabelle 1: Eigenschaften und Kennwerte von Stampflehmwänden [9, 15, 20]

2.5 Nachhaltige Stabilisierung

Das Ziel der Stabilisierung von Lehmbaustoffen ist die Verbesserung der Druck- und Biegezugfestigkeiten sowie der Witterungsbeständigkeit. Durch den Einsatz von Additiven soll der Lehmbau vergleichbar mit anderen industriellen Baustoffen wie Beton oder Ziegel gemacht werden. Additive sind Zusatzstoffe oder -mittel, die einem Produkt hinzugegeben werden, um diesem bestimmte Eigenschaften zu verleihen oder unerwünschte Eigenschaften abzuschwächen [21]. Wie in der Einführung bereits erwähnt, werden hier nur nachhaltige Additive zur Stabilisierung betrachtet, die am Ende ihrer Nutzungsdauer nicht von der Erde separiert werden müssen, sondern wieder in den Ressourcenkreislauf zurückgeführt werden können. Die Additive sollen nach regionalen Gegebenheiten ausgewählt werden. Im Folgenden werden daher mögliche Additive für Lehmbauten in Deutschland/Europa aufgezählt. Außerdem sollen durch den Einsatz von Additiven die positiven Eigenschaften des Lehmbaus erhalten bleiben und die Offenporigkeit nach wie vor gegeben sein. Es gibt viele verschiedene Additive, die dem Lehm hinzugefügt werden können, um verschiedene Eigenschaften wie z.B. thermische, abrasive oder statische Verbesserungen zu erreichen. Hier werden vorwiegend Additive betrachtet, die positive Auswirkungen auf die Stabilität und Haltbarkeit von Lehmbauteilen haben. Bisher wird vor allem Zement zur Stabilisierung eingesetzt. Dies verbessert einerseits neben der Druck- und Biegezugfestigkeit vor allem die Wasserwiderstandsfestigkeit, andererseits mindert es die Diffusionsoffenheit. Aufgrund der hohen grauen Energie des Zements wird der Nachhaltigkeitsaspekt des Lehmbaus zunichte gemacht. Daher sollte er in Zukunft nicht mehr im Lehm zum Einsatz kommen. Alternative Lösungen, die bereits schon im traditionellen Lehmbau eingesetzt wurden, sind bspw. Fasern aus Stroh, Hanf oder Holz sowie Knochenleim, Molke oder Leinöl [22]. Generell lassen sich die Additive in Zusatzstoffe und Zusatzmittel einteilen. Von Zusatzstoffen spricht man bei einer physikalischen Stabilisierung oder Verdichtung. Hierzu zählen sowohl mineralische als auch organische Stoffe. Vor allem Fasern werden zur physikalischen Stabilisierung eingesetzt und verbessern besonders die Zugfestigkeit sowie die Stabilität gegenüber Erosion und reduzieren zudem das Schwindmaß [3, S. 171]. Zusatzmittel wirken als chemische Stabilisierung und werden ebenfalls in mineralisch und organisch unterteilt. Mineralische Zusatzmittel, wie Tonmehl, werden auch als Bindemittel bezeichnet. Durch die Verwendung von Zusatzmitteln wird die chemische Struktur der Tonminerale im Lehm verändert, was dazu führt, dass unerwünschte Eigenschaften wie Schwinden und Quellen reduziert werden können. Zusätzlich erhöhen diese Mittel die Druck- und Abriebfestigkeit sowie die Witterungsbeständigkeit der Bauteile aus Lehm [3, S. 172]. In den nachstehenden Kapiteln werden, die für den Lehm 3D-Druck verwendeten Additive genauer beschrieben.

Die folgenden zwei Abbildungen geben eine Übersicht über verschiedene Zusatzstoffe und Zusatzmittel.

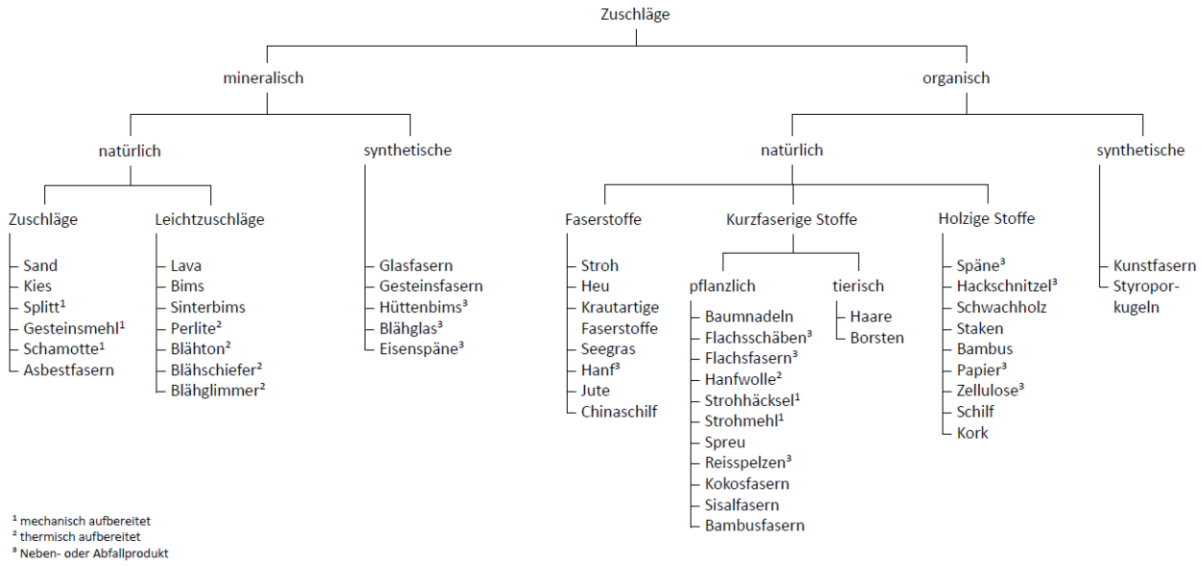


Abbildung 5: Übersicht Zusatzstoffe [23]

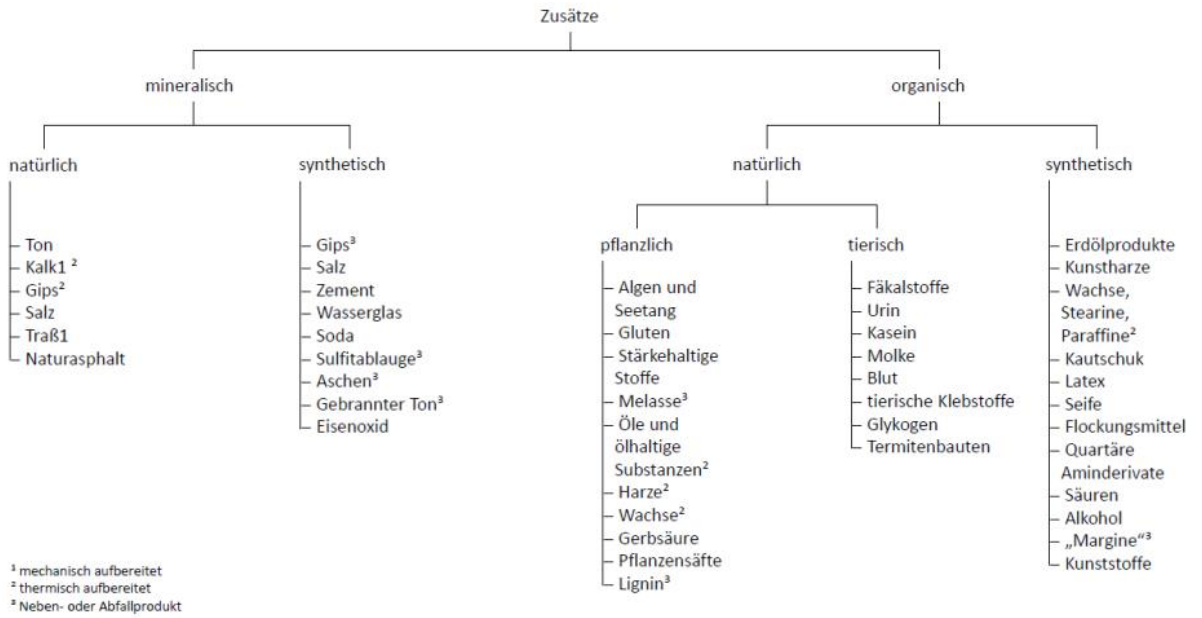


Abbildung 6: Übersicht Zusatzmittel [23]

2.5.1 Kasein

Kasein ist einer der stärksten Naturkleber und wird seit Jahrtausenden für verschiedenste Anwendungen z.B. in Lebensmitteln oder Anstrichen genutzt. Das Kasein ist ein Milchprotein, das in Milch und Milchprodukten wie Molke, Quark oder Käse vorkommt. Jährlich fallen 18,1 % der Milch aufgrund von Frischeproblemen oder unzureichender Lagerung und Logistik als Abfall an [24]. Derzeit wird die Abfallmilch in großen Mengen auf Deponien entsorgt. Das organische Zusatzmittel erhöht die Bindekraft des Lehms. Durch seine Dampfdiffusionsoffenheit bleiben die wesentlichen Eigenschaften des Lehms erhalten [9]. Kasein wird in Pulverform mit Wasser und Alkalien angerührt. Früher wurde direkt die Molke verwendet. Getrocknet, in Pulverform ist Kasein wasserunlöslich. Erst mit der Zugabe von Alkalien z.B. durch Soda/ Natriumcarbonat (Na2Co3) oder Weißkalkhydrat/Calciumhydroxid (Ca(OH)2) wird das Kasein aufgeschlossen [25]. Bei diesem Vorgang wird Kohlenstoffdioxid freigesetzt [26].Das Kasein wird durch die Zugabe von Alkalien schließlich wasserlöslich und kann als Zusatzmittel eingesetzt werden. Durch den Einsatz des Zusatzmittels ist es möglich, höhere Druck- und Biegezugfestigkeiten zu erreichen. Kasein ist aber vor allem für seine Erhöhung der Oberflächenhärte und die damit verbundene Wasserbeständigkeit bekannt. Für massive Bauteile eignet sich Kasein nur bedingt. Kann die Feuchtigkeit im Lehm-Kasein-Bauteil nur sehr langsam entweichen, entstehen Schimmelpilze, welche die Stabilität des Bauteiles beeinträchtigen können. Diese Aussage wird im praktischen Teil dieser Arbeit (Kapitel 4.5) bestätigt. Kasein, als proteinartiges Biopolymer macht einen Anteil von 0,024 % der Milch aus. Das entspricht 0,024 kg auf 1kg Milch. Für die Anwendung im Lehm werden nur wenige Prozent benötigt (i.d.R. ≤ 5 %), trotzdem sind die Kosten im Verhältnis zu anderen Additiven mit 55,54 €/kg (ohne Mengenrabatt) hoch [25]. Zum Vergleich kosten konventionelle Bindemittel wie z.B. Weissfeinkalk 0,71 €/kg und erzielen ähnliche Eigenschaften wie Kasein [27]. Durch die Schaffung eines Marktes für die Abfallmilch könnten die Kosten möglicherweise gesenkt werden und als wirtschaftliches Zusatzmittel im Lehmbau Anwendung finden. Wissenschaftliche Untersuchungen der Universität of New South Wales, Australien zeigen, dass sich Druckfestigkeiten von 5 %igen Kasein-Lehmböden um ein vierfaches vergrößern lassen und damit vergleichbar mit anderen Biopolymerstabilisationen sind. Die Besonderheit von Kasein liegt bei den Untersuchungen von nassen Proben. Diese erreichen ca. 15 % ihrer Trockendruckfestigkeit, wohingegen andere Biopolymere sich im Bereich zwischen 0 % - 1,8 % bewegen [24]. Diese Untersuchungen bestätigen eine gute Witterungsbeständigkeit von Lehm-Kasein Bauteilen. Die Druckfestigkeiten der 3D gedruckten Prüfkörper werden in Kapitel 4.7 dargestellt.

2.5.2 Zellulose- /Holzfasern

Zellulose bzw. Holzfasern zählen zu den organischen Zusatzstoffen (Polysaccharide Biopolymere) und sind biologisch abbaubar. Dies ist vorteilhaft für eine Rückführung in die Natur [24]. Zellulose wird in der Regel durch Recyceln von Zeitungspapier gewonnen. Dabei wird das aussortierte Zeitungspapier im Schredder vorzerkleinert und anschließend in einer Wirbelstrommühle bis auf die Faserstruktur zerkleinert [28]. Holzfasern stammen hingegen aus Abfällen der holzverarbeitenden Industrie. Dafür werden die Abfälle in Form von Hackschnitzel und Spänen durch dämpfen, kochen und mechanisches Aufschließen in Einzelfasern zerlegt [29]. Die Zellulose bzw. Holzfasern erhöhen sowohl Druck- als auch die Biegezugfestigkeit der Lehmbauteile und verringern das Schwinden. Bei einem zu hohen Faseranteil im Lehm wirken diese unvorteilhaft auf die Bindekräfte sowie Druckfestigkeiten und können diese reduzieren [22, S. 37]. Eine Kombination mit einem Zusatzmittel wie Kasein könnte eine Möglichkeit sein, diesen Nachteil auszugleichen. Zu beachten ist außerdem, dass die Lehmbauteile zügig trocknen können, sodass es zu keiner Verrottung der organischen Zusatzstoffe und Bildung von Pilzen und Sporen im Lehm kommt. Dies hätte einen Stabilitätsverlust der Lehmbauteile zur Folge. Für die Verwendung von Fasern im Extrusionsverfahren empfiehlt es sich, prinzipiell auf kürzere Zellulose- oder Holzfasern zurückzugreifen, um die Fließfähigkeit des Materials beizubehalten und die Düse nicht zu verstopfen. Dies zeigen ebenso die Versuche mit dem 3D-Drucker in Kapitel 4.7. In der Praxis wird mit großer Wahrscheinlichkeit der Einsatz von Fließmittel zum problemlosen Extrudieren unverzichtbar sein. Die längeren Holzfasern eignen sich für den Einsatz in Stampflehmbauteilen. Zellulosefasern sind im Baustoffhandel bereits ab 1,53 €/kg erhältlich und damit im Verhältnis zu anderen Additiven preiswert.

2.6 Zirkuläres Bauen mit Lehm

Zirkularität konzentriert sich auf den Kreislauf und die Schonung natürlicher Ressourcen. Ein Bauteil ist vollkommen zirkulär, wenn kein Abfall im gesamten Lebenszyklus entsteht [30]. Das bedeutet, dass man sich schon während der Planung Gedanken zur Verwertung nach der Nutzungsphase machen muss. Die Gewinnung des Baustoffes sowie die Nutzung und die Rückführung wiederverwertbarer langlebiger Baustoffe müssen in einer gesamtheitlichen Betrachtung der Kreislaufwirtschaft mitberücksichtigt werden. Eine alleinige Reduzierung des Abfalles ist nicht ausreichend, Baukonstruktionen müssen neu gedacht werden, sodass Baustoffe erst gar nicht als Abfall bezeichnet werden, sondern eine erneute Wertschöpfung aus den bereits verbauten Materialien entsteht [31]. Lehm besitzt durch seine Wasserlöslichkeit die einfachste Art zur Aufbereitung und Wiederverwendbarkeit. Durch

mechanisches Zerkleinern und durch Zugabe von Wasser können Lehmbauteile umgeformt und wiederverwendet werden. Voraussetzung hierfür ist die Reinheit des Lehmbaustoffes und die ausschließliche Verwendung von biologisch abbaubaren, mineralischen oder separierbaren Zusätzen. In der folgenden Abbildung wird der zirkuläre Stoffkreislauf von Lehmbaustoffen dargestellt. Die Materialgewinnung erfolgt umweltschonend aus der eigenen Baugrube. Der Rohlehm wird durch sieben und mischen unter Wasserzugabe aufbereitet. Anschließend entsteht aus dem Baulehm ein Bauteil, welches möglichst lange bis zum Ende der Nutzungsphase verwendet wird. Nach dem Lebendsende des Bauteils wird dieses abgerissen oder rückgebaut und entweder in die Natur rückgeführt oder als Recyclinglehm wiederverwertet.

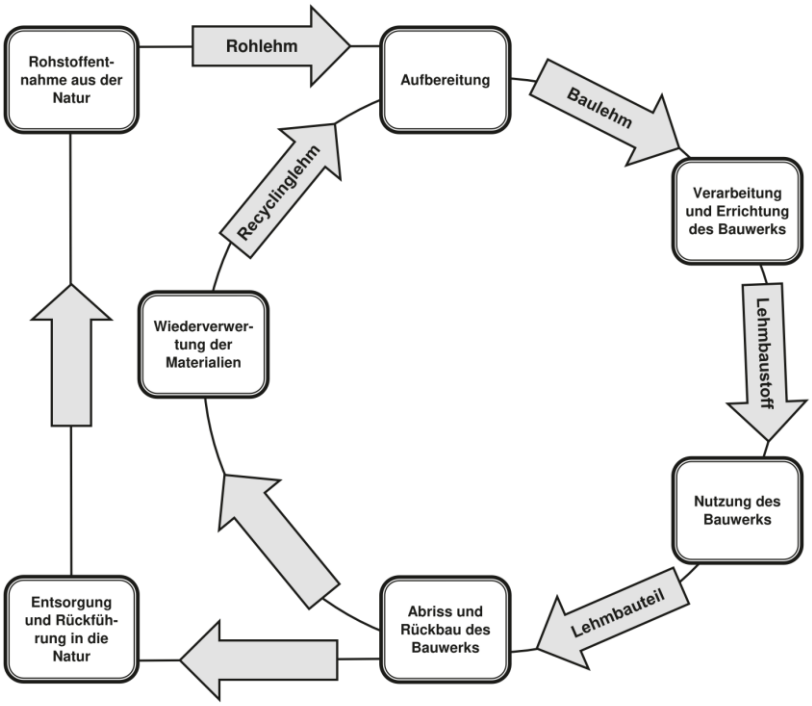


Abbildung 7: Stoffkreislauf von Lehmbaustoffen [4]

Neben der Rohstoffentnahme aus der Natur gewinnt die Stadt als anthropogenes Lager zunehmend an Bedeutung. Jährlich wächst das vom Menschen gemachte städtische Lager in Deutschland um 10 Tonnen pro Einwohner [31]. Ein ganzheitlich proaktiver Ansatz, um dieses Ressourcenlager zu nutzen, bietet die Idee des Urban Mining. Das Umweltbundesamt definiert Urban Mining als „die integrale Bewirtschaftung des anthropogenen Lagers mit dem Ziel, aus langlebigen Gütern sowie Ablagerungen Sekundärrohstoffe zu gewinnen“ [31]. Um mit sekundären Rohstoffen bauen zu können, müssen diese erstmals lokalisiert werden. Das ist der erste Schritt der Urban Mining Strategie und wird als Prospektion bezeichnet. Als zweiter Schritt folgt die Exploration also die Erkundung der vorhandenen Baustoffe auf bspw. Menge, Art, Qualität und Schadstoffbelastung. Darauf folgt die Erschließung der Lagerstätte

und die Gewinnung der Materialien. Zuletzt müssen die Materialien zur weiteren Verwendung aufbereitet werden.

Abbildung 8: Ablauf Urban Mining [32]

Im Bereich des Lehmbaus kommt der Sonderform des Urban Minings, dem sogenannten Landfill Mining, eine besondere Bedeutung zu. Das Landfill Mining bezeichnet die Gewinnung von Wertstoffen aus Deponien [31]. Um sekundäre Rohstoffe aus bereits verbauten Bauteilen oder aus Erddeponien zu gewinnen muss zuerst eine Wissenbasis in Form von digitalen Katastern und Gebäudepässen aufgebaut werden. Es gibt schon erste Datenplattformen und Pilotprojekte wie z.B. Madaster [33] , BAMB-Building As Material Banks [34] oder EPEA [35] die dies umgesetzt haben. EPEA GmbH ist Teil der Bauberatungsfirma Drees und Sommer und ermöglicht es noch in der Design-Phase Gebäudepässe für Neubauten oder Bestandsgebäude zu erstellen. Durch die Erstellung eines Gebäudepasses werden Art, Menge, Ort und Zeitpunkt der verfügbaren Materialien festgehalten und den Akteuren zur Verfügung gestellt. Die folgende Abbildung zeigt zwei Auszüge aus einem beispielhaften konventionellen Projekt von Drees und Sommer. Aus der Eingabe von Datensätzen wird links im Bild eine Übersichtsgrafik zur Materialherkunft (sekundär, erneuerbar, primär) der verbauten Materialien dargestellt und rechts im Bild ist eine Übersicht des Potenzials zur weiteren Materialverwertung gegeben.

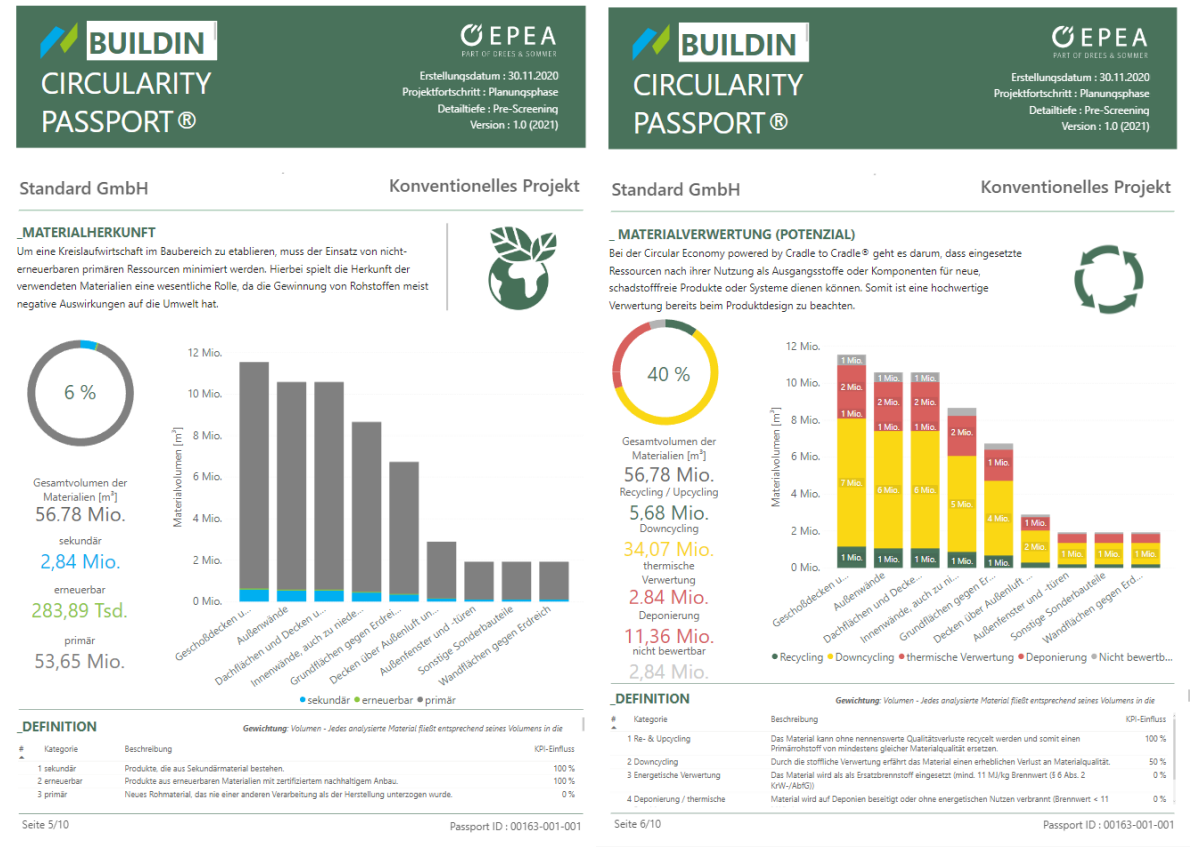


Abbildung 9: EPEA Gebäudepass (Drees & Sommer)

Durch die Erstellung eines Gebäudepass in der Entwurfsphase soll das Bewusstsein der Umweltauswirkungen verschiedener Materialien und Materialkombinationen gestärkt werden. Die Baumaterialien sollen anhand des Gesamtenergieverbrauches und deren Auswirkung auf die Erderwärmung ausgewählt werden. Hierbei ist der gesamte Lebenszyklus zu berücksichtigen, von der Materialgewinnung über die Aufbereitung, den Transport und die Herstellung bis zum Abbruch und der Abfallbehandlung. Auch die Wiederverwertbarkeit bzw. das Recyclingpotential ist mit einzubeziehen. Während das Bauen mit Beton, nach Ökobilanzierung des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesens (BMWSB), ein Gesamterderwärmungspotential von 197 kg CO_2 / m^3 aufweist, sind es bei Stampflehm hingegen nur 21 kg CO_2 / m^3 [36, 37]. Das entspricht einem CO_2-Einsparpotential von fast 90 %. Dies liegt vor allem am hohen Primärenergiebedarf bei der Zementherstellung beziehungsweise an einem sehr niedrigen Primärenergiebedarf bei der Stampflehmherstellung.

Bauökologisch und baubiologisch besitzen Lehmbauwerke die besten Voraussetzungen für nachhaltiges Bauen. Sie sind gesundheitlich unbedenklicher und sorgen für ein gutes Raumklima. Durch die Automatisierung der Lehmbauweise werden zudem die soziale und ökonomische Nachhaltigkeit gestärkt. Die schwere körperliche Arbeit kann durch Roboter oder Maschinen ersetzt werden und durch die gleichzeitig höhere Produktivität kann der Ertrag gesteigert werden. Die zirkuläre Lehmbauweise bietet großes Potential auf dem Weg zu einer klimaneutralen Baubranche.

3 Moderner Lehmbau

Der moderne Lehmbau unterscheidet sich in mehreren Faktoren vom traditionellen Lehmbau. Hall et al. haben die verschiedenen Faktoren aufgezeigt, die Teil eines modernen Bauprozesses sind [38]. Damit ein Bauprozess als modern gilt, muss mindestens einer der folgenden Faktoren erfüllt werden. Als erstes ist hier die Nutzung neuer technologischer Fortschritte bei Werkzeugen und Maschinen im Bauprozess zu nennen, um ein hohes Maß an Qualität, Detaillierung, Genauigkeit, Verarbeitung und Reproduzierbarkeit zu erreichen. Als zweites Kriterium soll der Bauprozess den modernen Bauvorschriften für strukturelle, thermische und ökologische Leistungen entsprechen. Außerdem zeichnet sich ein moderner Lehmbau durch die Erfüllung zeitgemäßer Erwartungen und Bedürfnisse der Bewohner:innen in Bezug auf Design, Komfort und Wohlbefinden aus.

Einer der ersten großen technologischen Fortschritte im Stampflehmbau stellte der Wechsel von manuellen Handstampfern zu Druckluftstampfern oder Vibrationsplatten dar. Durch diese können die Arbeitskräfte von der schweren körperlichen Arbeit entlastet und die Produktivität und Qualität der Bauteile gesteigert werden. Die Herstellung der Bauteile erfolgt jedoch noch aktiv durch den Menschen. In den letzten zehn Jahren erlebte die Bauindustrie einen großen Anstieg digitalisierter und automatisierter Fertigungstechniken. Vor allem in den vergangenen vier Jahren ist die Zahl der Forschungsprojekte im Lehmbau gestiegen, die sich mit den Potentialen des modernen, industriellen Lehmbaus auseinandersetzen [8]. Die Forschungsprojekte beziehen sich auf die additive Fertigung von Lehmbauten insbesondere fand der 3D-Druck große Aufmerksamkeit, der für Genauigkeit und gute Reproduzierbarkeit steht. Es gibt bereits auch erste Forschungsprojekte zum Stampflehmbau (siehe Kapitel 3.2.1). Trotzdem ist die Zahl der in der Praxis umgesetzten Projekten gering und bedarf weiterer Forschung [8]. Durch Digitalisierung und Automatisierung kann der moderne Lehmbau hin zu einer Massenproduktionstechnik skaliert werden, wodurch die Reproduzierbarkeit und Qualität steigt und die Produktionszeit sowie die Kosten gesenkt werden können. Hierdurch ist es möglich, den modernen Lehmbau erschwinglicher und wettbewerbsfähiger gegenüber konventionellen Bauweisen wie dem Holzbau oder Betonbau zu machen. Aufgrund der Automatisierung und Digitalisierung des Bauprozesses entstehen zudem neue Anforderungen und Aufgaben an die Fachkräfte, die in ihren neuen Aufgabenbereichen geschult werden müssen.

Der moderne Lehmbau als aktuelle Nischenbranche gewinnt bereits schon jetzt an ökonomischer Dynamik und wird voraussichtlich durch die aktuellen Klimaziele und neuen technologischen Fortschritte in den nächsten Jahren weiter an wirtschaftlichem Aufschwung gewinnen.

3.1 Additive Fertigungsverfahren mit Lehm

Additive Fertigungsverfahren sind gekennzeichnet durch einen schichtweisen Aufbau von Bauteilen anhand von BIM-Modellen und numerisch gesteuerten Anlagen. Durch abgestimmte Positionierung in drei Achsen und lokalem Verfestigen von Material entstehen schichtweise Bauteile. Die additive Fertigung mit Lehm soll die industrielle Fertigung von Lehmbauten ermöglichen und somit einen neuen konkurrenzfähigen Markt für den modernen Lehmbau schaffen [39, S. 1]. Hierfür stehen die industrielle Fertigung der traditionellen Stampflehmbauweise und der 3D-Druck, der in den letzten Jahren stark an Aufmerksamkeit gewonnen hat zur Auswahl. Die zwei Verfahren unterscheiden sich im Wesentlichen aufgrund ihrer unterschiedlichen Materialkonsistenz und die damit verbundene unterschiedliche Art der Materialzufuhr. Die Konsistenz des Materials beim 3D-Druckverfahren ist flüssiger und pastöser und wird über eine Pumpe gefördert und anschließend durch eine Düse extrudiert. Die Oberfläche der gedruckten Bauteile ist geprägt durch ihre erkennbaren gewölbten Bahnlinien. Beim automatisierten Stampflehmbau wird grobkörnigeres, erdfeuchtes Material mit einem geringeren Tonanteil in eine Schalung/Gleitschalung eingebracht. Das Material kann aufgrund seiner Konsistenz nicht extrudiert werden, sondern muss wie Schüttgüter eingefüllt werden. Die Verdichtung erfolgt mechanisch durch Stampfer, Walzen oder Rüttler. Beim 3D-Druck hingegen ist eine mechanische Verdichtung aufgrund der Konsistenz des Materials nicht möglich. Die 3D gedruckten Bauteile erhalten ihre Festigkeit erst über den Trocknungsprozess. In Abhängigkeit der Grünstandfestigkeit (Standfestigkeit unmittelbar nach dem Austreten aus der Düse [40]) der 3D-Drucklinien können komplexe Geometrien mit Überhängen erstellt werden. Stampflehmbauteile sind durch die Notwendigkeit der Schalung, im Bereich der Verdichtung, in ihrer Geometrie eingeschränkt.

3.2 Stand der Technik

Mit dem „Stand der Technik“ oder im englischen Sprachraum „State of the art“ werden die technischen Möglichkeiten zum jetzigen Zeitpunkt zusammengefasst, welche auf wissenschaftlichen und technischen Erkenntnissen beruhen [41]. In diesem Kapitel wird eine Übersicht der aktuell bekannten Referenzprojekte zum Thema additive Fertigungsverfahren für Lehmwände gegeben. Das Thema beinhaltet im wesentlichen Arbeiten von Forschungsgruppen und Praxisgruppen aus den Bereichen des modernen digitalen Stampflehmbaus und des 3D-Druckverfahrens/Extrusionsverfahrens. Einzelne Projekte, die dieser Arbeit am nächsten stehen und von denen wertvolle Erkenntnisse für das technische Konzept gewonnen werden können, werden in den nächsten beiden Kapiteln genauer beschrieben.

bedeutende Referenzprojekte zum Thema ***digitale, additive Fertigungsverfahren von Stampflehmwänden***		
Organisation/Forschungsgruppen	Ort	Beschreibung/Projekte
ERNE AG	Laufenburg, Schweiz	Robotergestütze Vorfertigung von Stampflehmelementen im Werk
Formearth	Sydney, Australien	Entwicklung einer Maschine für die Stampflehmfertigung am Bauwerk, in-situ
Lehm Ton Erde Baukunst GmbH	Schlins, Vorarlberg, Österreich	Design und Konstruktion mit Stampflehm; teilautomatisierte Vorfertigung im Werk von zugeschnittenen Stampflehmelementen
TU Braunschweig	Braunschweig, Deutschland	Robotergestütze Fertigung von Stampflehmkomponenten (in-situ)

Tabelle 2: Übersicht zu bedeutenden Referenzprojekten zum Thema digitale, additive Fertigungsverfahren von Stampflehmwänden

bedeutende Referenzprojekte zum Thema ***3D-Druckverfahren/Extrusionsverfahren*** von Lehmwänden		
Organisation	Ort	Beschreibung/Projekte
Berkeley University of California	Kalifornien, USA	Architektur mit Erde, Innovatives 3D-Drucken in der Architektur anhand von großskalierten Prototypen
IAAC – Institute for Advanced Architecture of Catalonia	Barcelona, Spanien	Living Prototypen, Industriepartner: WASP Srl Prototyp eines Gebäudes (Tova 2022) aus stabilisierter Erde und digitaler Fabrikation
IRDL Research Institute, University Bretagne Sud, INSA-Institut national des sciences appliquées de Rennes	Lorient u. Rennes, Frankreich	robotische Fabrikation von Erdstrukturen im Labormaßstab mit dem Biopolymer Alginat zur Verbesserung der Grünstandfestigkeit
RMIT University, Melbourne University of Adelaide, University of Cardiff, University of Plymouth	Melbourne & Adelaide, Australien Cardiff & Plymounth, Großbritannien	Robotergestützes 3D-Drucken von Lehmbauteilen (Wellerlehm)
WASP Srl	Massa Lombarda, Italien	Herstellung 3D Drucker für unterschiedliche Materialien wie Lehm u. Ton, Herstellung gedruckter "Tiny Houses", Möbel, Kunst bisherige Projekte: Gaia 2018, Tecla 2019, Living Prototypes 2022

Tabelle 3: Übersicht zu bedeutenden Referenzprojekten zum Thema 3D-Druckverfahren/Extrusionsverfahren von Lehmwänden

Die meisten der in den Tabellen aufgelisteten aktuellen Forschungsprojekte kommen aus Europa. Dies stellt Gomaa et al. ebenso in seiner Kartierung der DMEC Projekten (Digital Manufacturing for Earth Construction) dar [8]. Die Karte beinhaltet alle gemeldeten Forschungsprojekte aus dem Bereich der digitalen additiven Fertigung zwischen 2011 und 2021. Die orangen markierten Flächen zeigen die Regionen mit traditionellen Lehmbauweisen auf. Durch diese Gegenüberstellung wird deutlich, dass Regionen mit historischer Lehmbaufülle noch hinterherhinken. Oftmals sind dies Schwellen- und Entwicklungsländer, die aktuell nach westlicher Beton- oder Stahlbauweise streben und häufig Lehm mit Armut gleichsetzen. Mit Einbeziehung dieser Länder könnte in Zukunft weiteres wertvolles Wissen gesammelt werden, dass in Europa verloren gegangen ist. Durch technischen Fortschritt und das Aufzeigen moderner Lehmbauten könnte Lehm in Entwicklungsländer wieder an Attraktivität gewinnen und als eigene kulturelle Identität wertgeschätzt werden.

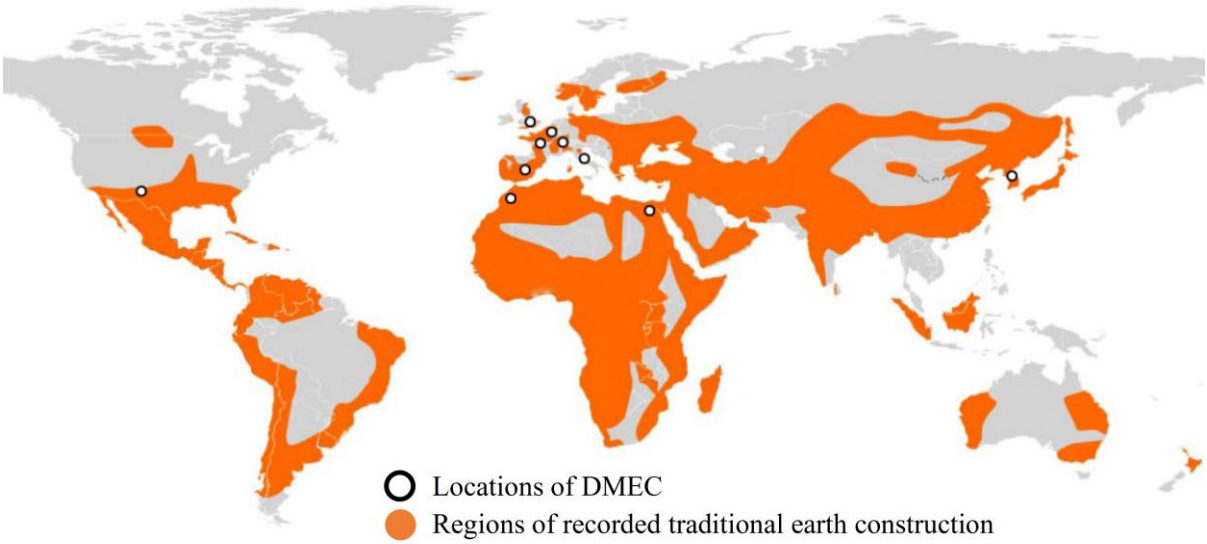


Abbildung 10: Karte der gemeldeten DMEC-Projekte auf der ganzen Welt zwischen 2011 und 2021 [8]

3.2.1 Moderner Stampflehmbau

Robotergestütze Vorfertigung von der ERNE AG, Schweiz

Die ERNE AG ist ein innovatives Bauunternehmen in der Nordwestschweiz mit dem Hauptsitz in Laufenburg. Erne bietet ihren Kunden einen umfassenden Service im Bau, Holz- und Systembau sowie in der Immobilienbewirtschaftung. Ein neues Standbein kam 2022 mit dem Stampflehmbau hinzu. Für ihren eigenen Büroneubau wurden rund 350 Wandelemente in einer bestehenden Zelthalle auf dem Werkareal vorproduziert. Das Material wurde direkt aus der Baugrube gewonnen und noch in der Baugrube mit Traktor und Anbaufräse durchmischt (Abbildung 11). Durch die Verwendung des vor Ort vorhandenen Aushubmaterials konnten nicht nur die Deponiekosten, sondern zusätzlich auch CO_2-Emissionen des Alternativmaterials wie z.B. Beton eingespart werden. Die schwere Handarbeit des Stampfens wird von einem KUKA Roboter übernommen (Abbildung 12). An dem Roboter ist ein modifizierter pneumatischer Stampflehmhammer montiert. Ein Dämpfer zwischen Stampflehmhammer und Roboter minimiert die Schläge auf den Roboter. Die Wandelemente werden in einer Holzschalung verdichtet, diese kann gerade oder durch die Flexibilität des Roboters gerundet ausgeführt werden [42]. Die Abmessungen der Holzschalung können variiert werden. Bewährt haben sich bei den bisher produzierten Elementen Abmessungen von LxBxH = 3,00 m x 0,30 m x 1,2 m [43]. Der Ein- und Ausschalungsprozess erfolgt bisher manuell durch Handwerker. Für die Beschickung des Materials wurde ein eigens entwickelter Einfülltrichter aus Stahl konstruiert, der mit dem Bagger befüllt wird und anschließend mit einem Stapler auf Höhe der Schalung angehoben werden kann [43]. Schicht für Schicht wird

das eingebrachte Material durch mehrmaliges Stampfen mit unterschiedlichen Impulsen verdichtet [44]. Der Roboter besitzt sieben Freiheitsgrade und wechselt auf einer Lineareinheit zwischen drei Zonen, sodass es im besten Fall zu keinen Stillstandzeiten des Roboters kommt. In Zone 1 wird beispielsweise die Schalung montiert, in Zone 2 stampft der Roboterarm und in Zone 3 wird neues Material herbeigebracht. Die Betriebswege und Stampfstrategien des Roboters werden genau geplant und in einer Simulation überprüft. Anschließend wird diese über ein Kommunikationsnetzwerk an den Roboter übertragen. Es findet keine manuelle Programmierung des Roboters statt [2]. Zur Sicherheit der Arbeiter befinden sich bei jedem Zugang zur Zone Sicherheitssensoren in Form von Lichtvorhängen. Betritt ein Arbeiter die Zone, in welcher der Roboter stampft, stoppt dieser zur Sicherheit den Betrieb. Die fertigen Wandelemente werden rund acht Wochen luftgetrocknet, bis sie stabil genug zum Transport auf die Baustelle sind [43].

Abbildung 11: Mischen des Materials in der Baugrube mittels Anbaufräsen bei ERNE AG [44]

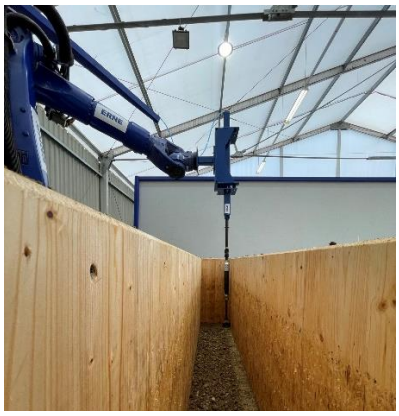


Abbildung 12: Robotische Vorfertigung in der Zelthalle von ERNE AG [45]

Abbildung 13: Lagerung u. Lufttrocknung der fertigen Stampflehmelemente der ERNE AG [45]

Jedes Element ist mit einem QR-Code versehen und beinhaltet Informationen zur Produktion und zum Einbauort. Zur Montage werden die Elemente an Gurten befestigt und mit einem Kran aufeinandergestapelt. Für das neue Bürogebäude von der ERNE AG wurden die Elemente rund elf Meter hoch über drei Geschosse gestapelt. Zum Einsatz kamen die auf Druck bemessenen Stampflehmwände im Treppen- und Sanitärkern. Da die Elemente eine tragende Aufgabe übernehmen, wurde eine strenge Qualitätskontrolle während der Produktion durchgeführt. Täglich wurde das Rohmaterial auf Feuchtegehalt und Zusammensetzung kontrolliert. Zudem wurden täglich mehrere Probekörper für Labortests hergestellt und unter anderem die Tragfähigkeit bemessen und dokumentiert [2].

Abbildung 14: Visualisierung Büroneubau ERNE AG [45]

Abbildung 15: Bauzustand Büroneubau ERNE AG (eigene Aufnahme)

In-situ Stampflehmbau automatisiert mit Form Earth, Australien

Das australische Start-up-Unternehmen Form Earth stellte 2020 seinen ersten Prototyp für ein automatisiertes Fertigungsverfahren für Stampflehmwände vor. Die konzipierte Maschine „Freeform“ ist eine kompakte Einheit, welche aus einem Materialbehälter, einer Gleitschalung und einem Stampfer zur Verdichtung besteht [2]. Die Maschine lässt sich flexibel mit einem kleinen Kran versetzen und ist für den Einsatz auf der Baustelle ausgelegt. Es können maximale Elementgrößen mit einer Breite von 2,0 m und einer Höhe von 2,7 m hergestellt werden [46, 0:58-1:00]. Durch die beweglichen Randabschalungen kann die Breite der Elemente variiert oder die seitliche Schalung gar abgenommen werden, um eine Wandscheibe direkt neben einer bestehenden zu erstellen [47, 0:45-0:50]. Der Materialtrichter deckt die gesamte Länge der Gleitschalung ab und fährt automatisiert nach oben, um das Lehmgemisch in die Schalung zu entleeren. Anschließend wird das Material von einem einteiligen Verdichtungswerkzeug verdichtet, welches sich mit der Gleitschalung nach oben bewegt, bis die gewünschte Wandhöhe erreicht wird.

Das System von Form Earth bietet eine Low-Tech Möglichkeit der direkten Herstellung am Bauwerk ohne erforderliche Montage oder Zuschneiden von Elementen. Die traditionelle Bauweise des Stampflehmbaus kann durch „Freeform“ nahezu autonom realisiert werden. Trotzdem scheint es in denen vom Hersteller veröffentlichten Videos, als sei das System in gewissem Maße noch von menschlicher Anleitung abhängig. Die Qualität der Oberflächen und Kanten sind stellenweise mangelhaft, was möglicherweise an der Gleitschalung und dem frischen Zustand des Stampflehms liegen könnte. Das System bedarf für die serielle Umsetzung einer Weiterentwicklung.

Abbildung 16: erster Prototyp von Form Earth [48]

Abbildung 17: "Freeform" von Form Earth [13]

Stampflehmvorfertigung von Martin Rauch, Lehm Ton Erde Baukunst GmbH

Martin Rauch gilt als Pionier im Lehmbau. So war er der Erste, der 2015 in seiner Werkhalle in Schlins, Österreich eine maschinelle Vorfertigung von Stampflehmwänden aufbaute. Die Maschine fertigt eine bis zu 20 m lange Wand am Stück, welche im Anschluss halbautomatisiert, gemäß den vorgesehenen Konstruktionsanforderungen, mit einer vertikalen Schneidemaschine in Elemente geschnitten wird. Das Ein- und Ausschalen erfolgt halbautomatisch mit maschineller Unterstützung. Die Materialbeschickung in die Schalung funktioniert automatisiert über einen Aufnahmetrichter, der parallel zur Schalung auf einer Lineareinheit mitgeführt wird und über ein Förderband gleichmäßig Material in die Schalung befüllt. Hinter dem Materialförderer läuft die Verdichtungseinheit, mit den Verdichtungswerkzeugen. Martin Rauch hat bereits verschiedene Verdichtungswerkzeuge eingesetzt. In seinem Buch „Gebaute Erde“ [9] stellt er die Verdichtungseinheit bestehend aus zwei mittig angeordneten Walzen und zwei Stampfern dar, welche um dieselbe Achse rotierend, das Material bis an den Rand verdichten (Abbildung 18) . Jede komprimierte Schicht ist circa 12 cm hoch [2]. Die Elemente werden noch im Werk für die Montage vorbereitet. Hierfür werden in die seitlichen vertikalen und die obere horizontale Seite der Elemente eine Nut eingeschnitten. Die vertikalen Nuten werden nach der Montage mit einem steiferen Trasskalk verfüllt. Trasskalk ist ein ökologischer Binder, der sich aus einem Gemisch aus Kalkhydrat und gemahlenem Trass zusammensetzt [49]. In die horizontalen Nuten werden zwei durchgängige Armierungsstäbe eingelegt, welche die Elemente horizontal miteinander verbinden und vergleichbar mit einem Betonringanker sind. Vor dem Transport auf die Baustelle werden die Wandelemente verpackt, um sie zu schützen. Auf der Baustelle werden sie mit speziellen Aufhängevorrichtungen mit einem Kran montiert und auf einem Lehmmörtelbett ausgerichtet.

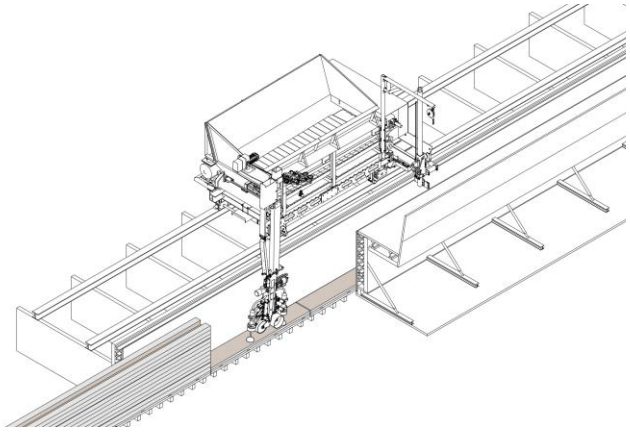


Abbildung 18: Aufbau der maschinellen Vorfertigung, M. Rauch [9]

Abbildung 19: Schneidemaschine, M. Rauch [50]

Robotischer Stampflehmbau, der TU Braunschweig

Die Technische Universität Braunschweig forscht am Institut für Tragwerksentwurf (ITE) an einer vollautomatisierten Stampflehmbauweise mit einem optimierten Materialverbrauch an Schalung und Arbeitsaufwand. Die Fertigung kann vor Ort oder lagerbasiert stattfinden. Gefertigt wird bisher mit einem Schwerlastroboter im „Digital Building Fabrication Laboratory“ am ITE. Dort entstand eine 2,50 m lange, 0,80 m hohe und 0,34 m breite Stampflehmwand mit einer durchschnittlichen Schichthöhe von 1,4 cm. Anders als Beton, kann Stampflehm direkt ausgeschalt und belastet werden, daher wird die Schalung nur im Moment und im Bereich der Verdichtungswerkzeuge benötigt. Somit eignet sich für eine automatisierte Stampflehmbauweise eine Gleitschalung, welche die lokale Verdichtungsenergie aufnimmt. Zudem ist eine flexible Wandgeometrie mit Kurven möglich und bietet Architekten und Architektinnen ohne Mehraufwand neue Gestaltungsfreiheiten. Die hohen Verdichtungsdrücke, die herkömmlich über steife Rahmenschalungen aufgenommen werden, stellen für die adaptive Gleitschalung eine Herausforderung dar. Gelöst werden kann dies durch erhöhte Wiederholungsgeschwindigkeit des Verdichtungsprozess und kleinen Lagenhöhen. Die kleinen Lagenhöhen ergeben sich ohnehin durch die fehlende Schalung während des Aufbringens des Materials. Das Material wird durch einen kollaborativen Roboter aufgebracht, die Verdichtungseinheit aus Rüttelplatte und Randverdichtern folgt. Um eine gleichmäßige Verdichtung an den Wandenden zu gewährleisten, fährt der Verdichtungsroboter über das Wandende hinaus. Ein vertikal verfahrbares Schalsystem ermöglicht das Schalen der Stirnseiten [7, 51] .

Das System mit den zwei Roboterarmen setzt ähnlich wie bei dem System von ERNE AG nicht die vollen Fähigkeiten von Roboterarmen frei, sich in mehrere Richtungen zu bewegen und komplexe Geometrien zu erstellen. Zudem sind auf den veröffentlichten Bildern der TU Braunschweig ungleichmäßige Schichten zu erkennen, die seitlich leicht abfallen. Es lässt vermuten, dass das aufgebrachte Material seitlich abrollt, da es keine durchgängige Schalung über die gesamte Länge gibt.

Abbildung 20: robotisch gefertigte Stampflehmwand der TU Braunschweig [52]

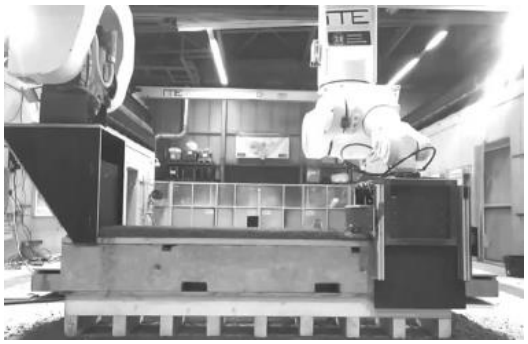


Abbildung 21: neues Konzept zur vollautomatisierten Stampflehmbauweise, TU Braunschweig [2]

3.2.2 3D-Druck mit Lehm

WASP- World's Advanced Saving Project, Italien

Die italienische Firma WASP aus der Region Emilia-Romagna ist eine der führenden Firmen in der 3D-Drucktechnologie. Sie machten es zu ihrer Vision, 3D-Druckersysteme zu entwickeln mit denen jeder die Chance hat, sein eigenes „Tiny House“ aus vor Ort gewonnenem Lehm selbst zu bauen. Mit ihrem Konzept möchten sie durch neue Technologien Ressourcen einsparen und ihr Wissen im Netz frei zur Verfügung stellen, um Chancengleichheit zu erhalten. Das 2018 eingeweihte erste Prototyp Gebäude „Gaia“ ist das Ergebnis jahrelanger Forschung und Entwicklung. Gedruckt wurde es mit dem mobilen „Crane WASP“ Drucker, der Schicht für Schicht die wabenförmige Wand extrudierte. Das für den Druck verwendete stabilisierte Material ist eine Mischung aus vor Ort gewonnenem Lehm, Wasser sowie Strohreisfasern und Kalk als Bindemittel. Der verwendete Lehm setzt sich aus 30 % Ton, 40 % Schluff und 30 % Sand zusammen und macht lediglich einen Anteil von 25 % der Gesamtmasse aus. Die restlichen 75 % setzen sich aus 40 % Strohreisfasern, 25 % Reishülsen und 10 % hydraulischem Kalk zusammen. In einer Nasskollergangmühle wurde das Material zu einer homogenen, pumpfähigen Masse verarbeitet. Die Hohlräume der wabenförmigen Wand wurden anschließend mit Reisfasern gefüllt, um die Dämmeigenschaften der 43,5 cm dicken Wand zu verbessern. Für die Gesamtkonstruktion konnte ein Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) von beachtlichen 0,249 W/m^{2}K erreicht

werden. Im Vergleich hierzu lag der U-Wert der mit Glasschaumschotter gedämmten 69 cm dicken massiven Stampflehmwand von Martin Rauch bei 0,35 W/m²K. Die Gesamtmaterialkosten der 3D gedruckten Wand lagen bei ca. 900 €. Mit zwei Personen konnte die 2,70 m hohe Wand, welche eine Fläche von 30 m² umschließt innerhalb von 100 Arbeitsstunden mit einer Druckgeschwindigkeit von 4200 mm/min hergestellt werden [53]. Nach erfolgreich abgeschlossenem und reflektiertem Projekt „Gaia“ entstand 2019 der neue Prototyp „Tecla“. Der wesentliche Unterschied liegt in der selbsttragenden kuppelförmigen Struktur des Gebäudes. Die Dachlasten müssen so nicht mehr wie bei „Gaia“ über eine separate Holzkonstruktion abgetragen werden. „Tecla“ besteht aus zwei Kuppeln, die ebenso mit dem „Crane WASP“ 3D-Drucker hergestellt wurden [54]. Die Entwicklung des „Maker Economy Starter Kit“ ermöglicht es, den mobilen 3D-Drucker sowie die zur Mischung und Herstellung benötigten Hilfsmittel, kompakt in einem Container auf die Baustelle liefern zu lassen. Inklusive sind die Installation des 3D-Druckers, eine Schulung und die Fernberatung während des Druckes [55]. Der Grundpreis eines solchen Druckers liegt aktuell bei 132.000 €, welcher den Einstieg für Bauunternehmer in die neue Technologie erschwert [56]. Abgesehen von den Investitionskosten bietet der 3D-Druck eine schnelle, präzise Möglichkeit, komplexe Formen aus natürlichen Materialien herzustellen. WASP ist ein innovatives Unternehmen, welches eine Vorreiterrolle im groß skalierten Lehm 3D-Druck übernimmt. Neben den firmeninternen Projekten unterstützt WASP als Industriepartner das IAAC – Institute for Advanced Architecture of Catalonia in Spanien. In dem gemeinsamen Forschungsvorhaben „Living Prototypen“ wurde mit neuen Formen experimentiert und das erste 3D gedruckte Lehmhaus mit Studenten in Spanien gebaut. [57]

Abbildung 22: Projekt Tecla- wabenförmiger Wandaufbau von WASP

Abbildung 23: Projekt Tecla- visualisierter Bauablauf von WASP

Robotergestützes 3D-Drucken von Lehmbauteilen, Australien & Großbritannien

Die Forschergruppe der Universität in Adelaide, Australien beschäftigt sich gemeinsam mit den britischen Universitäten Cardiff und Plymouth mit den grundlegenden Eigenschaften des 3D- Drucks. Zu Beginn wurden geeignete Rezepturen für das Extrusionsverfahren untersucht. Gomaa et al. [58] führte eine Reihe von Tests durch, um die herkömmliche Mischung für Wellerlehm dem 3D-Druckverfahren anzupassen. Er empfiehlt eine Mischung mit einem erhöhten Wasseranteil, um die Reibung zwischen den Partikeln herunterzusetzten und den Verschleiß des 3D-Druckers zu minimieren. Er kommt zu einem Ergebnis von einem Wasseranteil von 25 %, einem unveränderten Strohanteil von 2 % bezogen auf die Masse und einem Unterbodenanteil von 73 %. Ein 3D-Drucksystem besteht aus einer Bewegungssteuerung und einer Materialzufuhr bzw. einem Extrusionssystem. Die Bewegungseinheit wurde durch ein KUKA Roboter mit Grasshoper Software umgesetzt. Anschließend wurden drei verschiedene Arten von Extrusionssystemen im Labor getestet und miteinander verglichen. Getestet wurde eine Schneckenpumpe, ein pneumatischer Stößel-Extruder und ein elektromechanischer Stößel-Extruder mittels Spindelhubgetriebe. Anhand der daraus gewonnenen Erkenntnissen wurde ein neues eigenes Doppelstempel-Extrudersystem auf Grundlage des elektromechanischen Stößel-Extruders entwickelt. Um die Qualität und die Kontinuität der gedruckten Linien zu erhöhen, wurden die Auswirkungen der Düsengröße und der Druckgeschwindigkeit auf die Höhe der Drucklinien untersucht. In einem zweiten Schritt wurde mit unterschiedlichen Geometrien und bogenförmigen Bauteilen experimentiert. Es wurde festgestellt, dass bei zu kurzen Druckwegen innerhalb einer Schicht, die Schicht nicht genung Zeit zum Aushärten hat, um anschließend die nächste Schicht zu tragen. Dies kann durch langsamere Druckgeschwindigkeiten, längere Druckwege oder schnell aushärtenden Additiven kompensiert werden. Die innerhalb der Forschungsgruppe entwickelte Konzeptidee sieht eine mobile Plattform mit zwei Roboterarmen vor. Mit dem Hauptroboterarm und einem Schlauch wird das Material über eine Düse in die gewünschte Geometrie extrudiert. Der andere Roboterarm automatisiert das Nachfüllen des Materials. Das Material wird hierfür durch menschliche Interaktion mit so wenig Lufteinschlüssen wie möglich in Kartuschen befüllt. Ein Vorrat der Kartuschen lagert auf der Plattform. Zwei Kartuschen befinden sich zum aktuellen Druck im dualen Extrusionssystem. Ist eine der beiden Kartuschen leer, wird sie von dem Roboterarm durch eine volle Kartusche ausgewechelt. Das Verfahren erfolgt so lange, bis das gewünschte Bauteil gedruckt ist. [59]

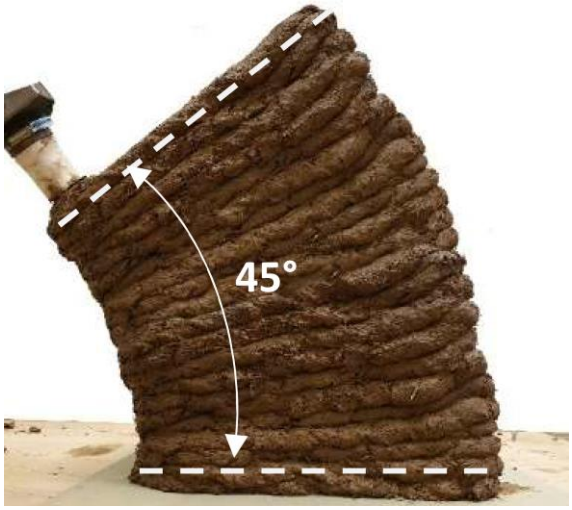


Abbildung 24: Herstellung eines 3D gedruckten, gebogenen Bauteils mit Stroh stabilisiertem Lehm [59]

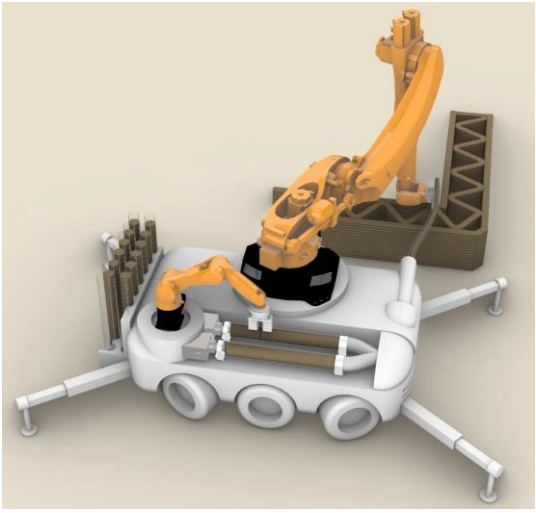


Abbildung 25: Entwurf robotergestützter 3D-Druck mit Kartuschen [59]

3.3 Vergleich additiver Fertigungsverfahren

Um den Entwurf eines Bauablaufes im späteren Teil der Arbeit zu entwickeln, werden hier die zwei additiven Fertigungsverfahren: Die automatisierte Stampflehmbauweise und das 3D-Drucken mit Lehm, miteinander verglichen und anhand der Eigenschaften eines von beiden ausgewählt. Die Kategorien stammen überwiegend aus dem Baubetrieb und der Bautechnik.

Einer der wichtigsten Unterschiede, wie am Anfang dieses Kapitels bereits erwähnt, findet sich in der Materialaufbereitung wieder. Während das Material für den Stampflehmbau im besten Fall direkt erdfeucht aus der Baugrube gehoben werden kann, muss das Material für den 3D-Druck weiter aufbereitet werden. Für den 3D-Druck müssen die groben Körnungen ausgesiebt oder gebrochen werden. Zudem muss, um eine fließfähige Konsistenz zu erreichen, ein erhöhter Wassergehalt und ggf. Fließmittel verwendet werden. Das für den 3D-Druck verwendete Material muss sich an alle Herstellungsschritte anpassen können. Es muss fließfähig genug zum Pumpen und Extrudieren sein, eine gute Grünstandfestigkeit besitzen, um die nächsten aufgebrachten Schichten tragen zu können ohne zu große Verformungen zu erhalten und anschließend im trockenen Zustand eine hohe Tragsicherheit aufweisen [59]. Die Stampflehmbauteile erhalten ihre Festigkeit durch die mechanische Verdichtung und können direkt nach dem Verdichten ausgeschalt werden. Die Tragfähigkeit von Stampflehm lässt sich mit unterem Ziegelmauerwerk vergleichen. Die Druckfestigkeiten sind vergleichbar mit der charakteristischen Druckfestigkeit eines Hochlochziegels der Steindruckfestigkeitsklasse 4 und einer Mörtelklasse M5 mit 2,4 N/mm^2 [60]. Hohe Druckfestigkeiten mit dem 3D-Druckverfahren ohne Stabilisierung zu erreichen, stellt sich

schwieriger heraus und ist vor allem an groß skalierten Bauteilen noch nicht wissenschaftlich erforscht. Bei Untersuchungen an der Universität Bretagne in Lorient, Frankreich wurden in etwa halb so große Druckfestigkeiten von 1,2 N/mm^2 an vollflächig gedruckten 35 mm breiten und 70 mm langen Prüfkörper gemessen. Die Prüfkörper wurden aus drei Lagen mit einem Düsendurchmesser von je 35 mm gedruckt [61]. Die Druckfestigkeiten der Universität Bretagne können mit den Ergebnissen aus dem praktischen Teil dieser Arbeit nur überschlägig verglichen werden, da unterschiedliche Materialien, Mischungsverhältnisse und vor allem unterschiedliche Geometrien verwendet wurden (siehe Kapitel 4.7). Die Ergebnisse aus dem praktischen Teil zeigen jedoch, dass durch Additive deutliche Steigerungen der Druckfestigkeiten möglich sind.

Das Schwindmaß ist zum größten Teil von der Materialmischung abhängig. Je fetter der Lehm und je höher der Wassergehalt der Mischung, desto größer wird das Schwindmaß und die Gefahr von übermäßigen Schwindrissen steigt [9]. Das Problem kann aufgrund der Materialmischung und der monolithischen Bauweise vermehrt beim Extrusionsverfahren am Bauwerk auftreten. Die Herstellung direkt am Bauwerk bietet jedoch den Vorteil, dass keine Lagerfläche für die Elemente benötigt werden. Der 3D-Druck bietet große Gestaltungsfreiheit, es können komplexe Geometrien mit und ohne Hohlräume hergestellt werden. Dies spiegelt sich jedoch auch in einem erhöhten Programmieraufwand wider. Der 3D-Drucker muss vor Druckbeginn programmiert und genaustens auf der Baustelle aufgebaut und ausgerichtet werden. Bei der automatisierten Stampflehmbauweise ist die Gestaltungsfreiheit aufgrund der notwendigen Schalung im Bereich der Verdichtung eingeschränkt. Es ist möglich Kurven mittels einer Gleitschalung herzustellen oder Spezialschalungen wie 3D gedruckte Freiformschalungen zu verwenden. Je nach Anlage bzw. Art des Prozesses unterscheiden sich die Anlagekosten und die Reproduzierbarkeit bei der Stampflehmbauweise. Die Reproduzierbarkeit kann durch Sensoren verbessert werden, hängt aber grundsätzlich von vielen verschiedenen Faktoren wie der Art der Verdichtung, der Materialzufuhr, sowie der Materialzusammensetzung ab. Aufgrund der hohen Genauigkeit eines 3D-Druckers ist die Reproduzierbarkeit bei konstanter Materialzufuhr und Kalibrierung des Druckers sehr gut.

In der Kategorie „Nachhaltigkeit“ unterscheiden sich die beiden additiven Verfahren nur gering. Der 3D-Druck bietet als Vorzug einen ressourcenschonenden Druck mit Hohlräumen, die sich gleichzeitig positiv auf die Wärmedämmung auswirken oder sogar zusätzlich mit Dämmmaterial befüllt werden können. Negative Auswirkungen auf den Energieverbrauch und die Ressourcen hat hingegen der im Verhältnis zur Stampflehmbauweise hohe Aufbereitungsgrad. Dazu zählt das aufwendigere Sieben und Brechen sowie ein erhöhter Wassergehalt und ggf. Zusatzmittel wie Fließmittel oder Stabilisatoren aus Biopolymeren zur Verbesserung der Grünstandfestigkeit. Beim Stampflehmbau fällt der hohe Materialverbrauch

der massiven Bauteile negativ auf, dieser hat gleichzeitig aber auch den Vorteil einer guten Schalldämmung. Für die Aufbereitung des Stampflehmmaterials sind nur wenig verschiedene Ressourcen notwendig. Im Idealfall kann der erdfeuchte Bodenaushub mit gegebenenfalls einem nachhaltigen Additiv verwendet werden. Dadurch entstehen keine Materialkosten bzw. nur für den Fall, dass ein Additiv oder andere Gesteinskörnungen notwendig sind. Für den Auf- und Abbau der Anlage (im Fall einer Vorfertigung auf der Baustelle) muss in der Regel mit keinen übermäßigen Kosten gerechnet werden. Für den Aufbau eines 3D-Druckers inkl. Überdachung sowie Programmierung und Kalibrierung ist mit höheren Kosten zu rechnen. Des Weiteren können die Materialkosten aufgrund der zusätzlichen Additive steigen.

Die Auswertung mittels Nutzwertanalyse zeigt, dass die Stampflehmbauweise nach Stand der Technik mit sieben Punkten vorne liegt. Das ist größtenteils auf die Herausforderungen und Schwierigkeiten in der Materialaufbereitung, bei der Tragfähigkeit und dem Schwinden beim Lehm 3D-Druck zurückzuführen. Somit wird im weiteren Verlauf der Arbeit ein Bauablauf für die Stampflehmherstellung entwickelt. In der folgenden Tabelle sind die einzelnen Kategorien nochmals zusammengefasst.

Vergleich additiver Fertigungsverfahren		
Nutzwertanalyse durch Punkte von 0-5 5 = gute Bedingungen 0 = schlechte Bedingungen	***Stampflehmbauweise***	***3D-Druck mit Lehm***
Materialaufbereitung	einfache Aufbereitung des Materials (im Idealfall kann der erdfeuchte Aushub direkt verwendet werden)	aufwendigere Aufbereitung des Materials aufgrund hoher Anforderungen an das Material (gute Siebqualität, Wasserzugabe, Pumpfähigkeit mit ggf. Fließmittel, gute Grünstandfestigkeit durch Stabilisatoren, Tragfähigkeit im Endzustand)
Punkte	5	2
Tragfähigkeit	Tragfähigkeiten mit unterem Ziegelmauerwerk vergleichbar, kann sein Eigengewicht im feuchten Zustand problemlos tragen	geringere Tragfähigkeiten als Stampflehm, mit Bindemittel aber vergleichbare Druckfestigkeiten (siehe praktischer Teil), kann sein Eigengewicht je nach Grünstandfestigkeit im feuchten Zustand nur begrenzt tragen
Punkte	3	1
Schwinden	Beim Verwenden des richtigen Mischungsverhältnisses (kein zu fetter Lehm) kommt es beim Trocknen zu sehr feinen Mikrorissen, welche die Qualität der Stampflehmwand nicht abmindern	durch eine erhöhten Wassergehalt und Tonmineralien zur erreichen der Fließfähigkeit kommt es zu größeren Schwindmaßen, welche zudem aufgrund der monolithischen Herstellung am Bauwerk zu großen Schwindrissen führen können
Punkte	4	1
Lagerung	Lagerungsfläche notwendig	keine Lagerfläche für Elemente notwendig, da direkt auf Grundfläche produziert wird, dafür Zwischenlagerung Erdaushub notwendig
Punkte	3	4
Anlage/ Produktion	Einfache Produktion durch Low-Tech Ansatz möglich (geringe Anlagekosten)	erhöhter Programmieraufwand und genaue Ausrichtung des Druckers auf der Baustelle erforderlich
Punkte	4	2
Gestaltungsfreiheit	mäßige Gestaltungsfreiheit (Kurven mit Gleitschalung, Spezialschalungen wie bspw. 3D gedruckte Freiformschalungen)	große Gestalungsfreiheit
Punkte	3	5
Reproduzierbarkeit	Je nach Art des Prozesses, gute Reproduzierbarkeit möglich, bspw. Überwachung durch Sensoren	sehr gute Reproduzierbarkeit, aufgrund hoher Genauigkeit des 3D-Druckers (Voraussetzung: konstante Materialzufuhr, Kalibrierung des Druckers)
Punkte	3	4
Nachhaltigkeit	hoher Materialverbrauch durch massive Bauteile, wenig verschiedene Produkte notwendig, vor Ort Aushub und evtl. ein nachhaltiges Additiv	Ressourcenschonend durch Druck mit Hohlräumen, Dämmwirkung, hoher Aufbereitungsgrad des Materials (Sieben, Brechen, hoher Wassergehalt, Bindemittel, Zusatzmittel,-stoffe)
Punkte	4	4
Wirtschaftlichkeit	Auf-u. Abbaukosten je nach Anlage (i.d.R. mäßig), geringe Materialkosten	hohe Kosten für Aufbau, Programmierung und ggf. Material
Punkte	4	3
Summe	33	26

Tabelle 4: Vergleich additiver Fertigungsverfahren (Nutzwertanalyse) [2, 8, 9, 46, 51, 53, 58, 59, 61]

3.4 Art der Fertigung

Es bestehen drei mögliche Arten zur Fertigung von modernem Stampflehm, die in diesem Unterkapitel miteinander verglich werden. Anschließend wird anhand der definierten Kategorien eine Nutzwertanalyse durchgeführt, um die effizienteste, nachhaltigste und wirtschaftlichste Art der Fertigung zu analysieren. Die Bewertung beruht auf dem aktuellen Stand der Technik wie in Kapitel 3.2 beschrieben.

Traditionell im Stampflehmbau wird direkt auf der Baustelle gefertigt. Die Stampflehmwände werden direkt an Ort und Stelle (in-situ) in einer Schalung hergestellt und müssen nicht mehr versetzt werden. Im modernen Stampflehmbau kann dieser in-situ Prozess durch beispielsweise eine Verdichtungsmaschine wie bei Form Earth [13] oder einen Roboter wie beim Forschungsprojekt der TU Braunschweig [7] automatisiert werden. Gegenüber der Fertigung am Bauwerk steht die Vorfertigung. Bei einer Vorfertigung werden Elemente im Werk oder auf der Baustelle vorproduziert [62]. Bei einer Fertigung im Werk werden die Elemente anschließend gelagert, auf die Baustelle transportiert und an ihre endgültige Position platziert. Bei der Vorfertigung auf der Baustelle entfallen die Transportwege des Aushubmaterial ins Werk und der Elemente zurück auf die Baustelle. Was bei einer Baugrubenfläche von 60 m x 30 m, einer Tiefe von 2,50 m und einem Bodenauflockerungsfaktor von α_L= 0,85 [63] über 400 LKW Fahrten (Annahme 12 m^3 pro LKW) des Aushubmateriales in das Werk entspricht. Um die Elemente (Annahme 3,00 m x 1,20 m x 0,35 m) wieder auf die Baustelle zu transportieren, kommen bei einem Transport von zehn Elementen pro LKW (Ladefläche 8,50 m x 2,55 m) und einer Verdichtung des Materials um ca. 1/3 nochmals ca. 280 Fahrten hinzu. Dies entspricht insgesamt 680 Fahrten, die durch eine on-site Vorfertigung größtenteils eingespart werden können. Abgezogen werden müssen die Transportwege für den Transport der Anlage auf die Baustelle, was einen sehr geringen Anteil ausmacht. Die je nach Entfernung zwischen Baustelle und Werk stark ansteigenden Transportkilometer haben einen negativen Einfluss auf die Umwelt und das Klima sowie die Transportkosten. Durch eine Vorfertigung im Werk könnte die Produktion jedoch weitestgehend wie am Fließband automatisiert und eine große Menge in kurzer Zeit hergestellt werden. Die Produktivität kann durch optimale und nahezu gleichbleibende Bedingungen gesteigert werden. Auf der Baustelle fällt der Faktor Witterung stark ins Gewicht. Die Stampflehmelemente sind vor Niederschlägen zu schützen. Außerdem ist der feuchte Stampflehm frostempfindlich, wodurch eine Herstellung bei tiefen Temperaturen nicht möglich ist. Es ist also schwieriger, gleichbleibende Produktionsbedingungen zu schaffen. Zudem muss für die Lagerung der Elemente eine extra Lagerhalle auf den meist beengten Baustellen aufgebaut werden oder eine Lagerhalle in der Umgebung über den Bauzeitraum angemietet werden. Die folgende Tabelle stellt die drei Arten der Fertigung gegenüber.

Vergleich der Fertigungsarten für die Stampflehmbauweise *			
Nutzwertanalyse durch Punkte von 0-5 5 = gute Bedingungen 0 = schlechte Bedingungen	***Vorfertigung im Werk***	***Vorfertigung auf der Baustelle (on-site)***	***Fertigung am Bauwerk (in-situ)***
Witterungseinflüsse	sehr geringe Witterungseinflüsse	hohe Witterungseinflüsse, Frostgefahr	hohe Witterungseinflüsse, Frostgefahr
Punkte	4	2	2
Lagerung/Platzverhältnisse	gleichbleibende Platzverhältnisse für Lagerung und Produktion, Lagerungsfläche nur mit Mehraufwand an Projektgröße anpassbar	veränderliche Platzverhältnisse je nach Baustelle (oft beengt)	veränderliche Grundfläche je nach Bauwerk, keine Lagerfläche für Elemente notwendig, Zwischenlagerung Erdaushub
Punkte	3	3	4
Auf-und Abbau der Anlagen	Entfällt	Auf-u. Abbau der Anlage,inkl. Lagerzelt für Elemente	Auf-u. Abbau der Anlage, komplettes Bauwerk muss überdacht werden, sehr großer Aufwand bei mehrstöckigen Großprojekten
Punkte	5	3	1
Transportwege	Transport des Materials ins Werk und Transport der Elemente auf die Baustelle	Transport der Anlage und Lagerzelt auf die Baustelle	Transport der Anlage und Lagerzelt auf die Baustelle
Punkte	1	4	4
Gestaltungsfreiheit	mäßige Gestaltungsfreiheit (Kurven mit Gleitschalung, 3D gedruckte Freiformschalungen)	mäßige Gestaltungsfreiheit (Kurven mit Gleitschalung, 3D gedruckte Freiformschalungen)	mäßige Gestaltungsfreiheit (Kurven mit Gleitschalung, 3D gedruckte Freiformschalungen)
Punkte	3	3	3
Reproduzierbarkeit	sehr gute Reproduzierbarkeit und Qualität der Elemente, aufgrung gleichbleibender Produktionsbedingungen	gute Reproduzierbarkeit und Qualität der Elemente, durch Anwendung des Low-Tech Ansatzes auf der Baustelle	gute Reproduzierbarkeit und Qualität der Stampflehmkomponenten, bei hohem Reifegrad der High-Tech-Anlage
Punkte	5	3	3
Nachhaltigkeit	großer Umwelteinfluss, aufgrund der hohen Transportwege	geringer Umwelteinfluss durch reduzierte Transportwege	geringer Umwelteinfluss durch reduzierte Transportwege
Punkte	1	5	5
Wirtschaftlichkeit	hohe Transportkosten, keine Kosten für Auf-u. Abbau der Anlage und Lagerzelt	niedrige Transportkosten, mäßige Kosten für Auf-u. Abbau der Anlage und Lagerzelt	niedrige Transportkosten, hohe Kosten für Auf-u. Abbau der Anlage und Lagerzelt
Punkte	3	4	2
Summe	25	27	24
* es wurden folgende Annahmen für die Bewertung getroffen: Die Großbaustelle befindet sich > 20 km vom Werk entfernt, es wird das Aushubmaterial vor Ort auf der Baustelle verwendet, auf der Baustelle ist ausreichend Platz um eine Fertigungsanlage und Lagerhalle aufzubauen			

Tabelle 5: Vergleich der Fertigungsarten für die Stampflehmbauweise (Nutzwertanalyse)

Die Nutzwertanalyse zeigt, dass die ortsunabhängige Vorfertigung auf der Baustelle (on-site) für die meisten Projekte, wenn sie nicht gerade in Werksnähe liegen, eine nachhaltige und wirtschaftliche Lösung bietet. Daher wird in Kapitel 5 das technische Konzept für eine Vorfertigung auf der Baustelle entworfen und geplant. Auch Martin Rauch aus Österreich empfiehlt aus seiner Erfahrung heraus, dass es bei Großprojekten sinnvoll ist, eine lokale Produktionsanlage aufzubauen und hat dies bei seinen eigenen Projekten bereits erfolgreich umgesetzt [9, S. 125].

4 Praktischer Teil: Lehm 3D Druck

4.1 Ziel der Probedrucke

Der nachfolgende Teil dieser Arbeit hat das Ziel, die Herausforderungen und Vorzüge des Lehm 3D-Drucks zusätzlich anhand beispielhafter praktischer Versuche zu analysieren und auszuwerten. Der praktische Teil untermauert die in Kapitel 3.3 durchgeführte Nutzwertanalyse zur Wahl des additiven Fertigungsverfahren für die Entwicklung einer Konzeptidee. Die Analyse des 3D-Druckverfahrens und die Auswertung der Druckversuche bestätigen das Ergebnis der Nutzwertanalyse nochmals.

Mitunter einer der größten Herausforderungen des Lehm 3D-Drucks sind die geringen Druckfestigkeiten. Anders als beim Stampflehmbau können die Druckfestigkeiten nicht über mechanische Verdichtung erreicht werden, was auf die fließfähige Konsistenz zurückzuführen ist. Um die Druckfestigkeit im 3D-Druck zu steigern und Konkurrenzfähig zum Stampflehm zu machen, stellen Additive wie in Kapitel 2.5 beschrieben eine mögliche Lösung dar. Deshalb sollen mehrere Prüfkörper mit verschiedenen nachhaltigen Additiven erstellt werden und im Labor der Hochschule Konstanz auf ihre Druckfestigkeiten geprüft werden. Die Prüfkörper sind Würfel mit einer Kantenlänge von 5 cm und werden im Inneren mit einem bienenwabenartigen Muster gefüllt. Des Weiteren werden neben den Standardprüfkörpern mit Bienenwaben Infill vollflächig gedruckte Prüfkörper und in Schalung gefüllte Prüfkörper erstellt und ebenso auf ihre Druckfestigkeit geprüft. Der Vergleich soll den Unterschied der Packungsdichte des 3D gedruckten und den durch Fingerdruck in der Schalung verdichteten Prüfkörpers, als auch den Unterschied verschiedener Füllgrade zeigen. Die Prüfkörper werden im „Open Innovation Lab“ der Hochschule Konstanz mittels eines umgebauten Kunststoff 3D-Druckers gedruckt.

4.2 Vorbereitungen und Versuchsaufbau

Bei dem hier verwendeten Lehm 3D-Drucker handelt es sich um einen herkömmlichen und umgebauten Kunststoff 3D-Drucker der Marke MASS PORTAL. Dieser verwendet eine Delta-Kinematik zu welcher neu das Pastenextrusionssystem für pastöse Materialien wie Lehm, Ton und Keramik von WASP montiert wurde. Der 3D-Drucker besitzt einen Tank mit einer maximalen Füllmenge von drei Litern. Das Material aus dem Tank wird durch Pneumatik über einen 10 mm Schlauch zum Extruder transportiert, wo ein Schrittmotor mittels einer Förderschnecke das Material in der gewünschten Menge und Geschwindigkeit extrudiert.

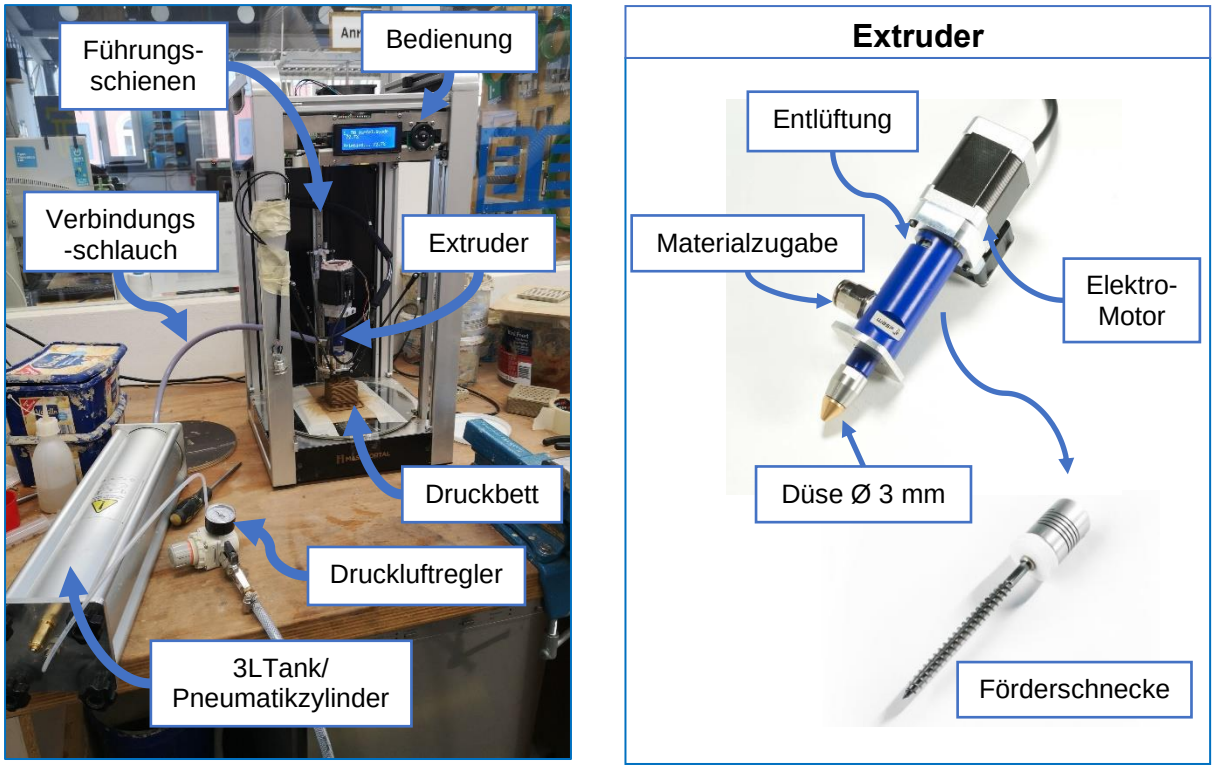


Abbildung 26: Aufbau Lehm 3D-Drucker mit WASP Düse an der HTWG Konstanz

Als erstes muss die Geometrie des Prüfkörpers in einem CAD-Programm konstruiert werden. Hierfür kann jedes herkömmliche Zeichenprogramm verwendet werden, welches STL-Dateien exportieren kann. Eine STL-Datei stellt Netzkoordinaten dreidimensionaler Datenmodelle bereit, welche anschließend in eine Slicer-Software eingelesen werden können [64]. Hierfür wurde der kostenlose PrusaSlicer 2.5.0 verwendet, welcher das 3D-Datenmodell in spezifische Anweisungen für den Drucker umwandelt. Die Druckereinstellungen, wie beispielsweise der Düsendurchmesser oder die Größe der Druckplatte, können dort hinterlegt werden. Alle Prüfkörper wurden mit der 3 mm Düse gedruckt. Des Weiteren können Einstellungen zum Filament und zu den allgemeinen Druckeinstellungen vorgenommen werden. Sind alle Einstellung richtig hinterlegt, wird die Geometrie „gesliced“ (eng. slicen = „in Scheiben schneiden“), was bedeutet, dass die Geometrie virtuell in Scheiben geschnitten wird und für jede dieser Scheiben ein Fahrweg für den Druckkopf berechnet wird. Dieser Fahrweg wird als G-Code ausgegeben. Der Code kann entweder per SD-Karte an den Drucker übermittelt werden oder per USB-Kabel direkt mit dem Laptop verbunden werden.

Bevor der Druck gestartet wird, muss die Höhe in z-Richtung kontrolliert werden und gegebenenfalls an das Druckbett angepasst werden. Für die erste Schicht ist es von Vorteil, wenn der Abstand zum Druckbett etwas geringer ist, damit die Drucklinie etwas gequetscht wird und besser am Druckbett haften bleibt. Für eine bessere Haftreibung wurde auf MDF-Platten gedruckt, die mit einer dünnen Lehmschlämme überzogen wurden. Dies hatte

zusätzlich den Vorteil, dass der feuchte und noch instabile Prüfkörper nach dem Druck einfacher entnommen werden konnte. Die Achsen des Druckers werden vor Beginn nochmals genullt, um sicher zu gehen, dass die Koordinaten beim Druck stimmen. Wenn der Drucker startbereit ist, kann das Material in den Zylinder eingefüllt werden. Hierbei hat es sich bewährt das Material am Stück und so komprimiert wie möglich in einer „Rolle“ in den Zylinder einzufüllen. Im nächsten Schritt muss der Zylinder dicht verschlossen werden, da Luftdruck von bis zu 7 bar auf den Zylinder wirken können. Als Test vor dem Druck wird eine kleine Menge des Filaments manuell extrudiert, um die Einstellungen zu überprüfen. Sind alle Einstellungen in Ordnung kann der Druck gestartet werden.

4.3 Material

Insgesamt wurden drei verschiedene Mischungen hergestellt. Alle Mischungen wurden mit dem Baulehmpulver von Claytec 10.101 und Quarzsand 0,1-0,3 mm zubereitet. Das Größtkorn sollte nicht zu groß gewählt werden, um das Verstopfen der Düse zu vermeiden. Bewährt hat sich das Verhältnis von 1/10 vom Größtkorn zum Düsendurchmesser. Einen weiteren Einfluss auf eine gleichmäßige Förderung hat der Anteil von Sand zu Lehmpulver, welcher nicht über dem Verhältnis 1/5 liegen sollte, um das Verkeilen der Sandkörner zu vermeiden. Bei größer skalierten 3D Druckern, bei welchen die Anlagen und Förderungstechnik robuster ausgelegt sind, können die genannten Verhältnisse sehr wahrscheinlich vergrößert werden. Experimentiert wurde als erstes mit Lehm und Sand ohne Additive, um ein Gefühl für das Grundmaterial zu bekommen. Mit einfachen Tests wie der Kugelformprobe oder der Kugelfallprobe konnten erste Erkenntnisse zu den Materialeigenschaften gewonnen werden. Für die Kugelformprobe wurden etwa 5 cm große Kugeln mit den Händen geformt. Fetter tonhaltiger Lehm bleibt dabei an den Händen kleben, zu magerer Lehm lässt sich nicht formen und zerfällt. Ähnlich verhält es sich bei der Kugelfallprobe. Die 5 cm großen Kugeln werden aus ca. 80 cm Höhe fallen gelassen. Zerspringt die Kugel beim Aufprall nicht, ist dies ein Zeichen für einen fetten Lehm. Zerspringt die Kugel in wenige Teile, handelt es sich um einen mageren Lehm. Zerspringt sie in viele Teile und sandet an der Aufschlagstelle ab, ist die Mischung zu mager [15, S. 7]. Es gilt die richtige Mischung herauszufinden, dabei bringt ein fetter Lehm durch seinen hohen Tonanteil eine hohe Bindekraft, neigt aber zu großen Schwindmaßen.

Herstellung Mischung ohne Additive:

Die sich als am besten druckbar herausgestellte Mischung setzt sich aus 70 % Lehmpulver, 12,5 % Quarzsand und 17,5 % Wasser zusammen. Der Quarzsand wurde vor dem Mischen nochmals gesiebt, um das Überkorn herauszusieben, welches die Düse verstopfen könnte. Enthält die Mischung einen zu hohen Sandanteil, können sich die Körner ineinander verkeilen und eine gleichmäßige Förderung behindern. Ist der Sandanteil zu niedrig, verliert das Bauteil an Stabilität. Andersherum verhält es sich mit dem Wassergehalt. Ein zu hoher Wassergehalt senkt die Stabilität und verschlechtert die Grünstandfestigkeit während des Druckvorgangs. Ein zu geringer Wassergehalt kann die Düse verstopfen. Die Mischung wurde in einem Rührgerät zu einer homogenen Masse verrührt. Anschließend wurde die Mischung in eine aufgeschnittene Spritze gefüllt. Nach Angabe der Firma WASP, welche die Düse hergestellt hat, soll die Mischung beim Herausdrücken aus der Spritze leicht abfallen aber nicht abknicken.

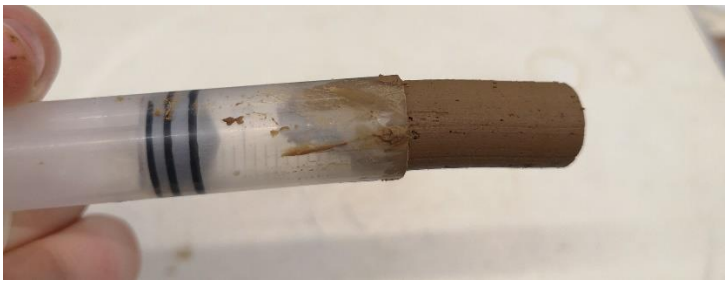


Abbildung 27: Konsistenzprüfung der Mischung ohne Additive

Herstellung der Mischungen mit Holzfasern:

Die Holzfasern wurden aus den Finnpapperesten, mit welche die Architekten ihre Modelle gebaut haben, gewonnen. Die Finnpappe wurde in kleine Stücke gerissen und in reichlich Wasser über Nacht aufgelöst. Sobald die Finnpappe gut mit Wasser vollgesaugt war, wurde sie in einem Mixer fein zerkleinert. Das überschüssige Wasser wurde abgeschüttet und das in den Holzfasern verbliebene Wasser wurde anteilig zum Wassergehalt dazu addiert. Mit den Holzfasern wurden zwei Mischungen ausprobiert. Mischung P51-P55 enthält 0,4 % Holzfasern bezogen auf die Gesamtmasse. Mischung P61-P65 enthält 1,23 % Holzfasern. Die Holzfasern wurden zum Grundmaterial im Rührgerät hinzugegeben und zu einer homogenen Masse verrührt.

Abbildung 28: Mischung mit 0,4 % Holzfasern

Herstellung der Mischung mit Kasein:

Kasein ist wie im Kapitel 2.5.1 beschrieben ein komplexer Eiweiß-Bestandteil der Milch. Getrocknet, in Pulverform ist es wasserunlöslich. Erst mit der Zugabe von Alkalien z.B. durch Soda/ Natriumcarbonat (Na_2Co_3) oder Weißkalkhydrat/Calciumhydroxid ($Ca(OH)_2$) wird das Kasein aufgeschlossen. Somit wird es wasserlöslich und kann als Zusatzmittel eingesetzt werden. Im ersten Versuch wurde 2 % Kasein mit 5 % Weißkalkhydrat angerührt. Während des Druckversuchs kam es im Schlauch zu einer Entmischung, das Wasser separierte sich vom restlichen Material.

Abbildung 29: Material mit Kalkkasein im Schlauch entmischt

Die Vermutung liegt nahe, dass das Kasein nicht vollständig mit dem Kalkhydrat reagiert hat und daher noch wasserunlöslich war. Der hohe Druck im System zur Materialförderung kann dann zur Separierung des Wassers geführt haben. Um mehr Aufschluss über das Zusatzmittel zu erhalten, wurde der Hersteller Kreidezeit, telefonisch kontaktiert. Der Fachberater von Kreidezeit vermutet hingegen, dass es durch den hohen pH-Wert des Kalkhydrates und einem zu hohen Massenanteil zu einer Zersetzung der Eiweißstruktur und somit zu einer Separierung kam. In der Fachliteratur von Sutermeister findet man Angaben zu einem pH-Wert von max. 8.5, damit es nicht zu einer Zersetzung der Eiweißstruktur kommt [65, S. 2].

Um die genaue Ursache herauszufinden, sind jedoch weitere Untersuchungen und Messungen des pH-Wertes notwendig. Diese wurden hier nicht durchgeführt, da der Berater von Kreidezeit für die Anwendung im 3D-Drucker, aufgrund einer besseren Grünstandfestigkeit, das Anrühren mit Soda empfahl. Daraufhin wurde im zweiten Versuch 1,5 % Kasein mit 0,12 % Soda angerührt und circa 2 h unter mehrmaligem Umrühren stehen gelassen. Bevor das Kaseingemisch zu den Grundmaterialien hinzugegeben wird, muss es „schlankgerührt“ werden. Das heißt, dass sich unter schnellem Umrühren, die klebrige, leimartige Konsistenz des Kaseins verflüssigt. Mit dieser Konsistenz kann das Kasein anschließend leichter mit den Grundmaterialien homogenisiert werden. Die zweite Mischung war im Vergleich zur ersten Mischung pastöser und ließ sich gut drucken. Durch die helle Farbe des Kaseinpulvers kommt es zu keinen merklichen Farbunterschieden im Vergleich zu den anderen Proben.

Abbildung 30: Anrühren von Kasein & Soda im Mixer

Die verwendeten Mischungen mit und ohne Additive sind in der nachstehenden Tabelle mit den Nass- und Trockendichten aufgelistet.

Mischungszusammensetzungen in [%]				
	ohne Additive	mit 0,4 % Holzfasern	mit 1,23 % Holzfasern	mit 1,5 % Kasein
Claytec Lehmpulver 10.101	70,00	67,19	67,62	66,05
Quarzsand 0,1-0,3 mm	12,50	12,00	12,07	11,79
Trockenmasse	82,50	79,19	79,69	77,85
Wasser	17,50	20,40	19,08	20,52
Additiv: Holzfasern	-	0,41	1,23	-
Additiv: Kasein	-	-	-	1,51
Alkali: Natriumcarbonat Na_2CO_3	-	-	-	0,12
Gesamte Masse ∑	100,00	100,00	100,00	100,00
Nassdichte in [g/cm^3]	1,63	1,63	1,74	1,51
Trockendichte in [g/cm^3]	1,42	1,43	1,39	1,36

Tabelle 6: Mischungszusammensetzungen in [%] mit Nass- u. Trockendichte in [g/cm^3]

Um die Dichte der Lehmmischungen zu berechnen, wurden Schalungen aus einem Kunststoff 3D-Drucker erstellt und diese mit dem Material befüllt. Diese wurden durch Fingerdruck verdichtet, gewogen und durch das Volumen geteilt. Die Dichte der verschiedenen Materialmischungen wurde anschließend in der Slicer-Software angegeben, um den Materialbedarf grob abschätzen zu können.

Für weitere Forschungszwecke müssen noch mehr Mischungen ausprobiert werden, um die wirklich idealen Mischungsverhältnisse und den idealen Wassergehalt zu bestimmen. Der ideale Wassergehalt für eine mechanische Verdichtung ist der, bei dem die Proctordichte erreicht wird. „Die Proctordichte ist die größte, mit einer volumenbezogenen Verdichtungsarbeit von W ≈ 0,6 MNm/m erreichbare Trockendichte“ [DIN 18127, 66, S. 6]. Sehr wahrscheinlich kann die Proctordichte bei einem fließ- und pumpfähigen Material nicht erreicht werden, aber es kann versucht werden, sich an die Proctordichte heranzutasten. Ein Projekt der Universität Adelaide, Australien verwendete für Ihr Extrusionsverfahren eine vergleichsweise ähnliche Mischung mit einem durchschnittlichen Wassergehalt von 25 %, 2 % Strohanteil und 73 % lehmiger Boden [59].

4.4 Geometrie

Bei der Geometriefindung der Prüfkörper wurde der Würfel als eine gängige Prüfkörperform gewählt. Es wurde sich gegen einen Zylinder entschieden, da man nicht wusste, wie sich die Grünstandfestigkeit der Materialien während des Druckens verhält. Hierfür wäre die Form eines Zylinders aufgrund seiner Höhe ungünstiger gewesen. Zudem hätte sich die Druckzeit bei gleicher Grundfläche erhöht. Für die Dimensionierung der Prüfkörper war nicht die Größe des Druckbettes mit einem Durchmesser von 20 cm ausschlaggebend, die Größe des Würfels ergab sich vielmehr durch das Füllmuster. Das Muster sollte gut druckbar und erkennbar sein. Der Würfel sollte trotzdem nicht zu groß sein, um kurze Druckzeiten zu erhalten und um die Wahrscheinlichkeit eines Eintretens eines Druckfehlers abzumindern. Da man sich die Vorteile des 3D-Druckes zu Nutze machen wollte, war klar, dass man nicht vollflächig drucken wird, sondern mit einem Infill-Muster. (Die Prüfkörper mit 100 % Infill wurden nur zum Vergleich gedruckt). Bei der Wahl des Infills wurde sich vorerst an den standardisierten Infill Mustern von Kunststoff 3D-Druckern orientiert. Interessant waren hier das Kubisch-Infill und das Bienenwaben-Infill. Das Kubisch-Infill ist aus Würfeln aufgebaut, die mit einer Ecke nach unten ausgerichtet sind. Auf diese Weise entstehen zahlreiche Lufteinschlüsse, welche zur Wärmedämmung dienen und für die Baubranche durchaus interessant wären. Das Bienenwaben-Infill ist ein aus Sechsecken bestehendes Gitter. Sein großer Vorteil liegt in der guten Stabilität und optimalen Pfade ohne Kreuzungen. Als Nachteil zählt man einen höheren Materialverbrauch und Druckzeit als bei anderen Infill-Mustern üblich [67]. Da es bei den hier durchgeführten Versuchen aber primär um die Prüfung der Druckfestigkeiten geht, wurde das Bienenwaben-Infill gewählt.

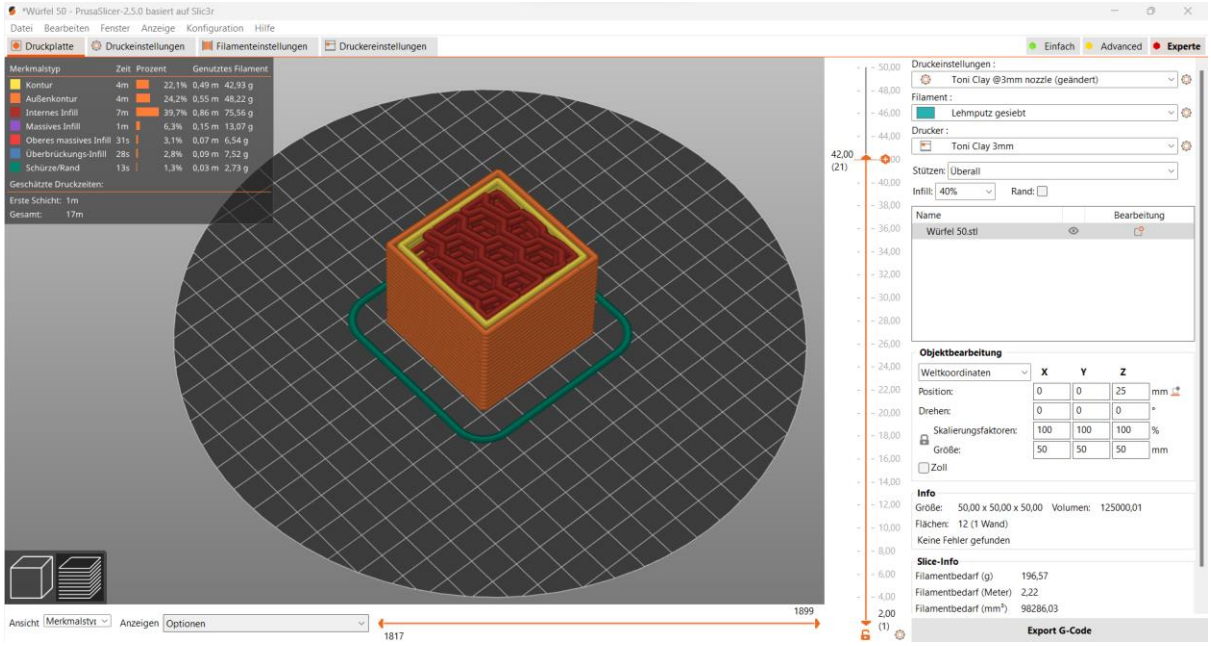


Abbildung 31: PrusaSlicer 2.5.0 Erstellung des G-Codes mit Bienenwaben-Infill

Die Prüfkörper sind aus je 25 Lagen mit 2 mm Höhe aufgebaut. Die ersten beiden Grundschichten und die letzten beiden Deckschichten wurden massiv mit 100 % geradlinigem Infill gedruckt. Massive Flächen bleiben besser am Druckbett haften als einzelne seitlich freiliegende Linien. Bei der Deckschicht sorgen die massiven Schichten für eine gleichmäßigere und ebenere Oberfläche.

4.5 Herstellung der Lehmprüfkörper

Die ersten Schichten sind beim Drucken die schwierigsten. Die Filamentlinien müssen am Druckbett haften bleiben und eventuelle Unebenheiten der MDF-Platte mit der Lehmschlämme müssen ausgeglichen werden. Zudem muss je nach Konsistenz der Mischung beim Anfahren der Luftdruck angepasst werden. Hierfür dient die im 3D-Druck sogenannte „Schürze“, welche einen gedruckten Umriss um das Modell bildet und die Zeit bietet den Luftdruck anzupassen, bevor das eigentliche Modell gedruckt wird. In Abbildung 31 ist die Schürze als grüne Linie dargestellt. Je fester die Konsistenz, desto höher muss auch der Luftdruck gewählt werden, damit der Durchfluss durch die Düse gleichbleibt und ein konstantes Druckbild erzeugt werden kann. Wird zu wenig Material gefördert, kann dies zu Unterbrüchen der Filamentlinien führen und schließlich zu einem Stabilitätsverlust. Verliert der Drucker dadurch den Anschluss an die darunter liegenden Schichten, druckt er in der Luft und es entstehen formlose Linien (Abbildung 32, Bild 1). Um eine konstante Extrusionsmenge zu erhalten, muss der Luftdruck manuell gesteuert werden.

Dieselbe Erkenntnis zog Gomaa et al. von der RMIT-Universität in Australien bei seinen Praxisversuchen mit pneumatischer Förderung [59]. Ist das Material zu flüssig, wölben sich die zu breiten Filamentlinien seitlich nach außen, der Querschnitt verbreitert sich und das überschüssige Material bleibt am Düsenkopf hängen. Durch einen zu hohen Wassergehalt wird außerdem die Grünstandfestigkeit deutlich verringert und die Schichten sacken durch die Schwerkraft nach unten ab. Auffällig war auch der erhöhte Lufteinschluss im Schlauch während des Druckvorgangs. Bei zu großen Lufteinschlüssen konnten diese meist nicht mehr über die vorgesehene Entlüftung (Abbildung 26, Extruder) entweichen, sondern traten schlagartig durch die Düse aus und brachten Löcher in die Schicht ein (Abbildung 32, Bild 4). In der folgenden Abbildung sind die typischen Druckfehler bei der Herstellung dargestellt. Es handelt sich hierbei um die ersten durchgeführten Versuche an den Prüfkörpern mit einer Kantenlänge von 10 cm.

Abbildung 32: Druckfehler der ersten Versuche mit Prüfkörper der Kantenlänge 10 cm

Im ersten Versuch wurden die Prüfkörper mit einer Kantenlänge von 10 cm gedruckt, was zu deutlich mehr Druckfehlern und Abbrüchen führte. Daraufhin wurden die Prüfkörper nur halb so groß gedruckt, wodurch die Druckzeit von 1h 19min 24s auf 15 min 24s gesenkt werden konnte. Das entspricht etwa fünf Prüfkörper in der gleichen Zeit.

Die Prüfkörper ohne Additive ließen sich mit der richtigen Mischung aus Lehm, Sand und Wasser gut drucken. Hin und wieder kam es zu unterschiedlich breiten Filamentlinien, selten auch zu Unterbrüchen. Beim Druck mit Holzfasern kam es vor allem bei den Prüfkörpern mit 1,23 % Holzfasern zu vielen kleinen Unterbrüchen und zu einem allgemein sehr ungleichmäßigen Druckbild. Das gleichmäßigste Druckbild erhielt man mit Kasein.

Die Konsistenz des Materials mit Kasein war auffällig klebrig in den Händen, begann unter Druck aber zu fließen und trat als homogene pastöse Masse aus der Düse aus. Es ließ sich nahezu ohne Unterbrüche drucken. An manchen Stellen kam es beim Übergang des Absetzens der Filamentlinie und des Anfahrens zu einem neuen Koordinatenpunkt zu leichten Abhebungen der Filamentlinien. Dies konnte durch die nächste Schicht aber wieder ausgeglichen werden.

In nachstehender Abbildung ist je ein Prüfkörper mit den drei unterschiedlichen Mischungen während dem Druck dargestellt.

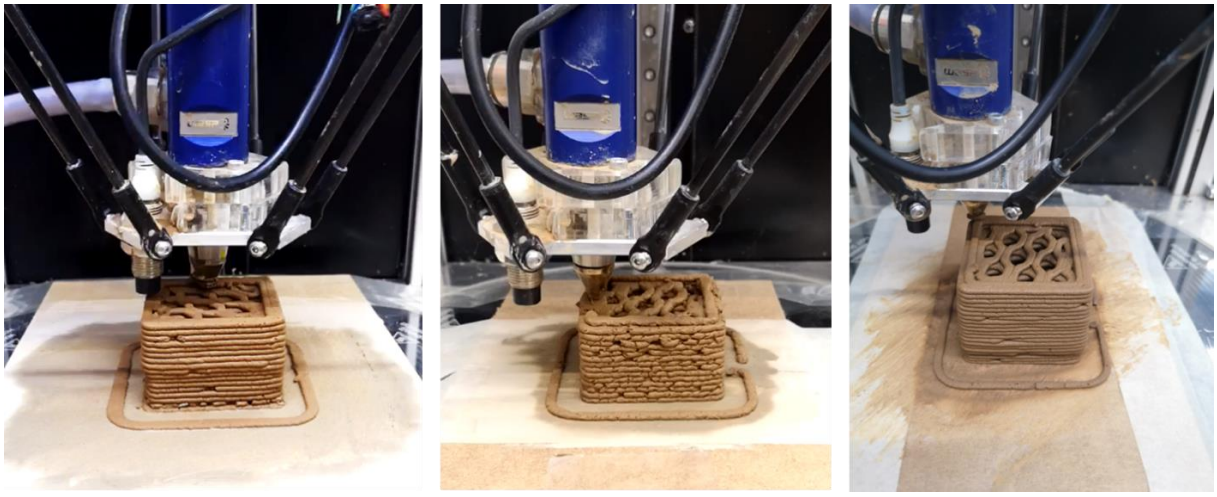


Abbildung 33: Druck der Prüfkörper (von links: ohne Additiv, mit 1,23 % Holzfasern, mit 1,5 % Kasein)

Die Druckparameter für die Druckgeschwindigkeit und den Luftdruck mussten je nach Material angepasst werden. Bei pastösem Material konnte die Druckgeschwindigkeit erhöht und der Luftdruck gesenkt werden. Bei festem, schlecht fließfähigem Material wurde die Druckgeschwindigkeit herabgesetzt und der Luftdruck erhöht. Die Druckgeschwindigkeit betrug zwischen 20 und 26 mm/s, der Luftdruck schwankte zwischen 4 und 6 bar. Die Herstellung der vollflächig gedruckten Prüfkörper mit 100 % geradlinigem-Infill unterschied sich kaum zu den mit Hohlräumen gedruckten. Primär erhöhten sich die Druckzeit sowie die benötigte Masse. Zudem musste der Durchfluss bzw. der Luftdruck etwas herunter gefahren werden, da die Linien und schließlich die Prüfkörper sonst zu breit geworden wären. Anders als bei den 40 % Infill Prüfkörper gibt es keine Hohlräume zum Ausgleich.

Abbildung 34: Prüfkörper mit 100 % geradlinigem-Infill (ohne Additiv VD2)

Um zu untersuchen, ob und wie sich die Druckfestigkeiten von einem 3D gedruckten und einem in Schalung hergestellten Bauteil unterscheiden, wurden zusätzlich zu den gedruckten Prüfkörpern je Mischung ein Prüfkörper in Schalung hergestellt. Bei dem mit Kasein hergestellten Prüfkörper in der Schalung bildeten sich netzartige Schimmelpilze auf der Oberfläche und es begann stark zu riechen. Durch die Kunststoffschalung konnte der massive Prüfkörper nicht schnell genug trocknen.

Abbildung 35: Ansiedlung von Schimmelpilzen auf Kasein Prüfkörper nach Ausschalen

Nach dem Druck der Prüfkörper wurden deren Oberflächen noch im feuchten Zustand geglättet.

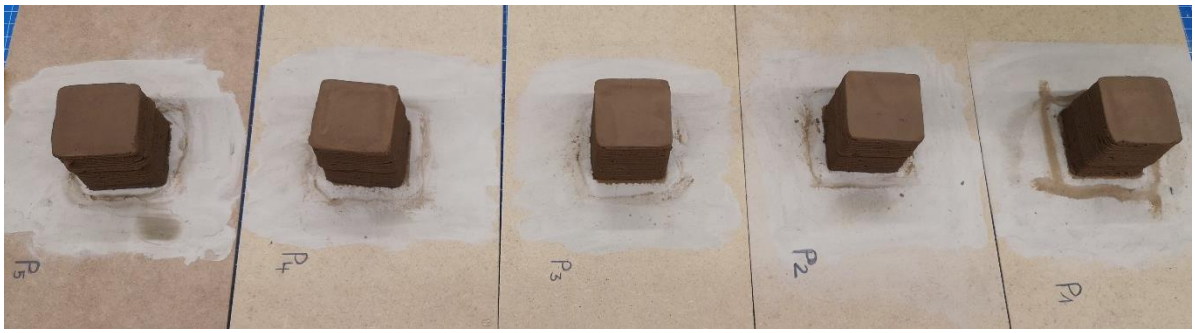


Abbildung 36: Versuchsreihe P1-P5 ohne Additiv geglättet

Die zwischen 193 g (40 % Infill) und 269 g (100 % Infill) schweren und feuchten Prüfkörper wurden circa eine Woche bei Innenraumklima getrocknet, bevor sie mit einem feinen Schleifpapier geschliffen wurden, um eine zueinander ebenflächige Grund- und Deckfläche zu erzeugen.

Die Abmessungen wurden im feuchten und trockenen Zustand gemessen und darüber die Schwindmaße der Prüfkörper in Prozent ermittelt. Mit Ausnahme des mit 1,23 % hergestellten Prüfkörpers in der Schalung, ergaben sich bei allen Prüfkörpern in z-Richtung die größten Schwindmaße aufgrund des Eigengewichtes, welche im Durschnitt circa 30 % höher sind als in x- und y-Richtung. In x- und y-Richtung sind die Schwindmaße meist ähnlich. Sehr wahrscheinlich sind die niedrigeren Schwindmaße in z-Richtung bei dem Prüfkörper mit 1,23 % auf die Stabilisierungswirkung der Fasern und die Schalung zurückzuführen, welche dafür gesorgt hat, dass die Feuchtigkeit nur nach oben austreten kann. Bei den 40 % Infill Prüfkörpern ohne Additive beträgt das Schwindmaß durchschnittlich in alle Richtungen 1,97 %. Die Prüfkörper mit 0,14 % Holzfasern kommen auf deutlich mehr mit 3,96 %. Mit 1,23 % Holzfasern kann der Schwindprozess hingegen auf 1,77 % gesenkt werden. Die Prüfkörper mit Kasein sind am meisten vom Schwinden betroffen mit einem durchschnittlichen Schwindmaß von 4,11 %, was vermutlich auf einen leicht erhöhten Wassergehalt zurückgeführt werden kann. Bei den vollflächig gedruckten und in Schalung hergestellten Prüfkörpern kommt es unabhängig von den Additiven bei allen Prüfkörpern durchschnittlich zu 30 % höheren Schwindmaßen. Die genauen Schwindmaße der einzelnen Prüfkörper können dem Anhang C: i. Vergleich der Schwindmaße entnommen werden.

4.6 Durchführung der Druckversuche

Die Druckversuche wurden im Baustoffprüflabor der HTWG Konstanz unter Einweisung und Unterstützung des Laborpersonals durchgeführt. Für die Durchführung der Druckversuche sowie der Lagerung der Prüfkörper wurde sich an der DIN 18945 für Lehmsteine orientiert. Die Prüfkörper sollen laut Lehmsteinnormung bei 23 °C und einer relativen Luftfeuchte von 50 % bis zur Massekonstanz gelagert werden. Die Massekonstanz gilt als erreicht, wenn zwischen der ersten und der zweiten Wägung innerhalb eines Zeitraumes von 24 h, die Ergebnisse der Masse nicht mehr als 0,2 % bezogen auf den kleineren Messwert voneinander abweichen [68, S. 14]. Die Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Lehmbauteilen, sind stark abhängig von der vorherrschenden Materialfeuchte und werden im Wesentlichen über die relative Luftfeuchte bestimmt. Dies zeigen Versuche von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Berlin und der Technischen Universität Darmstadt mit Lehmmauerwerk. Eine Erhöhung der rel. Luftfeuchte bei den geprüften Lehmbausteinen von 50 % auf 80 % führte zu einer Abminderung der Druckfestigkeit um 20-35 % sowie zu einer Abminderung des Elastizitätsmoduls von 25-45 % [69, S. 10]. Daher ist es unumgänglich, die Prüfkörper in einem Klimaschrank zu lagern und die Lagerungsbedingungen zu überwachen. Um die Anforderungen an die Lagerung einzuhalten, wurden die Prüfkörper nach dem Druck ca. eine Woche bei normalen Innenraumbedingungen luftgetrocknet und anschließend in einem Wärmeschrank bei 23 °C gelagert. Die relative Luftfeuchte konnte nicht automatisch durch den Wärmeschrank reguliert werden und musste durch das Hineinstellen einer Wasserschale angepasst werden. Gemessen wurden Temperatur sowie Luftfeuchte über ein separates Messgerät, welches mit im Wärmeschrank platziert wurde.

Abbildung 37: Wärmeschrank mit Prüfkörpern, Wasserschalen und Messgerät

Die Temperatur kann bis auf ± 0,5 °C eingehalten werden. Die relative Luftfeuchte schwankt um ±10 % und kann durch äußere Einflüsse, wie die Arbeiten im Baustoffprüflabor leicht beeinflusst werden. Die Aufnahmewerte, welche durch das Öffnen der Türe entstanden wurden im folgenden Diagramm vernachlässigt, da sie durch ihre Kürze kaum einen Einfluss auf die Prüfkörper haben. Die Prüfkörper wurden alle für mindestens sieben Tage im Wärmeschrank gelagert und nacheinander aus dem Wärmeschrank entnommen, um möglichst lange die Lagerungsbedingungen beibehalten zu können. Die Temperatur bei Entnahme betrug 23,3 °C bei einer rel. Luftfeuchte von 52,7 %.

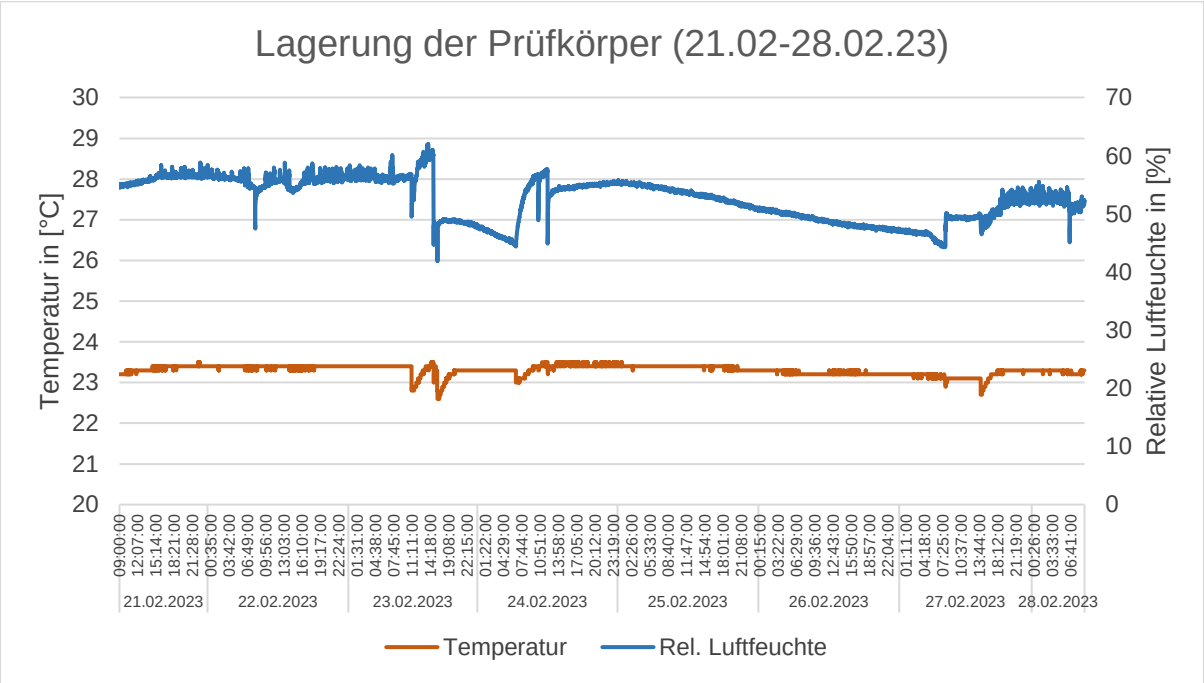


Abbildung 38: Messdaten der Lagerung der Lehmprüfkörper

Die Massekonstanz konnte bis auf drei Prüfkörper eingehalten werden. Bei einem Prüfkörper mit Kasein und bei zwei Prüfkörpern mit Holzfasern wurde die Toleranz mit max. 0,17 % leicht überschritten. Da sich dies bei den Ergebnissen der Druckfestigkeiten nicht auffällig bemerkbar machte, wurden die Prüfkörper im folgenden Verlauf mit in der Auswertung berücksichtigt. Die Auswertungen der Massekonstanz befindet sich im Anhang C: k. Massekonstanz.

Vor der Durchführung der Druckfestigkeitsprüfung wurden die Grund- und Deckflächen der Prüfkörper auf ihre Ebenheit geprüft. Dies erfolgte über ein spezielles Haarlineal und einem 0,1 mm dickem Metallblättchen. Passte das Metallblättchen unter dem Lineal hindurch wurde dies im Einzelfall notiert und bei der Auswertung der Ergebnisse berücksichtigt.

Die Ebenheit der Prüfkörper ist für eine gleichmäßige Belastung der Fläche notwendig. Abweichungen von einer planparallelen Oberfläche sind im Anhang C: I. Auswertung der Druckversuche aufgeführt.

Abbildung 39: Prüfung der Ebenheit mit Haarlineal

Die verwendete Druckprüfmaschine arbeitet mit der Genauigkeit nach DIN EN ISO 7500-1, mindestens der Klasse 2 und kann eine maximale Prüfkraft von 100 kN aufbringen. Die Prüfkörper wurden bis zum Bruch belastet und darüber hinaus, bis keine Laststeigerung mehr zu erkennen war. Die Maschine wurde weggesteuert mit 0,6 mm/min gefahren, um auch bei kleinen Druckfestigkeiten aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Die konstante Belastungsgeschwindigkeit, mit welcher der Kolben auf die Prüfkörper drückt, wurde anhand von zwei Testkörpern ermittelt. Damit die Ergebnisse miteinander vergleichbar sind, ist es wichtig, dass der Bruch innerhalb von 30 s bis 90 s eintritt [68, S. 14]. Eine zu große oder zu kleine Belastungsgeschwindigkeit wirken sich je nach Materialeigenschaften unterschiedlich auf die Druckfestigkeiten aus.

4.7 Auswertung der Ergebnisse

Insgesamt wurden 28 Prüfkörper auf ihre Druckfestigkeiten getestet. Die vier Versuchsreihen mit 40 % Bienenwaben-Infill bestehen aus je fünf Prüfkörpern. Die restlichen acht Prüfkörper ergeben sich aus den mit 100 % geradlinigem Infill und den in Schalung hergestellten Prüfkörpern. Die Druckfestigkeiten berechnen sich aus dem Quotienten der gemessenen Höchstkraft F_{max} und den jeweiligen Querschnittsflächen. Da der Druckvorgang noch nicht präzise genug ist, um kontinuierlich ein einheitliches Druckbild herzustellen, entstehen durch unterschiedlich breite Filamentlinien leicht unterschiedliche Querschnittsflächen, welche je Prüfkörper an mehreren Stellen gemessen und gemittelt wurden. Zudem kann der Schwindvorgang zusätzlich zu Abweichungen der Querschnittsflächen führen.

In folgendem Säulendiagramm werden die Druckfestigkeiten der Prüfkörper mit 40 % Bienenwaben-Infill und die Auswirkungen unterschiedlicher Additive miteinander verglichen.

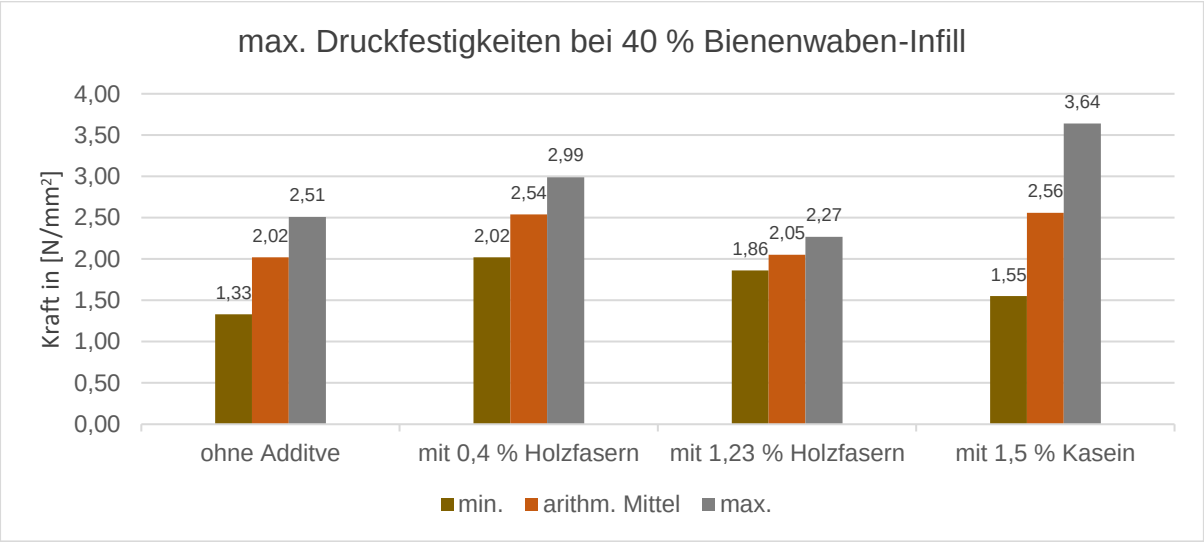


Abbildung 40: max. Druckfestigkeiten bei 40 % Bienenwaben-Infill mit und ohne Additive

Die Prüfkörper ohne Additve weisen eine gemittelte Druckfestigkeit von 2,02 N/mm² auf. Der kleinste gemessene Wert lag bei 1,33 N/mm², der größte bei 2,51 N/mm². Die Prüfkörper zeigten überwiegend Risse an den Ecken mit teilweise leichten Abbröckelungen. Die Prüfungen zeigten, dass durch die Stabilisierung mit 0,4 % Holzfasern oder 1,5 % Kasein die Druckfestigkeiten um ca. 20 % erhöht werden konnten. Bei den Prüfkörpern mit 1,23 % Holzfasern zeigte sich hingegen keine Verbesserung, was sehr wahrscheinlich darauf zurückzuführen ist, dass durch den höheren prozentualen Anteil an Fasern die Kontinuität des Druckens nicht mehr möglich war und der Verbund zwischen Fasern und dem Lehmgemisch nur noch eingeschränkt gegeben war. Auffällig bei der Auswertung der Kasein Prüfkörpern

sind die im Vergleich zu den anderen Versuchsreihen großen Schwankungen vom Minimum zum Maximum-Messwert. Woher diese starken Streuungen kommen, müsste in weiteren Forschungsschritten untersucht werden. Möglich wäre eine ungleichmäßige Durchmischung von Lehm mit Kasein oder eine zu langsame Trocknung, die dafür gesorgt haben könnte, dass das hinzugesetzte Alkali (Soda) angefangen hat, das Eiweiß zu zersetzten und damit die Stabilisierungswirkung bei manchen Prüfkörpern stärker oder schwächer war. Die Kasein Prüfkörper zerfielen in auffälliger Weise während der Druckprüfung, die Prüfkörper schnürten sich ein und die Seitenflächen platzten ab, was ein Anzeichen für ein sprödes Materialverhalten ist.

Im zweiten Teil der Auswertung werden die unterschiedlichen Füllgrade der Prüfkörper miteinander verglichen. Ein Teil der Proben wurde mit 100 % geradlinigem Infill Muster gedruckt, der andere Teil wurde nicht gedruckt, sondern mit Fingerdruck in einer Schalung verdichtet. Beide Vollquerschnitte werden in der nachfolgenden Tabelle den Prüfkörpern mit 40 % Bienenwaben-Infill gegenübergestellt. Da keine Prüfkörper mit 0,4 % Holzfasern als Vollquerschnitte hergestellt wurde, werden im anschließenden Säulendiagramm nur drei Mischungen miteinander verglichen.

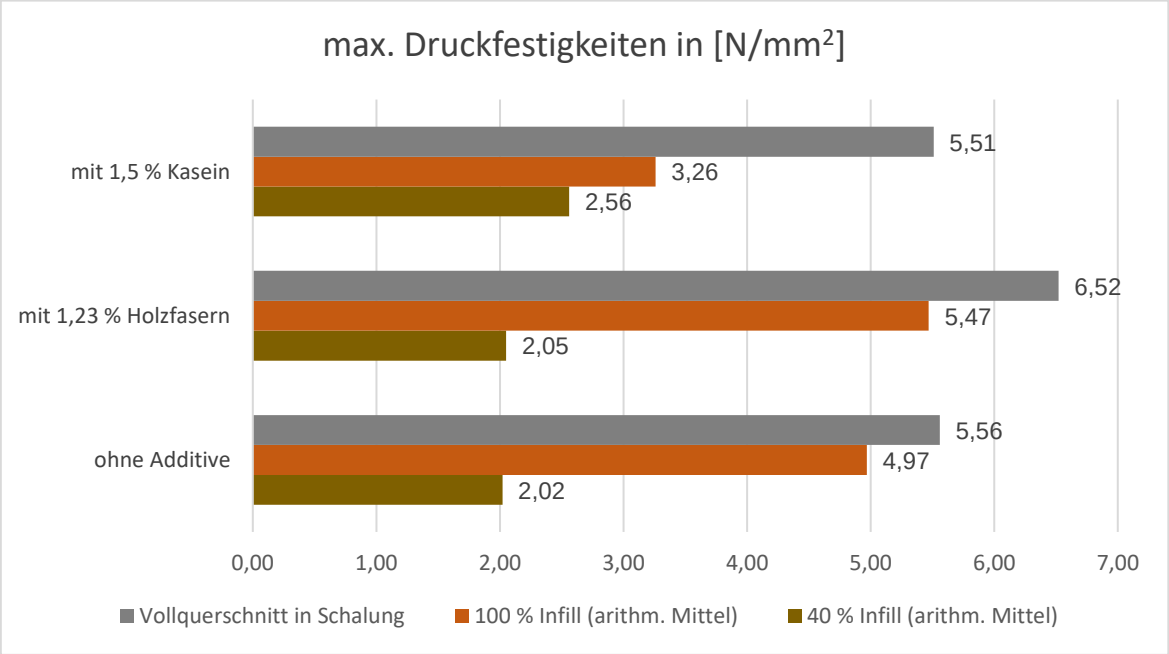
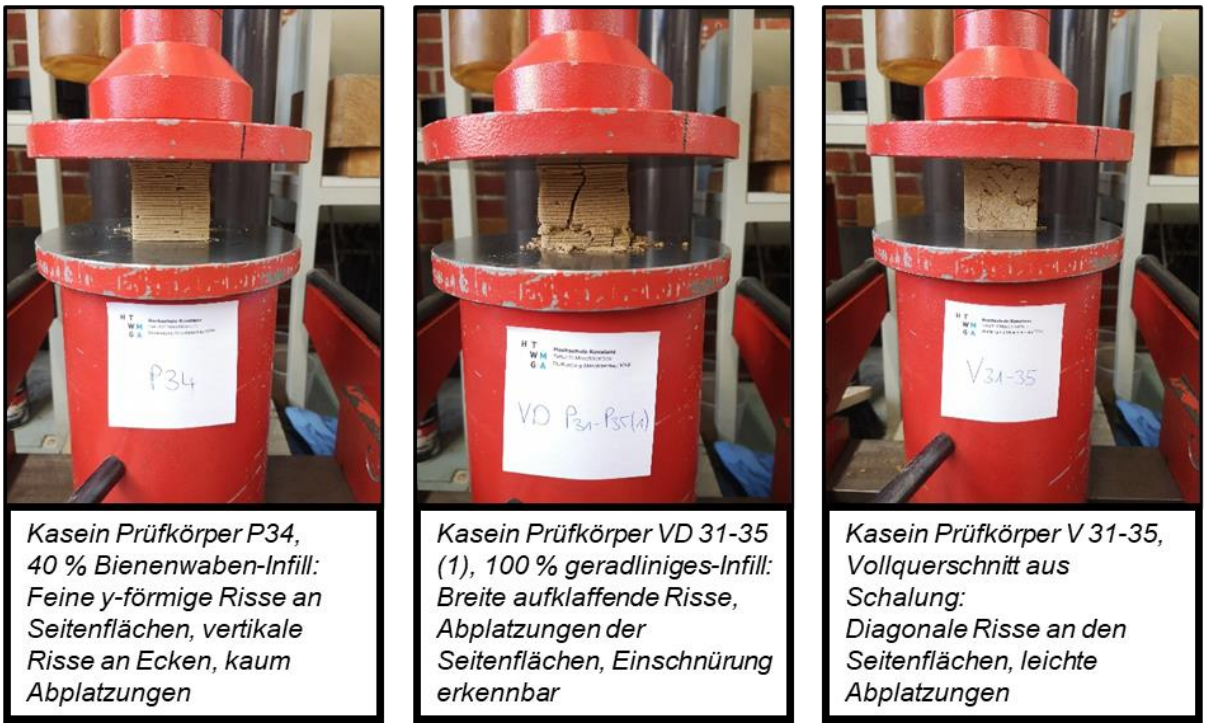


Abbildung 41: max. Druckfestigkeiten der Prüfkörper unterschiedlicher Füllgrade

Beim Vergleich der 100 % Infill Prüfkörper mit den 40 % Infill Prüfkörpern lässt sich ein linearer Anstieg der Druckfestigkeit im Vergleich zur Querschnittsfläche verzeichnen. Mit Ausnahme der Kasein Prüfkörpern, bei denen es allgemein wie bereits im ersten Teil der Auswertung beschrieben, zu größeren Streuungen kommt. Die Vollquerschnitte, welche in der Schalung

hergestellt und durch Fingerdruck verdichtet wurden, haben eine 11-16 %ige höhere Druckfestigkeit als die gedruckten Vollquerschnitte. Ausnahme sind auch hier wieder die Kasein Prüfkörper mit einer 41 %igen höheren Druckfestigkeit beim Vollquerschnitt in Schalung. In folgender Abbildung werden die Rissbilder der Kasein Prüfkörper beschrieben.



Kasein Prüfkörper P34, 40 % Bienenwaben-Infill: Feine y-förmige Risse an Seitenflächen, vertikale Risse an Ecken, kaum Abplatzungen

Kasein Prüfkörper VD 31-35 (1), 100 % geradliniges-Infill: Breite aufklaffende Risse, Abplatzungen der Seitenflächen, Einschnürung erkennbar

Kasein Prüfkörper V 31-35, Vollquerschnitt aus Schalung: Diagonale Risse an den Seitenflächen, leichte Abplatzungen

Abbildung 42: Prüfkörper mit Kasein nach Druckversuchen in der Druckpresse

Das folgende Kraft-Weg Diagramm zeigt den Kraftverlauf während den Druckversuchen der Versuchsreihe P1-P5 der Prüfkörper ohne Additive.

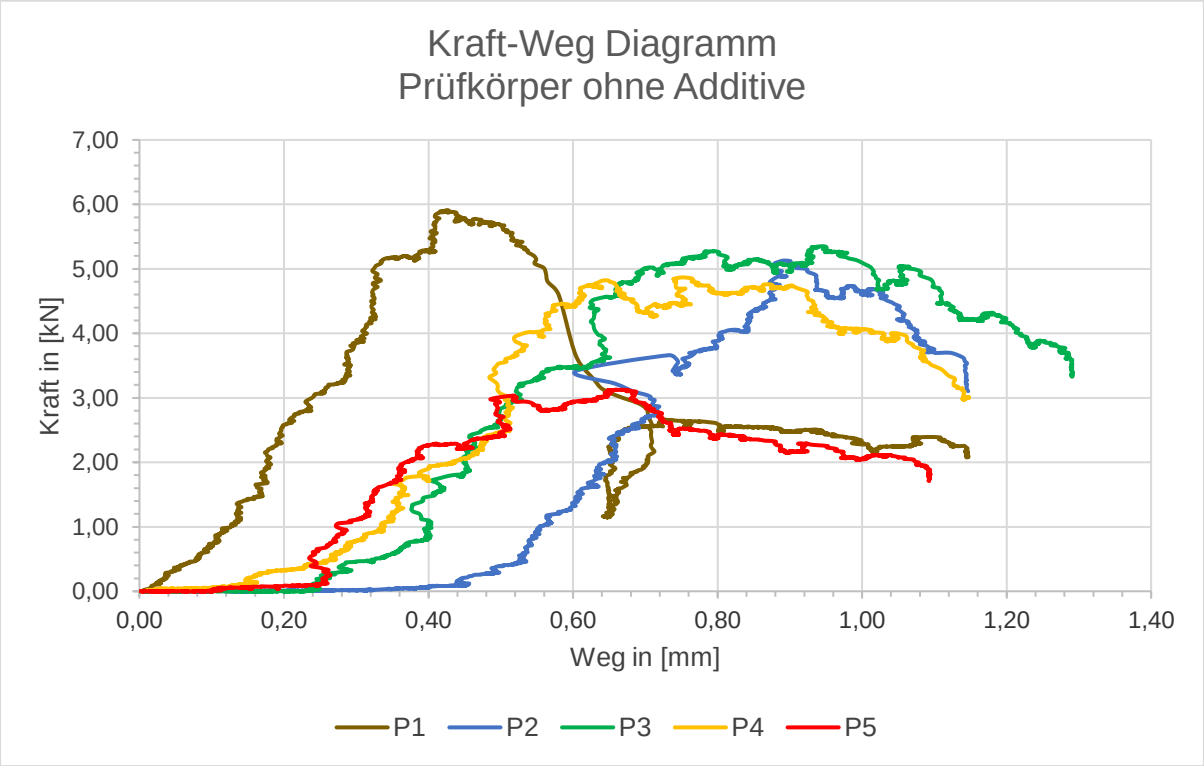


Abbildung 43: Kraft-Weg Diagramm, Prüfkörper ohne Additive, Versuchsreihe P1-P5

Anhand des Diagrammes lassen sich die noch großen Streuungen des Druckprozesses erkennen, welche sich auf die Druckfestigkeiten auswirken. Die Prüfkörper P3 und P4 verhalten sich bereits ähnlich und weisen einen leicht versetzten Verlauf auf. Der „zittrige“ Verlauf der Kurven ist auf eine sehr hohe Aufzeichnungsrate in Verbindung mit der Wegsteuerung zurückzuführen. Die Hysterese-Schleife bei P1 lässt sich nicht mit der Messgenauigkeit erklären. Hier hat die Maschine die Kraft offenbar zurückgefahren und dann wieder aufgebracht. Eine Hysterese hat einen Verlauf, dass mit abnehmender Kraft auch der Weg abnimmt. Der Weg vergrößert sich beim Wiederanfahren der Druckkraft anschließend wieder. Das Auftreten der Hysterese-Schleife ist hier auf die Steuerung der Maschine abzuleiten.

Nachfolgend das Kraft-Weg Diagramm der Prüfkörper mit den unterschiedlichen Additiven. Dargestellt ist der Verlauf der Prüfkörper dessen Höchstkraft am nächsten am arithmetischen Mittelwert der jeweiligen Versuchsreihe liegt.

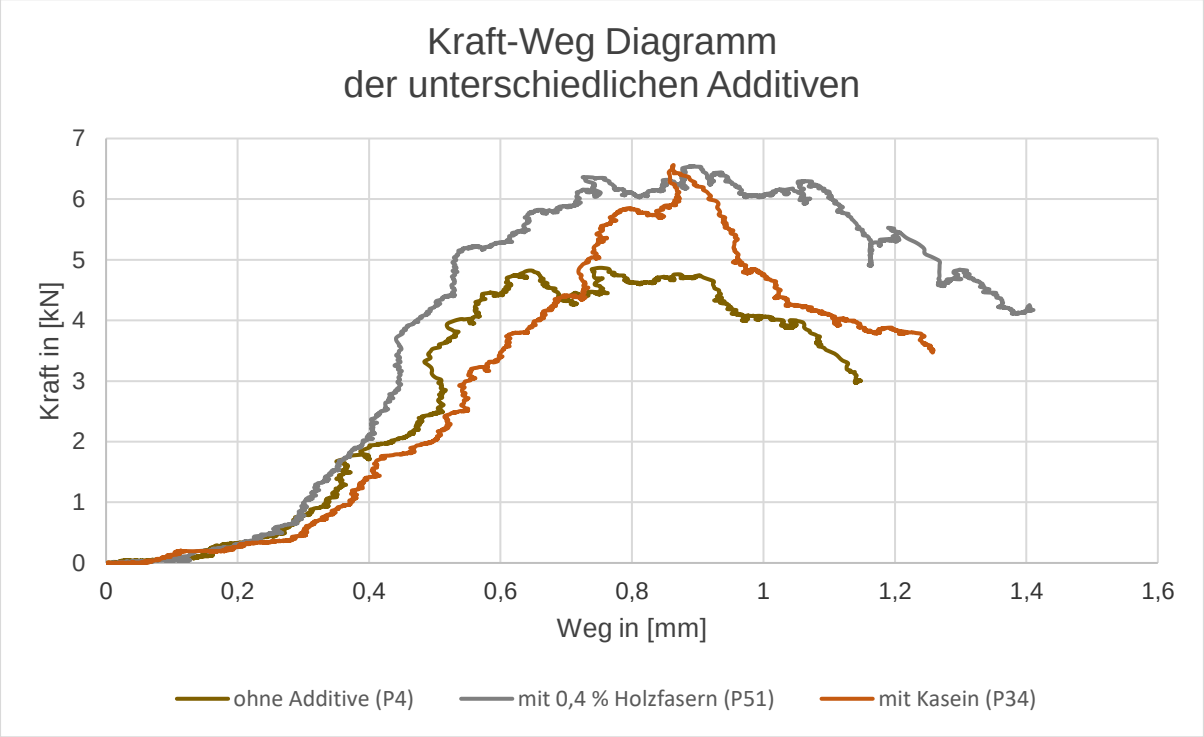


Abbildung 44: Kraft-Weg Diagramm der Prüfkörper mit den unterschiedlichen Additiven

Der Verlauf ohne Additive und mit Holzfasern ist ähnlich nur leicht versetzt. Auffällig bei den Kraft-Weg Diagrammen mit Kasein ist die Spitze beim Erreichen der Höchstkraft und das schnelle Abfallen der Last danach, was für eine gute Standzeit im Brandfall eher ungeeignet wäre.

Das nächste Kraft-Weg Diagramm zeigt als Übersicht den Verlauf der Prüfkörper mit unterschiedlichen Additiven und Füllgraden. Dabei sind die Prüfkörper mit 40 % Infill in Brauntönen, die Prüfkörper mit 100 % Infill mit Blautönen und die Prüfkörper aus der Schalung in Grüntönen dargestellt.

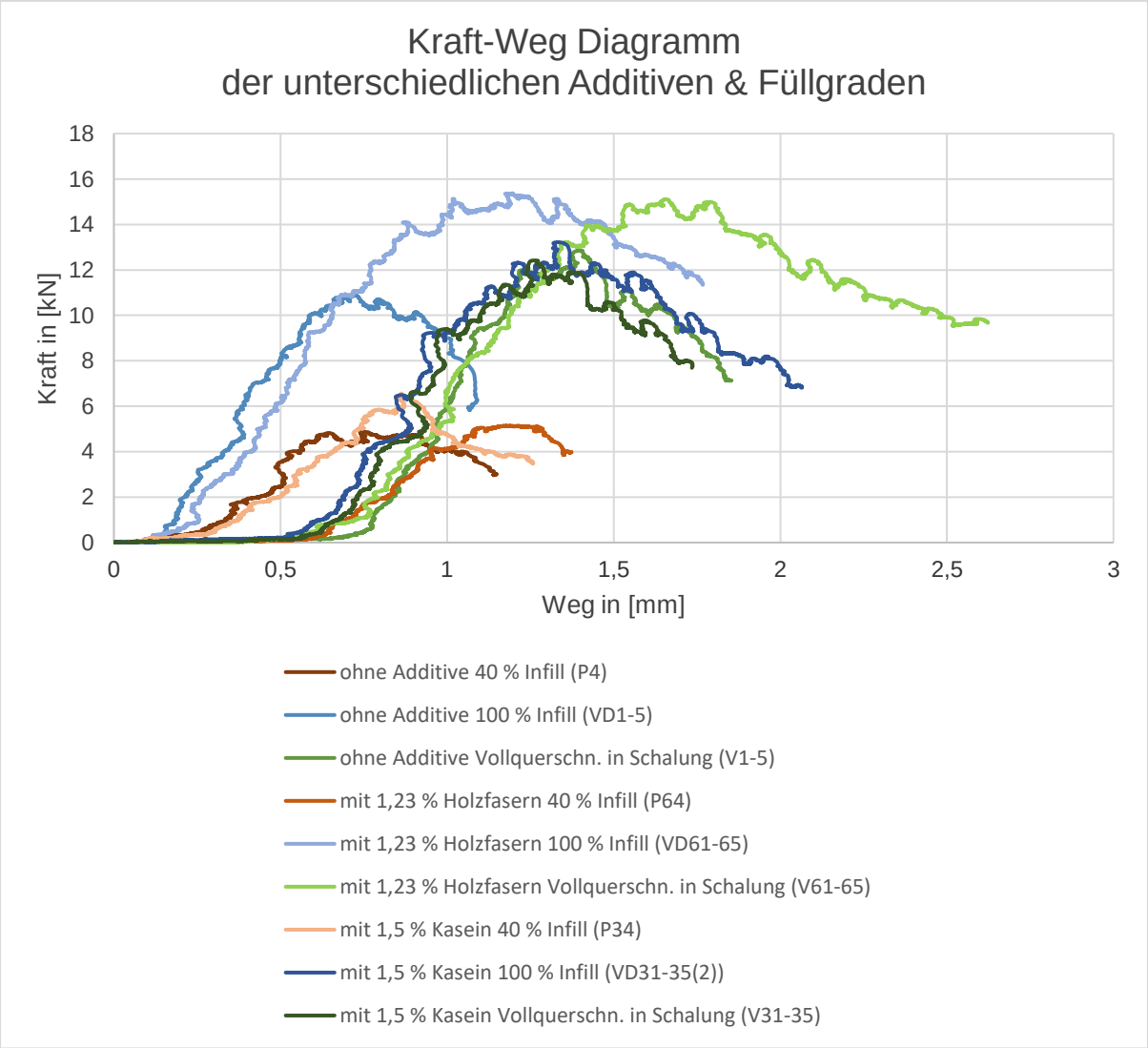


Abbildung 45: Kraft-Weg Diagramm der unterschiedlichen Additiven & Füllgraden

Die Vollquerschnitt Prüfkörper mit 1,23 % Holzfasern erreichen unabhängig von der Art der Herstellung (Druck oder Schalung) Höchstkräfte von knapp über 15 kN. Tendenziell liegen die Höchstkräfte bei den in der Schalung hergestellten Prüfkörpern jedoch leicht über den der mit 100 % Infill gedruckten Prüfkörpern, unabhängig von den Additiven. Die Kraft-Weg Diagramme aller Prüfkörper befinden sich im Anhang C: m. Kraft-Weg-Diagramme.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass durch die Wahl effizienter, nachhaltiger Additive in der richtigen Menge ähnliche Druckfestigkeiten wie beim Stampflehmbau (2,4 N/mm^2 nach Martin Rauch [9, S. 131]) erreicht werden können. Auch mit dem Mauerwerksbau können die

3D gedruckten stabilisierten Prüfkörper konkurrieren. Die Druckfestigkeiten sind bspw. vergleichbar mit der charakteristischen Druckfestigkeit eines Hochlochziegels der Steindruckfestigkeitsklasse 4 und einer Mörtelklasse M5 mit 2,4 N/mm [60]. Kasein eignet sich als Zusatzmittel in dickwandigen Bauteilen nicht, es bilden sich netzartige Schimmelpilze bei zu langsamer Trocknung. Die Holzfasern hingegen bieten sich als regional vorhandener und effizienter Zusatzstoff an. Zudem kann man bereits schon bei einem Massenanteil von 0,4 % eine Festigkeitssteigerung von 20 % erreichen. Die Holzfasern können aus Holzabfällen gewonnen werden. Weitere Forschung ist erforderlich im Bereich der Additive und mit einem größer skalierten 3D-Drucker mit konstanter Förderung und größeren Prüfkörpern. Es besteht die Vermutung, dass die Druckfestigkeit bei groß skalierten Wandbauteilen geringer ausfällt, da bereits die Prüfung zweier doppelt so großer Prüfkörper 40 % geringere Druckfestigkeiten erhielten. Dies könnte mit dem *Maßstabseffekt* erklärbar sein, der insbesondere bei heterogenen Baustoffen wie bei Beton und Mörtel sowie sehr wahrscheinlich auch bei Lehm extrem ausgeprägt ist. Der Maßstabseffekt ist die abnehmende Nenntragfähigkeit bei zunehmender Bauteilgröße geometrisch ähnlicher Bauteile [70, S. 4]. Je größer das Bauteil, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass Druckfehler oder Imperfektionen entstehen können, was sich in geringeren Druckfestigkeiten widerspiegelt. Die Untersuchungen an der Universität Bretagne in Lorient, Frankreich könnten diese Vermutung bestätigen. Bei ihren Untersuchungen an größeren unstabilisierten Prüfkörpern erhielten sie in etwa 4-fach geringere Druckfestigkeiten von 1,2 N/mm^2. Die Prüfkörper wurden über drei Lagen mit einem Düsendurchmesser von 35 mm vollflächig gedruckt und hatten eine Breite von 35 mm und eine Länge von 70 mm [61]. Für den *Maßstabseffekt* spielt unter anderem auch die Rissbildung und die damit verbundene Freisetzung von Energie im Bauteil eine große Rolle, die anhand unterschiedlich großer gedruckter Lehmprüfkörper erforscht werden muss. Ebenso sollten Untersuchungen in Kombination mit nachhaltigen Fließmittel wie bspw. Akaziengummi (Gummi Arabicum) erforscht werden, wodurch der Wassergehalt reduziert und die Druckfestigkeit nochmals gesteigert werden könnte. Der größte Einfluss auf die Druckfestigkeiten und maßgeblich für die noch großen Streuungen ist jedoch die inkonstante Förderung des Lehm 3D-Druckers. Mit einer anderen Fördertechnik wie z.B. einer Förderschnecke mit Elektromotor könnte das Problem in Zukunft gelöst oder zumindest minimiert werden. Durch die großtechnische Skalierung eines Lehm 3D-Druckers kann es jedoch noch zu weiteren Schwierigkeiten bei der Präzisierung der Förderung und einem konstanten Durchfluss kommen. Generell stehen dem Lehm 3D-Druck noch viele Herausforderungen und Schwierigkeiten für eine Vorfertigung auf der Baustelle bevor. Die Stampflehmfertigung zeigt sich hingegen in der Nutzwertanalyse sowie durch die Ergebnisse des praktischen Teils als zukunftsfähiges Fertigungsverfahren mit Low-Tech Charakter.

5 Bauablauf für eine on-site Stampflehmvorfertigung

Nachdem in den vorhergegangenen Kapiteln 3.3 und 3.4 die verschiedenen additiven Fertigungsverfahren und die Fertigungsarten untersucht sowie in Kapitel 4 praktische Versuche mit dem Lehm 3D-Drucker unternommen wurden, wird in diesem Kapitel ein mögliches technisches Konzept für die Umsetzung der Stampflehmherstellung von Wandelementen als Vorfertigung auf der Baustelle vorgestellt. Die Konzeptidee verbindet technische Lösungen, deren Funktionsweisen sich innerhalb der Bauindustrie bereits etabliert haben. Durch die Kombination aus „State of the Art“ Technologien und eigens entwickelten Ideen entstand eine neuartige automatisierte on-site Stampflehmvorfertigung. Die grundlegende Idee ist es, eine Feldfabrik auf der Baustelle für Großprojekte zu errichten und vor Ort mit regionalen Ressourcen, ohne große Transportwege zu produzieren. Für den Entwurf der Anlage wird der Low-Tech Ansatz verfolgt. Es geht dabei darum, eine traditionell körperliche Baumethode so zu modernisieren und zu automatisieren, dass die Technologie dahinter einfach, aber trotzdem durchdacht ist und prozesssicher funktioniert. Die Anlage soll so kompakt wie möglich mit wenigen Arbeitskräften und zusätzlichen Maschinen innerhalb kurzer Zeit in Form einer Feldfabrik auf- und abgebaut werden können. Der Bauablauf ist in der folgenden Zeichnung dargestellt. Die Zeichnung sowie alle darauf folgenden Zeichnungen wurden mit der Software Inventor von Autodesk erstellt [71]. Alle Baumaschinen sowie Lagerhalle, Abrollplattform und einzelne Maschinenkomponenten sind STEP Dateien von Open-Source-Plattformen und sind im Literaturverzeichnis mit aufgeführt [72, 73].

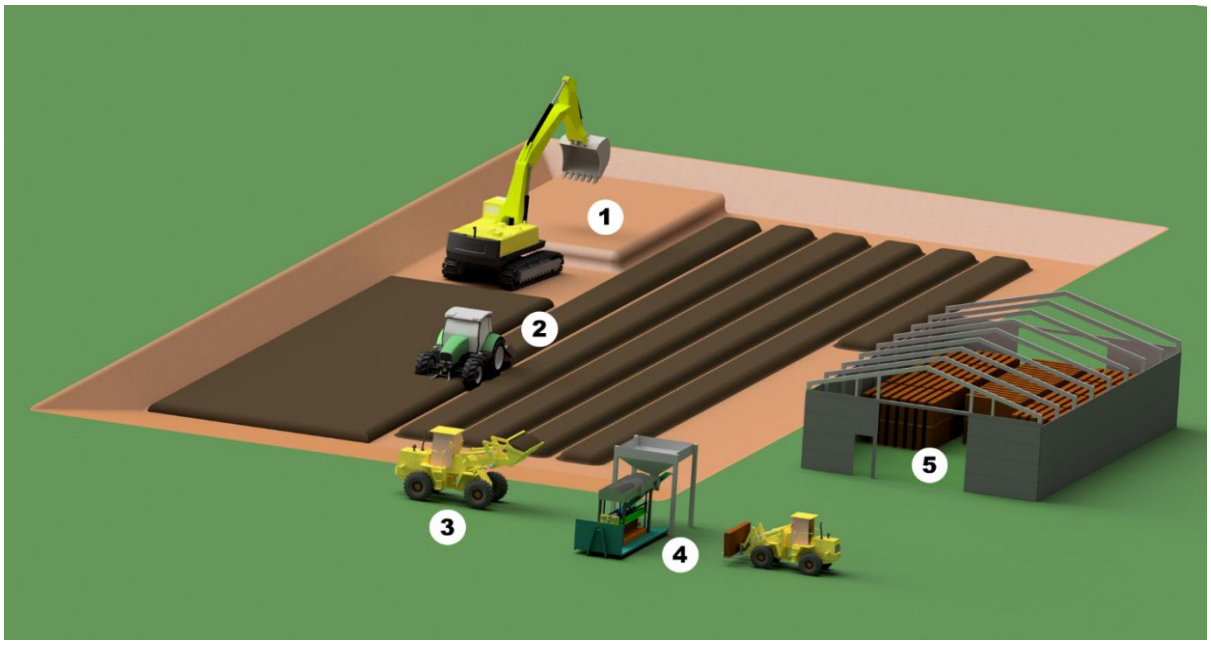


Abbildung 46: Bauablauf-Vorfertigung in Stampflehmbauweise auf der Baustelle

Das Baumaterial für die Stampflehmwände soll direkt aus der Baugrube gewonnen werden. Bevor dies geschieht, dient die Baugrube zunächst als große Wanne, in der das Material gemischt und ggf. fehlende Gesteinskörnungen und Additive hinzugegeben werden. Das Material wird vorweg mit einem Bagger gelöst und die groben Schichten untereinander gehoben (Pos. 1 Materialgewinnung). Das Mischen erfolgt mittels Anbaufräse aus der Bodenstabilisierung. Die Fräse wird an einen Traktor angeschlossen und vermischt lagenweise das spätere Baumaterial (Pos. 2 Materialaufbereitung). Im nächsten Schritt transportiert ein Radlader das aufbereitete Material über die flache Böschung aus der Baugrube heraus (Pos. 3 Materialförderung) und siebt anschließend das Überkorn mit einem Sieblöffel über dem Aufnahmetrichter aus. Von dort aus wird das Material automatisiert über ein Förderband zur Verdichtungsmaschine transportiert, welches das Material schichtweise in die Fertigungsmaschine einbringt. Das Material wird durch eine Walze und zwei parallel zueinander laufende Stampfer verdichtet (Pos. 4 Verdichtung). Die Walze und die Stampfer sind direkt hintereinander angeordnet und laufen auf derselben Linearführung. Eine Schicht wird durch zwei Durchläufe der Verdichtungsgeräte, nämlich durch eine Vor- und eine Hauptverdichtung, bearbeitet. Durch eine mitwandernde Gleitschalung ist es möglich, die 1,20 m hohen Elemente zu produzieren. Nach dem Verdichtungsprozess fährt die Gleitschalung über das Element hinaus. Das Element wird von einem Radlader mit Gabel aus der Maschine herausgehoben und zur Trocknung in die Zelthalle gebracht. Dort bleiben die Elemente je nach Größe und Witterung etwa acht Wochen bis sie trocken sind (Pos. 5 Lagerung). Die Trocknungszeit stammt aus Erfahrungswerten der Firma ERNE AG für ca. 35 cm starke Wandelemente [43]. Nach der Trocknung können die Elemente mit einem Kran versetzt werden und die Fugen anschließend mit Lehmmörtel ausgebessert werden. Daraufhin können die weiteren Gewerke ihre Arbeiten nahtlos anschließen. In den nachstehenden Unterkapiteln werden die einzelnen Schritte des Bauablaufes detaillierter beschrieben.

5.1 Baustelleneinrichtung

Aufgrund der meist beengten Platzverhältnisse auf Baustellen, soll die Einrichtung der Anlage so platzsparend wie möglich erfolgen. Für den Betrieb der Anlage ist ein Baustromanschluss ausreichend, da das Förderband sowie die Verdichtungsmaschine elektrisch betrieben werden. Der Bagger für den Aushub, sowie die Anbaufräse zum Mischen, der Traktor und die zwei Radler mit Gabel und Sieblöffel werden wie üblich bspw. mit einem Tieflader auf die Baustelle geliefert. Das benötigte Förderband mit Aufnahmetrichter wird ebenso auf einem LKW geliefert wie das Zelt als Lagerungshalle der fertigen Elemente. Die Verdichtungsmaschine kommt auf einem Abrollkipper mit Stahlplattform.

Die Stahlplattform dient gleichzeitig als Fundament während des Herstellungsprozesses. Bei schlechten Witterungsbedingungen kann zusätzlich über die Plattform eine Plane gespannt werden. Für den Zeitraum der Montage der getrockneten Elemente ist ein Kran auf der Baustelle vorzuhalten. Hier eignet sich bei einem kurzen Montagezeitraum ein Mobilkran. Des Weiteren ist die Baustelle wie herkömmlich mit Magazinen, Polier- und Bürocontainer, WC-Container etc. einzurichten.

5.2 Materialgewinnung

Das Material soll, wenn es die Bodenverhältnisse vor Ort ermöglichen, direkt aus der Baugrube gewonnen werden. Dies kann im Voraus durch Sondierungen ermittelt werden. Das Material wird in der Baugrube gelöst und mittels Bagger grob durchmischt (Pos. 1 im Bauablauf). Je nach Bodengegebenheiten müssen die verschiedenen Bodenschichten gut untereinander gehoben werden. Durch die Verwendung des Baugrubenaushubes fallen keine oder kaum Materialkosten für den Lehmbau an und die Umwelt wird durch den ausbleibenden Transport auf eine Deponie nicht belastet. Zudem fallen keine Deponiekosten an. Das Material wird direkt in der Baugrube gemischt. Sind die Eigenschaften des Bodens ungenügend, können fehlende Gesteinskörnungen oder Additive aus regionalem Umkreis per LKW auf die Baustelle befördert werden. Ist das Aushubmaterial ganz oder teilweise unbrauchbar für den Lehmbau kann dieses beispielsweise auf eine Erdbaustelle in der Nähe oder wenn das Material aktuell nicht gebraucht wird, auf eine Deponie gefahren werden. Dafür kann im Gegenzug direkt besser geeignetes Aushubmaterial von der Deponie aufgeladen werden, sodass es zu keinen Leerfahrten kommt. Eine weitere Option besteht darin, Material von einer anderen regionalen Baustelle, auf der sie den Aushub für den konventionellen Beton- oder Mauerwerksbau nicht gebrauchen können, liefern zu lassen. Neben dem Erdaushub ist es in Zukunft denkbar, gebrochenes Recyclingmaterial aus dem Massivbau zu verwenden, somit landet dieses nicht als Abfall auf einer Deponie, sondern kann in einem neuen Kreislauf wiederverwendet werden. Zudem könnte es als Stabilisierung im Stampflehm dienen. Die Idee ist es, regionale Schüttgüter über eine „Urban-Mining-Plattform“ zu lokalisieren.

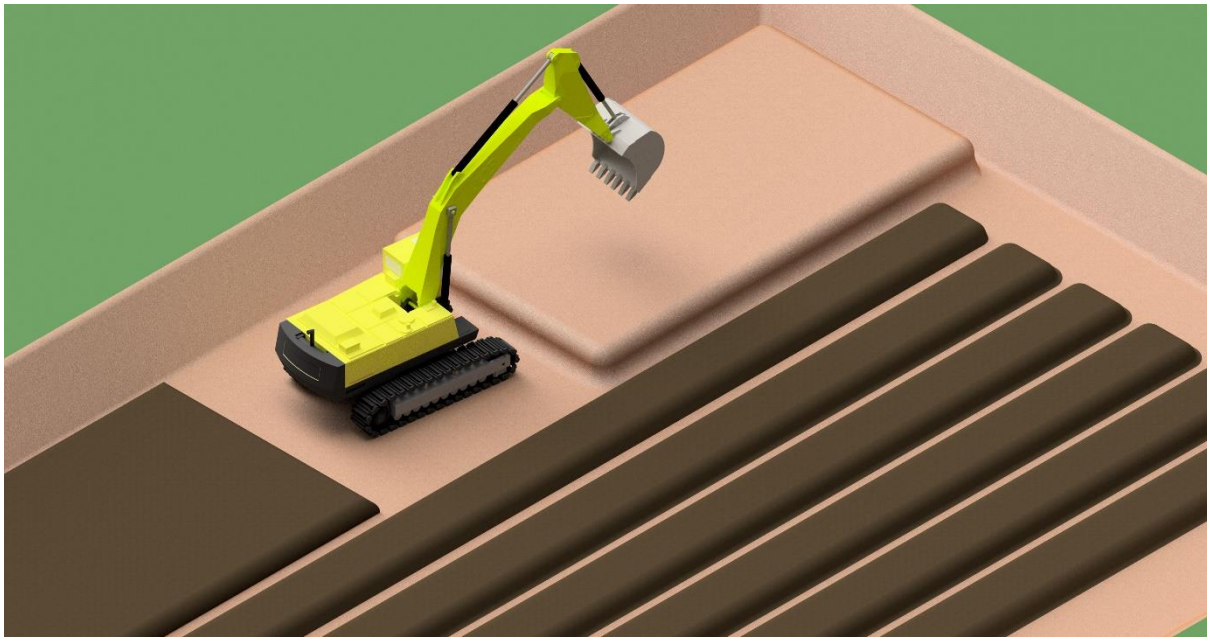


Abbildung 47: Materialgewinnung (Pos. 1) durch Auflockerung und Durchmischung der Schichten mit dem Bagger

5.3 Urban-Mining-Plattform

Urban-Mining-Plattformen können einen wichtigen Beitrag zu zirkulärem Bauen leisten. Durch sie ist es möglich, Wertstoffströme als Daten zu erfassen und sie für alle Marktteilnehmer sichtbar zu machen [33]. Dokumentiert werden die Bauteile und Materialien in ihrer Art, Menge und Ort, an welchem sie sich befinden oder verbaut sind. Das Ziel ist es, die Bauteile am Ende ihrer Nutzungsphase und die Schüttgüter aus der Baugrube etc. wieder in den Kreislauf einzuschließen, damit sie nicht als „Abfall“ auf einer Deponie landen. Über eine Cloud-Plattform können Schüttgüter oder bereits verbaute Stampflehmwände erfasst und abgerufen werden. So ist es möglich, dass Stampflehmwände recycelt werden und in der Region in Form von neu hergestellten Stampflehmwänden wieder zum Einsatz kommen. Dabei können außerdem Körnungen aus dem Betonrecycling eingesetzt werden. Zumal sich jegliche Schüttgüter beispielsweise aus dem Baugrubenaushub oder aus Bergbauabfällen, welche frei von Schadstoffen sind auf der Plattform vermarkten lassen. Schüttgüter, welche bisher kostenpflichtig auf Deponien abtransportiert werden mussten, könnten in Zukunft Anwendung im Lehmbau finden und über Urban-Mining-Plattformen verkauft werden. Martin Rauch schätzt, dass zwischen 50 % und 100 % der Stampflehmmischungen aus solchem gewonnenen Material hergestellt werden könnten, würden die Baumeister und Straßenbauer das Potential solcher Aushübe erkennen [9, S. 122]. Als anschauliches Beispiel dient das junge Unternehmen Schüttflix, welches diesen Ansatz schon in die Tat umgesetzt hat.

Das Unternehmen verbindet Lieferanten und Spediteure direkt mit dem Kunden. Über die Schüttflix App lassen sich verschiedene Schüttmaterialien wie Kies, Sand oder Schotter verkaufen oder bestellen. Je mehr Daten auf der Plattform zur Verfügung stehen, desto besser funktioniert das System und desto geringere Transportwege sind möglich. Das Unternehmen Schüttflix kennzeichnet daher immer das umweltfreundlichste Angebot und gibt die Entfernung des Anbieters an [74]. Um die Qualität der Schüttgüter zu überwachen, sind Labortests notwendig, welche die Zusammensetzungen des Materials bestimmen und ausschließen, dass die Schüttgüter und die Recyclingmaterialien schadstoffbelastet sind. In der untenstehenden Abbildung ist beispielhaft ein Bestellvorgang in der Schüttflix App dargestellt.

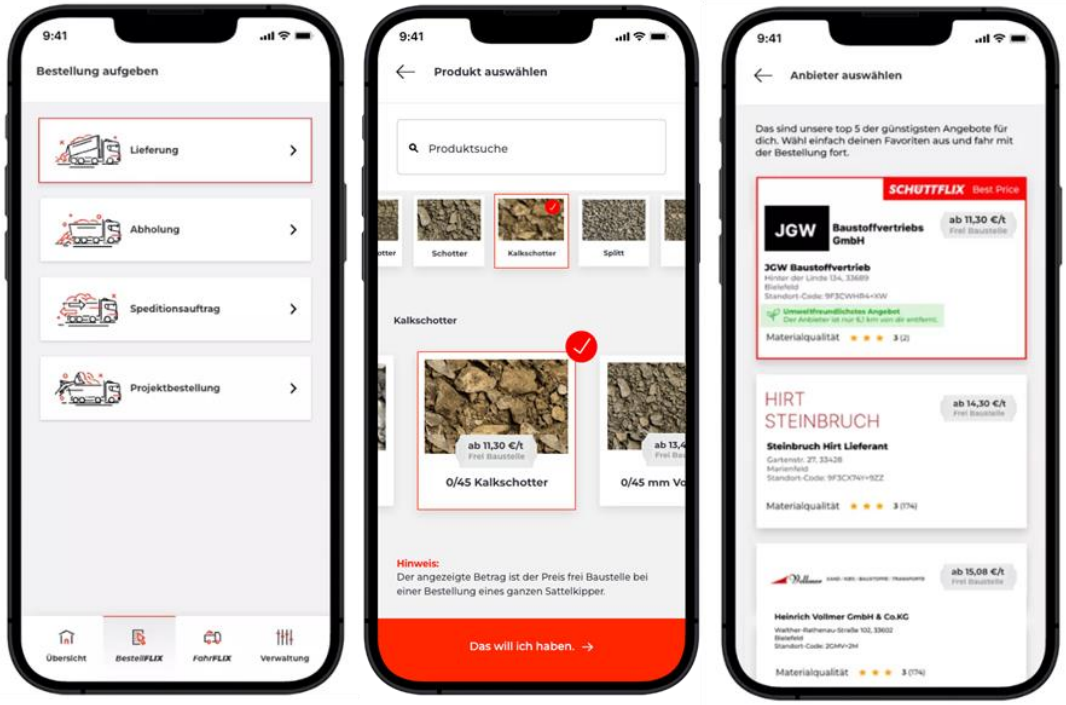


Abbildung 48: Schüttflix App zur Lieferung von Schüttgütern

5.4 Materialaufbereitung

Nachdem das Material in der Baugrube durch den Bagger gelöst und grob durchmischt wurde, werden im nächsten Schritt ca. 50 cm starke Schichten in der Baugrube durch eine Anbaufräse am Traktor durchmischt und über die in der Fräse integrierte Wassereinsprühanlage der Wassergehalt reguliert (Pos. 2 im Bauablauf). Die Wassermenge wird automatisiert über Feuchtesensoren, welche sich an der Fräse befinden, gesteuert. Bei starken Niederschlägen ist das Mischen in der Baugrube nicht zu empfehlen, da der Wassergehalt des Materials unkontrolliert steigt und sich ggf. im Anschluss nicht mehr

verdichten lässt. Während dem Fräsen des Bodens ist es möglich, fehlende Gesteinskörnungen oder Additive portioniert über einen Radlader hinzuzugeben.

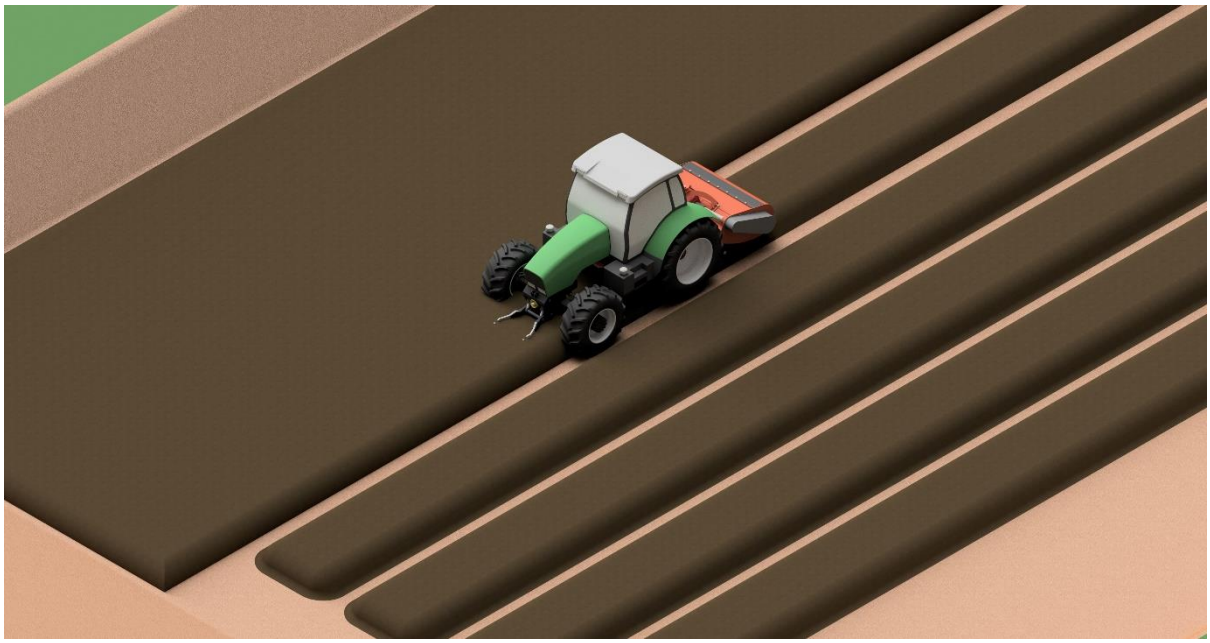


Abbildung 49: Materialaufbereitung (Pos. 2) durch Mischen mit Anbaufräse u. integrierter Wassereinsprühanlage

5.5 Materialförderung

Im nächsten Schritt wird die bearbeitete Schicht von einem Radlader mit Sieblöffel aus der Baugrube gehoben. Der Radlader transportiert das Material zum Aufnahmetrichter (Position 3 im Bauablauf). Über dem Aufnahmetrichter wird das Überkorn ausgesiebt. Das geeignete Material wird über ein Förderband mit Begrenzungsführung, welche das seitliche Abrutschen des Schüttgutes verhindern soll, zur Verdichtungsmaschine transportiert. Das Überkorn (> 32 mm [9]) kann auf der Seite gelagert werden und als Frostschutzschicht/Hinterfüllung verwendet werden, sodass es nicht als Abfall abtransportiert werden muss, sondern eine neue Verwendung findet.

Abbildung 50: Sieblöffel MB-LS170 S2 von MB Crusher [75]

Abbildung 51: Sieblöffel als Anbaugerät für Radlader oder Bagger von MB Crusher [75]

Der Aufnahmetrichter dient als Materialpuffer, sodass die Verdichtungsmaschine immer mit ausreichend Material versorgt wird. Um eine konstante Beschickung zu gewährleisten, wird die Menge, welche durch den Trichter freigegeben wird, über zwei sich drehende parallele Walzen mit Portionierern geregelt. Das Material fällt aus dem Trichter auf ein Förderband. Das Förderband ist an dem Trichter gelenkig gelagert und transportiert das Schüttgut zur Verdichtungsmaschine. Da die Verdichtungsmaschine dynamisch beschickt wird, muss das Förderband dem dynamischen Beschickungsprozess angepasst werden. Daher kann sich das Förderband auf einer Rollenbahn mitbewegen. Durch die gelenkige Lagerung der Rollenbahn und des Förderbandes am Trichter kann sich je nach Position der Beschickung ein anderer Winkel einstellen. Damit eine gleichmäßige Beschickung garantiert werden kann, wird der Prozess durch mehrere Sensoren überwacht. Es befindet sich jeweils ein Sensor an den Trichterausgängen. Das heißt der Volumenstrom, der auf das Förderband portioniert wird und der Volumenstrom, der in die Verdichtungsmaschine fällt, werden über einen optischen Sensor gemessen. Ist der Volumenstrom zu klein, welcher in der Verdichtungsmaschine ankommt, wird die Fördermenge erhöht und die Walzen im Aufnahmetrichter drehen sich schneller. Ebenso wird der Füllstand des Aufnahmetrichters durch Sensoren überwacht. Ist der Füllstand zu niedrig, sodass die Menge an Material nicht mehr für die komplette nächste Schicht reicht, stoppt die Verdichtungsmaschine. Erst wenn der minimale Füllstand wieder überschritten wird, fährt die Maschine mit der Produktion fort.

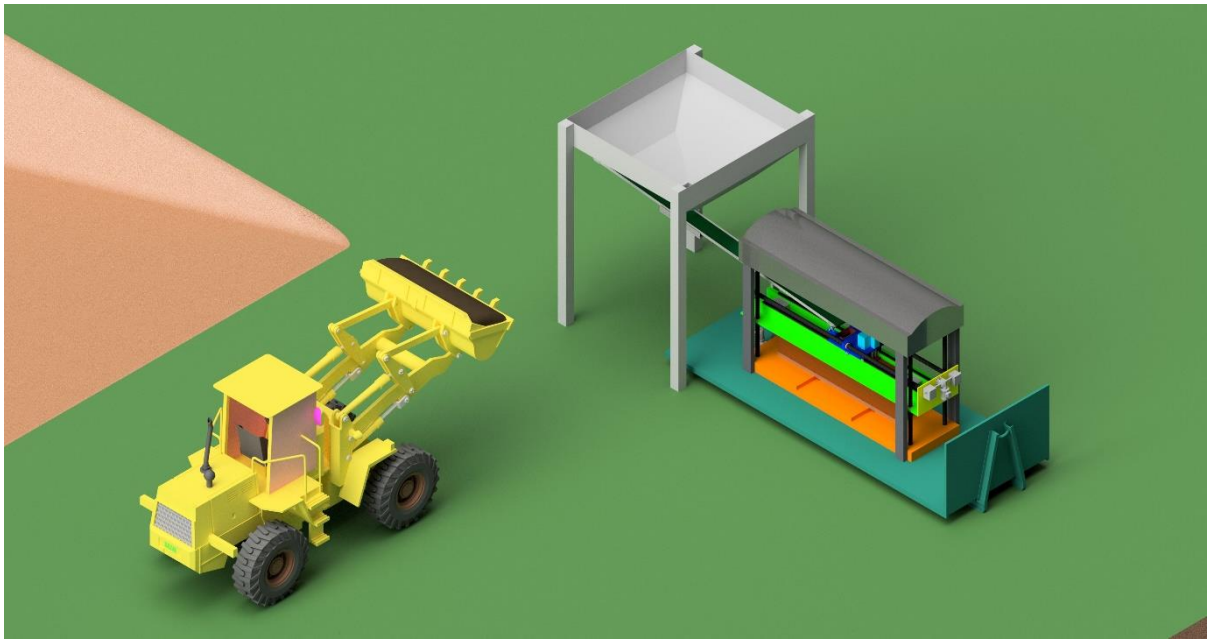


Abbildung 52: Materialförderung (Pos. 3) mit Radlader und Sieblöffel

5.6 Verdichtung

Die Verdichtung spielt eine Kernrolle im Herstellungsprozess und ist maßgebend für die Qualität und Standsicherheit der Elemente (Pos. 4 im Bauablauf). Um die Art der Verdichtung zu wählen, wird sich an den Erfahrungen des Straßenbaus orientiert. Verdichtet wird das Material schichtweise, indem 15 cm hoch Material über einen Befülltrichter (Pos. 1, Abbildung 56) in die Gleitschalung eingebracht wird und anschließend um 1/3 auf 10 cm verdichtet wird [76]. Analog zum Straßenbau wird für bindige Böden eine Walze mit Stampffußbandage (Pos. 2, Abbildung 56) zur statischen Vorverdichtung eingesetzt. Durch die Stampffüße entsteht ein Kneteffekt wodurch die mit Luft und Wasser gefüllten Poren verringert werden können. Zudem führt die, aufgrund der Stampffüße, vergrößerte Walzenoberfläche zur besseren Verdunstung oberflächennaher Feuchte vor Aufbringen der nächsten Schicht [77, S. 208]. Darüber hinaus sollen die einzelnen Stampflehmschichten durch die Stampffüße und deren lokal verstärkten Verdichtung miteinander verzahnt werden. Die Verzahnung entsteht beim Vorverdichten durch die lokal verstärkte Verdichtung, welche in die Tiefe übertragen wird (Abbildung 53) und bei der Hauptverdichtung, also dem Zurückfahren, durch formschlüssige bleibende Vertiefungen auf der Oberfläche der Schicht. Die Walze ist mit Abstreiferzähnen (Abbildung 54) ausgerüstet, die das bindige Material, welches zwischen den Stampffüßstegen haften bleibt, lösen, sodass gleichmäßige Schichthöhen entstehen und der Effekt der Stampffüße erhalten bleibt.

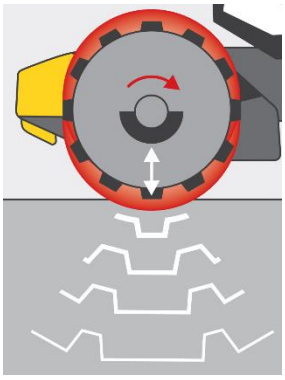


Abbildung 53: Stampffußbandage mit Tiefenwirkung, Wacker Neuson [78]

Abbildung 54: Stampffußbandage mit Abstreiferzähne von Vibromax [79]

Die Walze arbeitet mit statischer Verdichtung. Dabei drückt das Gewicht der Walze als statische Linienlast auf das zu verdichtende Stampflehmmaterial. Die Walze reicht über die gesamte Bauteilbreite, mit Ausnahme von ein paar wenigen Milimetern an den Seiten, damit sich dort keine Gesteinskörnungen verkeilen können. Hinter bzw. vor der Walze, je nach Fahrtrichtung, sind zwei dynamische Stampfer (Pos. 3, Abbildung 56) zur Hauptverdichtung montiert. Die Stampfer sind versetzt zueinander angeordnet und arbeiten präziser an den Längsrändern, als die Walze es kann. Dank der flexiblen Randabschalung mit Ausgleichsdruckfedern (Pos. 4, Abbildung 56) können die Stampfer als auch die Walze über die kurzen Seiten der Gleitschalung (Pos. 5, Abbildung 56) hinausfahren. Somit kann eine konstante Verdichtung über den gesamten Querschnitt erreicht werden. Die Qualität der Verdichtung wird durch Sensoren an den Stampfern überwacht. Durch die hohe Schlagzahl von 500 bis 800 Schlägen/min gelangt das Material bei der Stampfverdichtung in Bewegung. Die Haftreibung zwischen den Körner vermindert sich und die Körner werden neu angeordnet [77, S. 192]. Die Stampfer geben jeweils abwechselnd einen Impulsstoß auf das zu verdichtende Material. Zur Vorverdichtung wird mit einer kleinen Amplitude und einer hohen Frequenz gefahren. Zur Hauptverdichtung wird gerade umgekehrt mit einer großen Amplitude und einer niedrigen Frequenz gefahren, um möglichst viel Verdichtungsenergie einzubringen und die gewünschte Druckfestigkeit zu erreichen. Die unterschiedlichen Frequenzen sind erforderlich, um sowohl die feinen als auch die groben Körnungen zur Umlagerung anzuregen. Durch eine niedrige Frequenz lassen sich die groben Körnungen und durch eine hohe Frequenz die feinen Körnungen umlagern [77, S. 194]. Die beobachtete Resonanzfrequenz hängt von der erreichten Verdichtung ab und kann verwendet werden, um den Grad der Verdichtung während des Prozesses abzuschätzen [2]. Die Elemente werden bis zu einer maximalen Höhe von 1,20 m Schicht für Schicht verdichtet.

Ganz nach dem Low-Tech Ansatz kann zur Verkleinerung der Elementbreite eine Vorsatzschalungen (Abbildung 57) vor der Gleitschalung eingesetzt und mit Zylinderkopfschrauben fixiert werden. So ist es möglich, flexible Elementbreiten angepasst an die Gebäudegeometrie herzustellen. Die Ausgleichsplatte mit den Druckfedern wird hierfür an der Vorsatzschalung montiert.

Die Verdichtungsmaschine wird über zwei Elektromotoren angetrieben, welche die horizontale Bewegung der Stampfeinheit und die vertikale Bewegung der Gleitschalung ermöglichen. Diese Aktoren treiben über ein Schneckengetriebe die Gelenkwellen an, welche wiederum die Kraft auf die horizontalen und vertikalen Spindelhubgetriebe übertragen. Über die Spindelstangen der Getriebe werden die Einheiten linear über deren Trapezgewinde bewegt. Durch eine hohe Übersetzung zwischen Antriebs- und Abtriebswelle ist das Schneckengetriebe selbsthemmend und sorgt dafür, dass die Kräfte aus der Verdichtung aufgenommen werden können, ohne dass die Gleitschalung abrutscht. Da die Verdichtungsmaschine Staub und Nässe ausgesetzt ist, ist mindestens ein IP65 Schutz vorgesehen, bei welchem die Bauteile vollständig staubdicht und gegen Strahlwasser geschützt sind [80]. Die Spindelführungen sind zudem durch Schutzbälge geschützt. Alle Bauteile, die Teil des technischen Konzeptes sind, wurden nicht bemessen und müssen entsprechend der real einwirkenden Kräfte dimensioniert werden.

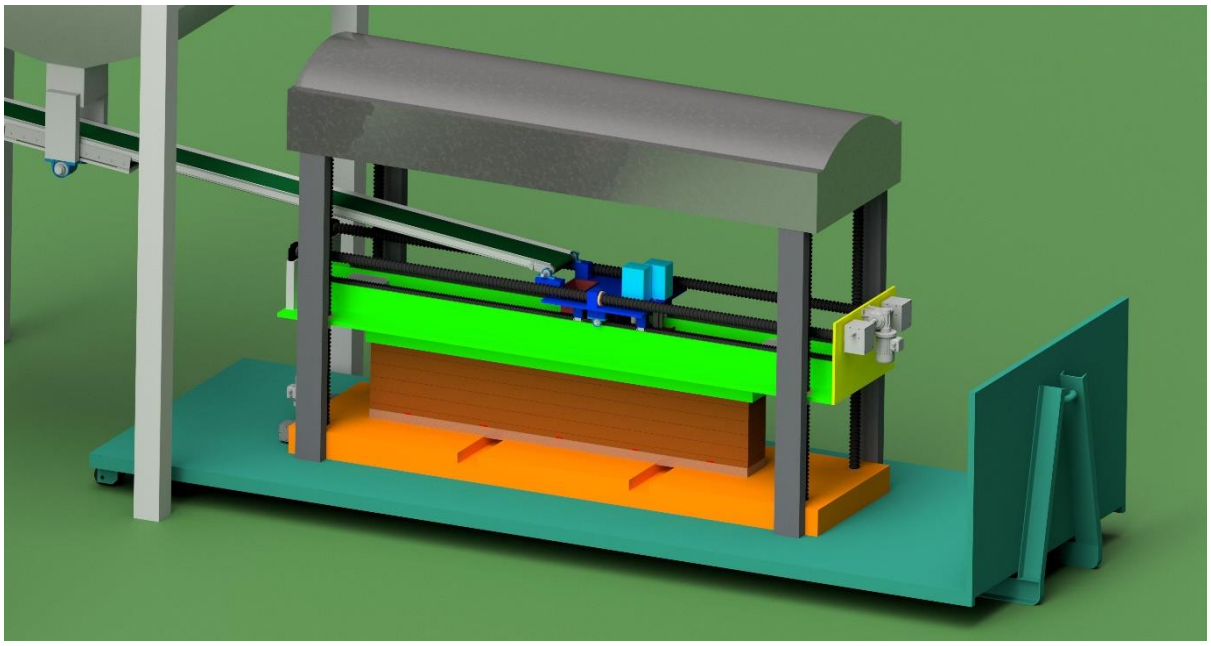


Abbildung 55: Verdichtungsmaschine (Pos. 4) auf Abrollplattform

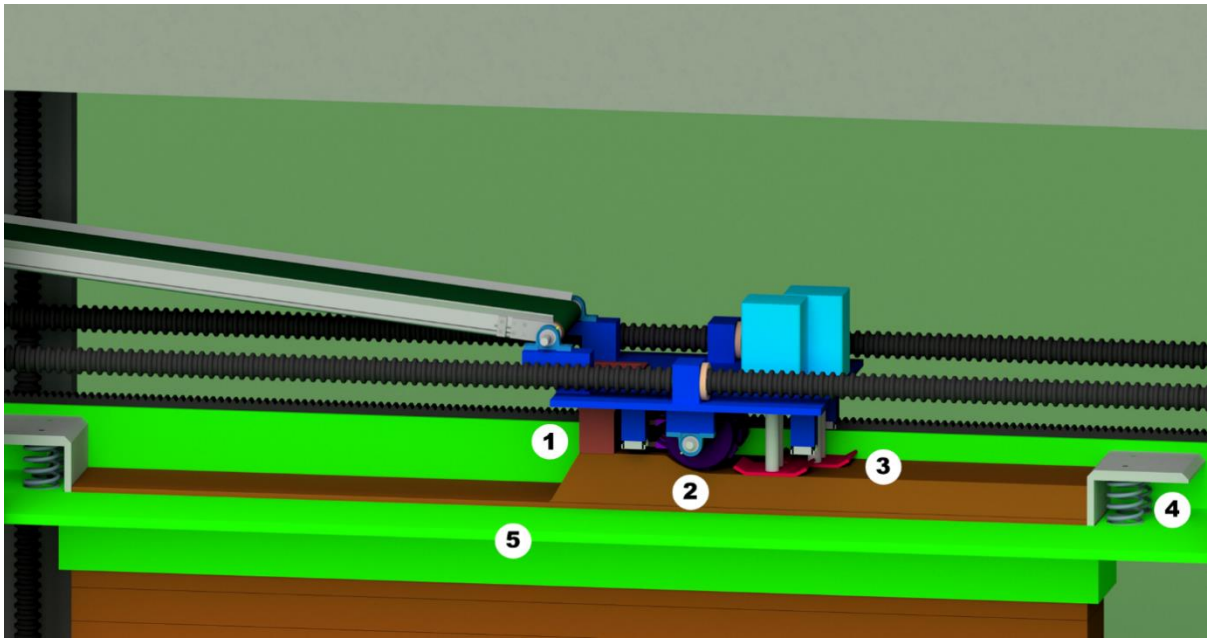


Abbildung 56: Verdichtungseinheit (Pos. 4) aus Stampffußwalze und zwei leicht versetzten Stampfern

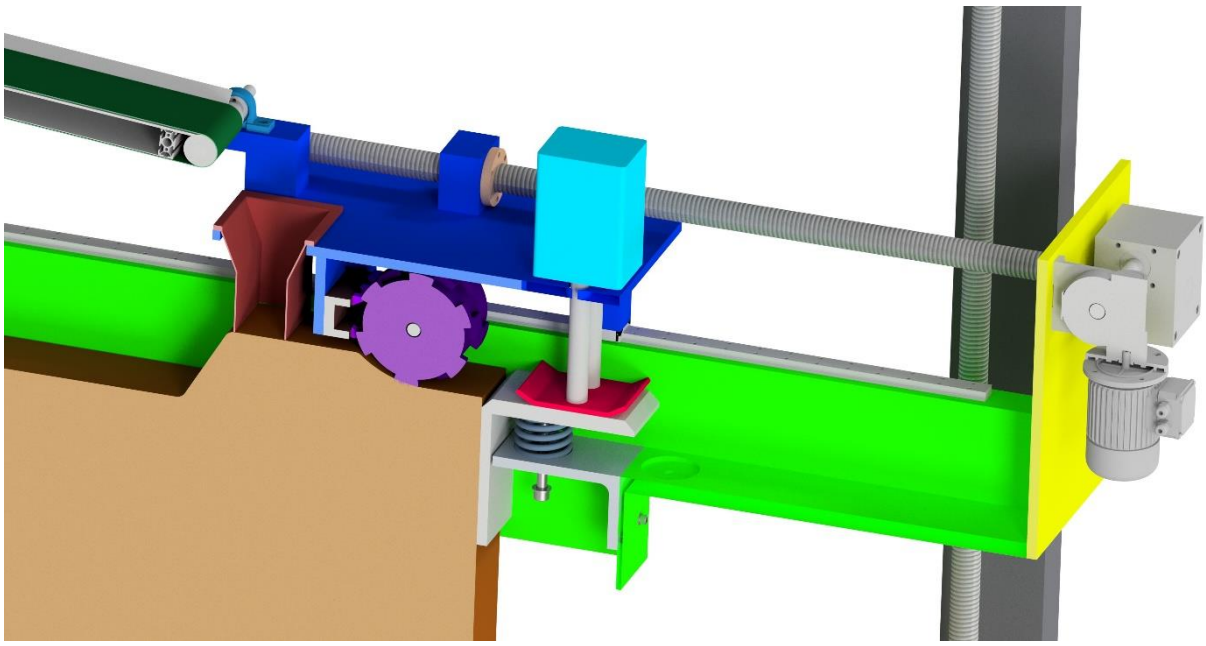


Abbildung 57: Schnitt durch Verdichtungseinheit (Pos. 4) mit Prinzip der Ausgleichsplatte und Vorsatzschalung

5.7 Lagerung

Sobald die Elemente fertig hergestellt sind, fährt die Gleitschalung nach oben, sodass die Wandelemente mit einem Radlader aus der Maschine gehoben werden können. Der Radlader kann mit der Gabel in die hierfür vorgesehenen Aussparungen fahren und anschließend das Element anheben. Das Element steht auf einem ca. 8 cm hohen und 35 cm breiten Holzbalken. Der massive Holzbalken wird benötigt, da die Wand im feuchten Zustand eine wesentlich geringere Tragfähigkeit aufweist, vor allem aber keine Zugkräfte aufnehmen kann. Die in die erste Schicht eingelegten Dreischichtplatten dienen als Platzhalter für die Kranschlingen bei der späteren Montage am Bauwerk. Die Dreischichtplatten werden noch im feuchten Zustand herausgeschlagen, da sich im trockenen Zustand die Gefahr erhöht, dass durch das spröde Verhalten des trockenen Stampflehms Körnungen ausbrechen. Die fertigen Elemente werden zum Lufttrocknen in eine auf der Baustelle aufgebaute Zelthalle gefahren. Das Zelt schützt die Stampflehmelemente vor Witterung. Wichtig ist, dass die Seiten des Zeltes geschlossen werden können und die Elemente nicht im Durchzug stehen. Die Lagerfläche muss zudem eben sein, damit die Elemente gleichmäßig trocknen und Schwindrisse vermieden werden können. In der Lagerhalle bleiben die Elemente ca. acht Wochen bis sie trocken und stabil genug zur Montage sind [43]. Während der Trocknungszeit und nachdem aller Aushub aus der Baugrube ausgehoben wurde, kann das Untergeschoss in herkömmlicher Stahlbetonbauweise hergestellt werden. So kann die Lücke im Bauzeitenplan, die durch die lange Trocknungszeit entsteht, verkürzt werden.

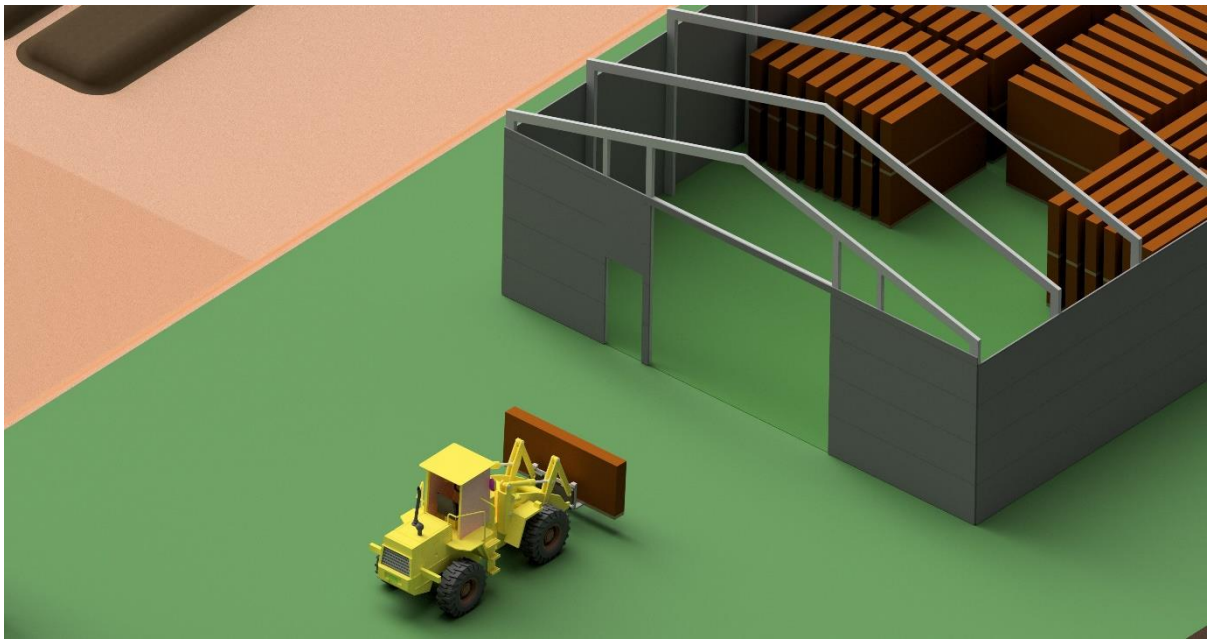


Abbildung 58: Lagerung (Pos. 5) der Stampflehmelemente in einer Zelthalle

5.8 Montage

Die Montagearbeiten gelten in der Stampflehmvorfertigung als „Bottleneck“, so Sascha Schade von der Firma ERNE AG [44]. Um den hohen personellen wie auch zeitlichen Aufwand der Montagearbeiten auf ein Minimum zu reduzieren, werden möglichst große Elemente produziert. Dadurch soll die Anzahl der zu versetzenden Elemente sowie die Anzahl der Fugen, vor allem die der horizontalen Fugen verringert werden. Die horizontalen Fugen sind im Anschluss schwieriger zu schließen als die vertikalen Fugen. Aus den Anforderungen heraus ergibt sich eine praktische Bauteilhöhe von 1,20 m, da bei einer Standarddeckenhöhe von 2,40 m so nur zwei Elemente aufeinandergesetzt werden müssen und möglichst wenig Fugen entstehen. Die maximale produzierbare Elementbreite beträgt 3,00 m, damit die Elemente mit einem gut verfügbaren Kran versetzt werden können. Die Wandstärke ist mit 35 cm nicht variierbar und orientiert sich an der Mindestwanddicke für tragende Stampflehmaußenwände (32,5 cm) nach Vorgaben der Lehmbau Regeln des Dachverband Lehm e.V. [15, S. 50]. Normativ geregelte Bemessungsverfahren zur maximalen Wandschlankheit gibt es bisher noch nicht. Die Elemente werden mit einem Balken an der Oberseite und Kranschlingen an einen Kran angehängt. Anschließend werden sie versetzt und von Fachkräften ausgerichtet (Abbildung 59). Zwischen den Elementen wird ein circa 1 cm starkes Lehmmörtelbett aufgetragen, damit keine Hohlräume zwischen den Elementen entstehen und eine kraftschlüssige Verbindung über das Eigengewicht erfolgen kann [9, S. 126]. Bevor die Fugen aus dem gleichen Material ausgebessert werden, damit sie nach dem Trocknen nicht mehr sichtbar sind und sich ein monolithisches Bild der Schichten ergibt, müssen diese für einen besseren Haftverbund befeuchtet werden (Abbildung 60). Ausgebessert wird von Hand, da sich der Prozess nur schlecht automatisieren lässt. Auch ein automatisiertes Versetzen der Elemente z.B. über einen Portalkran ist, Stand heute, unter wirtschaftlichen Aspekten durch die hohen Montagekosten undenkbar.

Abbildung 59: Montage der Stampflehmelemente; Ricola Kräuterzentrum Laufen CH, M. Rauch [81]

Abbildung 60: Retuschieren der Fugen; Ricola Kräuterzentrum Laufen CH, M. Rauch [82]

5.9 Bewertung des entwickelten Konzeptes

Es wurde sich bewusst gegen eine robotische Vorfertigung entschieden, da Robotersysteme nicht voll ausgeschöpft werden können. Für eine gerade Wand mit ebenen Flächen ist während des Stampfvorganges eine 2-Achs-Bewegung ausreichend, welche durch ein herkömmliches und kostengünstigeres Portalsystem realisiert werden konnte. Durch eine in z-Richtung bewegliche Gleitschalung konnte das Ein- und Ausschalen automatisiert werden. Zudem ist die Gleitschalung aus Stahl wiederverwendbar. Es lassen sich flexible Elementhöhen und durch Vorsatzschalungen flexible Elementbreiten herstellen. Die möglichen Elementbreiten sind abhängig von der Länge der verschiedenen Vorsatzschalungen. Es ist zu empfehlen die Vorsatzschalungen auf Standardmaße anzupassen und sich auf eine Anzahl an verschiedenen Längen zu beschränken. Um ebenso variierbare Wandstärken herstellen zu können, wäre eine Erweiterung des Konzeptes mit zusätzlichen Vorsatzschalungen in Längsrichtung möglich. Eine automatisierte Produktion durch die Verdichtungsmaschine profitiert stark von stabilen und durchgängigen Prozessen. Um das Konzept mit Erosionsbremsen zu erweitern, kann alle paar Lagen eine dünne Schicht Trasskalk eingebracht werden anstelle des Lehmgemischs. Als Alternative zur Materialaufbereitung besteht die Möglichkeit das Überkorn mittels Prallbrecher oder Backenbrecher zu zerkleinern und mitzuverwenden. Aufgrund der oftmals unzureichenden Qualität für ein normgerechtes Endprodukt ist eine Nachsiebung durch beispielsweise eine mobile Siebanlage erforderlich.

Der aufgezeigte Bauablauf und das entwickelte technische Konzept stellen lediglich einen Entwurf dar und sind zur Inspiration und Weiterentwicklung mit Fachexperten aus den Disziplinen des Maschinenbaus (Konstrukteur, Verfahrenstechniker) und des Baubetriebes gedacht. Die Maschinen sowie die Maschinenkomponenten sind in Abhängigkeit der Größe, der Baustelle sowie der realen Kräfte zu dimensionieren.

6 Schlussfolgerung

6.1 Resümee

Die Masterthesis beschreibt die Historie sowie die Grundlagen und Eigenschaften des Lehmbaus. Einer der einprägsamsten Eigenschaften ist die Wasserlöslichkeit von Lehm, welche oftmals als einer der größten Nachteile des Lehmbaus empfunden wird. Diese Sensibilität gegenüber Wasser ist zugleich der Grund für die Zirkularität und die einfache Wiederverwendbarkeit der Lehmbaustoffe und wird hier nicht als reiner Nachteil betrachtet, sondern als großes Potential für einen zukunftsfähigen, zirkulären Baustoff. Durch Analyse der traditionellen Bauweisen konnten die Schwachstellen erkannt und als Herausforderungen für den modernen Lehmbau erfasst werden. Zu diesen zählen unter anderem die Standardisierung des Materials und die Automatisierung körperlich anstrengender und zeitintensiver Arbeiten. Die digitalisierte und automatisierte additive Fertigung mit Lehm soll die industrielle Fertigung von Lehmbauten ermöglichen und somit ein neuer konkurrenzfähiger Markt für den modernen Lehmbau erschaffen.

Durch Literaturrecherchen konnte der aktuelle Stand der Technik für den modernen Stampflehmbau und das 3D-Drucken mit Lehm ausfindig gemacht werden. Während es bereits einige teilautomatisierte Projekte in der Vorfertigung von Stampflehmwänden gibt, ist der Lehm 3D-Druck zwar in der Forschung ein großes Thema, kommerziell umgesetzte Projekte gibt es jedoch noch nicht. Aufgrund der aufwendigeren Materialaufbereitung zum Erreichen einer pumpfähigen Konsistenz mit ausreichender Grünstandfestigkeit, der Problematik des Schwindens am Bauwerk durch einen erhöhten Wassergehalt und einer geringeren Tragfähigkeit ohne Additive im Endzustand, wurde die Entwicklung eines technischen Entwurfes anhand des Stampflehmverfahrens gewählt. Die Entscheidung für das Stampflehmverfahren wurde zusätzlich durch die Analyse und Auswertung des praktisch Teils untermauert. Im praktischen Teil der Arbeit wurden beispielhafte Untersuchungen an einem Lehm 3D-Drucker durchgeführt. Es wurden Prüfkörper mit und ohne Additive sowie unterschiedliche Füllgrade mit einem Mini 3D-Drucker extrudiert. Die geeigneten Mischungsverhältnisse wurden dokumentiert und ihr Verhalten während des Drucks analysiert. Um die Stabilität zu erhöhen, wurden Versuchsreihen mit Kasein und Holzfasern getestet. Kasein eignet sich als Zusatzmittel in dickwandigen Bauteilen nicht, es bilden sich netzartige Schimmelpilze bei zu langsamer Trocknung. Die Holzfasern hingegen bieten sich als regional vorhandenen und effizienten Zusatzstoff an. Zudem kann man bereits schon bei einem Massenanteil von 0,4 % eine Festigkeitssteigerung von 20 % erreichen. Beim Vergleich der Prüfkörper mit unterschiedlichen Füllgraden konnte ein linearer Anstieg der Druckfestigkeit im Vergleich zur Querschnittsfläche festgestellt werden. Trotz der erstaunlich

guten Ergebnisse der Druckfestigkeiten bringt der Lehm 3D-Druck einige Schwierigkeiten in der Herstellung mit sich. Für den Einsatz auf der Baustelle und einer Low-Tech Umsetzung wurde sich deshalb gegen den Lehm 3D-Druck entschieden. Was nicht bedeuten soll, dass der Lehm 3D-Druck in Zukunft keine Chancen hat, sondern es noch einige Herausforderungen zu lösen gilt.

Ausschlaggebend für eine on-site Vorfertigung der Stampflehmelemente auf einer Großbaustelle waren die hohen Einsparungen an Transportwegen und die damit verbundene Reduzierung der Transportkosten und der Treibhausgasemissionen, bei der Verwendung des lokalen Aushubmaterials. Der on-site Bauablauf wurde in Form einer Feldfabrik von der Materialgewinnung über die Materialaufbereitung, Materialförderung und die Verdichtungstechnik bis zur Lagerung und Montage der Elemente geplant. Die Feldfabrik soll so kompakt wie möglich mit einem hohen Automatisierungsgrad, wenigen Arbeitskräften und zusätzlichen Maschinen innerhalb kurzer Zeit auf und abgebaut werden können. So entstand die Idee, die automatisierte Verdichtungsmaschine direkt auf einer Abrollplattform auf die Baustelle liefern zu lassen, welche gleichzeitig als Fundament der Verdichtungsmaschine genutzt werden kann. Die Materialgewinnung erfolgt im Idealfall direkt aus der Baugrube oder durch Zugabe von regionalen Schüttgütern, welche über eine Urban-Mining-Plattform ausfindig gemacht werden können. Durch digitalisierte und automatisierte Bauweisen, wie in dieser Arbeit vorgestellt, soll der moderne Lehmbau hin zu einer Massenproduktionstechnik skaliert werden, wodurch die Reproduzierbarkeit und Qualität steigt und die Produktionszeit sowie die Kosten gesenkt werden können.

Die Bauweisen mit Lehm sind vielfältig, auf dem Markt gibt es wie in Kapitel 2.3 dieser Arbeit gezeigt bereits einige Produkte. Neben massiven tragenden und nichttragenden Wänden lassen sich ebenso Beplankungen mit Lehmplatten herstellen, Leichtlehm als Innendämmung oder Deckenausfachung verwenden. Neben dem breiten Einsatzbereich nicht zu vergessen sind die signifikant reduzierten CO_2 Emissionen der Lehmbaustoffe. Durch ihre lokale Gewinnung vor Ort und ihre energiearme Aufbereitung sowie Wiederverwertung weisen Lehmbaustoffen einen geringen Anteil an grauer Energie auf. Kein anderer Baustoff lässt sich so einfach Wiederverwenden wie Lehm. Durch die Zirkularität könnten in Zukunft viele natürliche Ressourcen geschont und die Städte als anthropogene Lager genutzt werden. Wer sich für den Lehmbau entscheidet, genießt die weiteren Vorteile der selbstregulierenden Raumluftfeuchte und die Speicherung von Schadstoffen und Gerüchen. Durch diese positive Eigenschaft des Lehmbaus kann weitestgehend auf eine technische Lüftung verzichtet werden. Trotz einiger noch offenen technischen und wirtschaftlichen Fragen zeigt der Lehmbau großes Potential, der Baustoff der Zukunft zu werden.

6.2 Ausblick und weitere Forschungsfragen

Ausblick

Die Bauwirtschaft muss weg von Baustoffen mit hoher Primärenergie und großen Abfallerzeugern hin zu einer nachhaltigen und zirkulären Kreislaufwirtschaft. Der moderne Lehmbau hat die Chance, durch neue technologische Fortschritte und Standardisierung der Herstellung, ein fester Bestandteil der vierten industriellen Revolution der Bauindustrie zu werden. Um dieses ehrgeizige Ziel zu erreichen, müssen die aktuellen Fortschritte in der Bodenmechanik, Rheologie und Automatisierung auf die traditionelle Bauweise angewandt werden. Es benötigt zudem Grundlagenforschung als auch angewandte Forschung in der Entwicklung von standardisierten Stampflehmmischungen und der Methoden zur nachhaltigen Stabilisierung der Wandbauteile. Neuartige Labor- und in-situ-Tests sollen zur Materialeignung und zur Qualitätskontrolle entwickelt werden. Experimentelle Untersuchungen an groß skalierten Wandelementen im Labor und in-situ sind notwendig, um mehr über den Maßstabseffekt und die Dauerhaftigkeit bei Witterungseinflüssen herauszufinden. Statistische Analysen und Versuchsdaten in allen Bereichen sind essenziell für eine Standardisierung im Stampflehmbau. Um überdimensionierte Stampflehmbauteile zu vermeiden und wirtschaftliche Bauteilabmessungen zu erhalten, ist die Entwicklung einer Methodik zur Modellierung des Verhaltens von Stampflehmbauwerken notwendig mit anschließender Integration der Modelle in moderne Berechnungsverfahren der Ingenieurspraxis. Die Bereitstellung effizienter und wirtschaftlicher Prozesse zur Produktion individueller Bauteile soll es Planern in Zukunft erleichtern, die Wahl zugunsten nachhaltiger Materialien und Bauweisen zu treffen. Der Transfer von Wissenschaft in die Praxis könnte unter anderem durch eine Open-Source-Plattform stattfinden, auf welcher Daten und Wissen ausgetauscht werden und das Vertrauen in diese neue Technologie gestärkt wird.

Der Entwurf des Bauablaufs einer on-site Vorfertigung von Stampflehmelementen ist mit Unterstützung von Fachexperten vor allem aus den Bereichen der Maschinenkonstruktion, Verdichtungstechnik, Verfahrenstechnik sowie dem Baubetrieb und Baumanagement weiterzuentwickeln und durch einen ersten Prototyp in der Praxis zu testen.

In dieser Masterarbeit liegt der Fokus auf dem Rohbau durch additive Fertigungsverfahren mit Lehm. Für eine zukunftsangepasste Umsetzung der Lehmbauweise ist die Betrachtung von technischen Gebäudeausrüstungen (TGA), Wärmeschutz durch Dämmung und der Innenausbau nicht zu vernachlässigen. Da sich in Lehmwände nur schlecht Schlitze ausfräsen und Leitungen verlegen lassen, sollte dies weitgehend vermieden werden. Zudem kann es bei einem Wasserschaden in einer tragfähigen Lehmwand zum Stabilitätsverlust kommen.

Außerdem ist die Nutzungsdauer der Installationen wesentlich geringer als die Nutzungsdauer des Tragwerkes, was bei einem Austausch zu einem erneuten aufspitzen der Wände führen würde. Als mögliche Lösung bietet sich daher eine Vorsatzschalung an, wodurch allerdings der Wohnraum verkleinert wird und die Lehmoberfläche ihre architektonische Wirkung verliert. Ziel soll es sein, nur so viel Technik wie notwendig einzubauen, die Vorteile der massiven Lehmbauweise als Massespeicher zu nutzen und auf natürliche, passive Methoden wie bspw. die passive Kühlung zurückzugreifen. Bei Kombinationen mit anderen Baustoffen wie Dämmung oder Anstrich ist darauf zu achten, dass die Dampfdiffusionsoffenheit gewährleistet bleibt.

Denkbar wären in Zukunft ebenso innovative Anwendungen aus Lehm und Holz. Traditionell werden Lehm und Holz zusammen in Fachwerkhäusern eingesetzt. Dabei trägt die Holzstruktur und der Lehm dient als schalldämmende Ausfachung und schützt das Holz vor Feuchte. Möglich wäre ein automatisierter Einbau der Ausfachung im Werk oder eine on-site Vorfertigung im Container. Mit einem 3D-Drucker könnten die individuellen Ausfachungen präzise ohne Schalung gedruckt werden.

Aufklärung und Werbung durch Praxisprojekte, sowie der Transfer zwischen aktueller Forschung und Industriepartnern sollen dem modernen Lehmbau zur Revolutionierung der Bauindustrie verhelfen.

Forschungsbedarf und Forschungsfragen

Nach tiefgründiger Bearbeitung und Auseinandersetzung mit den Themen des modernen Lehmbaus, sowie dem traditionellen Lehmbau und den Expertisen von verschiedensten Fachexperten wurden die nachfolgenden noch offenen Forschungsfragen hin zu einer automatisierten Stampflehmvorfertigung auf der Baustelle formuliert.

Materialmischungen

- Wo liegt die optimale Sieblinie zur Stampflehmherstellung? Wo liegen die Grenzwerte zur Verwendbarkeit des vor Ort vorhandenen Bodens, sodass möglichst viel Aushubmaterial verwendet werden kann und nicht aus Unwissenheit abtransportiert werden muss?
- Welchen Einfluss haben Befeuchtungsgrad und Gefrier-Tau-Wechsel auf unterschiedliche Materialzusammensetzungen?
- Wie wirkt sich der Einsatz von Recyclingmaterialien auf die Stampflehmeigenschaften aus?

Additive

- Welche nachhaltigen, regionalen Additve eignen sich zur Stabilisierung von Stampflehm?

Baustelleneinrichtung

- Wie kann die Baustelleneinrichtung optimiert werden? Gibt es Möglichkeiten für den innerstädtischen Raum?

Materialeignungsprüfungen

- Welche neuartigen Labor- und in-situ-Tests können zur Materialeignungsprüfung und zur Qualitätskontrolle eingesetzt werden?

Urban-Mining-Plattform

- Welche Schritte benötigt es zur Entwicklung einer Urban-Mining-Plattform für Schüttgüter und Lehmbauteile?
- Wie funktioniert die Implementierung einer Urban-Mining Plattform?

Materialaufbereitung

- Welches Verfahren zur Materialaufbereitung (mobile Mischanlage oder Anbaufräse) eignet sich am besten hinsichtlich Bauablauf und Kosten?
- Ist die Qualität der Siebung mit einem Sieblöffel ausreichend für die Stampflehmherstellung?
- Kann das ausgesiebte Überkorn als Frostschutzschicht verwendet werden?

Materialförderung

- Welche speziellen Anforderungen müssen an ein Förderband zum Transport von Stampflehmmaterial mit seinem bindigen Anteil gestellt werden?

Verdichtung

- Welche Materialzusammensetzung ist erforderlich, um eine optimale Verdichtung der Stampflehmschichten zu erreichen?
- Wo liegt der optimale Wassergehalt zum Erreichen der Proctordichte?
- Durch welche Art soll verdichtet werden? Durch pressen, stampfen, vibrieren, statisch oder eine Kombination?
- Welche Maschinen sollen zum Verdichten eingesetzt werden? Walzen, Stampfer, Randstampfer, Rüttelplatten oder eine Kombination?

- Wie sind die Parametereinstellungen von Amplitude, Frequenz, Geschwindigkeit und Anzahl der Verdichtungsdurchgänge zu wählen?
- Benötigt es Spezialanfertigungen für die Verdichtungsgeräte? Diese müssen ggf. mit Industriepartnern und Fachexperten entwickelt und an groß skalierten Bauteilen geprüft werden.
- Mindert eine Gleitschalung die Qualität der Oberflächen und Kanten? (siehe Form Earth [2])

Lagerung und Trocknung

- Wie kann die Trocknungszeit verkürzt werden, um Baustillstand zu vermeiden und Lagerungskosten zu minimieren?
- Kann die Trocknungszeit durch vertikal Röhrchen in Form von bspw. Stroh oder Hanffasern beschleunigt werden, ohne Risse durch zu schnelles Trocknen zu erhalten?

Montage

- Wie kann der frühestmögliche Montagezeitpunkt in Abhängigkeit der Bauteilabmessungen anhand von Richtwerten bestimmt werden?

Berechnungsverfahren

- Welche Erkenntnisse zur Tragfähigkeit und dem Maßstabseffekt können aus groß skalierten Versuchen gewonnen werden?
- Wie kann das Verhalten von Stampflehmbauwerken in einem 3D-Modell modelliert werden?
- Wie kann das Modell in ein modernes, wirtschaftliches Berechnungsverfahren integriert werden?

Technische Gebäudeausrüstung & Innenausbau

- Wie können Leitungen bestmöglich verlegt werden, sodass sie die Tragfähigkeit und Optik der Stampflehmwände nicht eingeschränkt werden?

Dämmung

- Welche nachhaltigen Dämmbaustoffe können zum Einsatz kommen, um die energetischen Standards in kalten Klimazonen zu erreichen?
- In welcher Schicht wird gedämmt? An der Außen-, Innen- oder Zwischenschicht?

Marktreife des Lehmbaus

- Welche Schritte müssen für eine Normung des Stampflehmbaus in die Wege geleitet werden, sodass weniger Zustimmungen im Einzelfall erforderlich sind?
- Wie kann eine höhere Akzeptanz und Anerkennung der Lehmbauweise in der Gesellschaft erreicht werden?
- Wie kann die Lehmbauweise in Architektur- oder Ingenieurbüros implementiert werden und ein Grundverständnis bei Bauherren erlangt werden?
- Wie kann die Wissensvermittlung bei planenden sowie ausführenden Unternehmen und deren Facharbeiter stattfinden?
- Kann durch ein digitales Tool die Lebenszyklusbetrachtung (LCA)/Ökobilanz bereits schon während dem Designprozess in Echtzeit bemessen werden und somit die Auswahl nachhaltiger Materialien wie Lehm fördern?

Wirtschaftlichkeitsanalyse

Es ist eine Wirtschaftlichkeitsanalyse für den entwickelten Bauprozess zu erstellen.

- Ab welchem Transportweg und Materialmenge ist eine Vorfertigung auf der Baustelle wirtschaftlich?
- Welche Produktivität ist nach aktuellem Stand der Technik gemessen in h/m^3 für die Stampflehmbauweise möglich ohne Qualitätseinbußen?
- Wie hoch sind die Kosten für eine automatisierte Fertigung und wie hoch ist die Amortisationsdauer der Investitionskosten? Wann wirft die Investition Gewinne ab (Break-even Point)?

Literaturverzeichnis

[1] Global Alliance for Buildings and Construction. „Gestartet: GLOBAL STATUS REPORT 2020 FÜR GEBÄUDE UND KONSTRUKTION | Globalabc.” https://globalabc.org/news/launched-2020-global-status-report-buildings-and-construction (Zugriff am: 25. Februar 2023).

[2] M. Gomaa, S. Schade, D. W. Bao und Y. M. Xie, „Automation in rammed earth construction for industry 4.0: Precedent work, current progress and future prospect,“ *Journal of Cleaner Production*, 2023. doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136569. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623007278

[3] H. Schroeder, *LEHMBAU: Mit Lehm ökologisch planen und bauen,* 3. Aufl. Wiesbaden: MORGAN KAUFMANN, 2018.

[4] J. Lohmann, „Potenziale der Digitalisierung im traditionellen Lehmbau,“ in *NACHHALTIGE UND DIGITALE BAUKONZEPTE: Methoden und wege zu einer kologisch*, T. Kölzer, Hg., [S.l.]: MORGAN KAUFMANN, 2022, S. 139–162.

[5] Statistisches Bundesamt, „Abfallaufkommen 2020 nach Abfallströmen Deutschland,“ Jg. 2022, Nr. 5321001207004.

[6] Martin Rauch, *Construction and Design with Rammed Earth, Martin Rauch, entrepreneur, Schlins, Autriche*, 2017. [Online]. Verfügbar unter: https://www.youtube.com/watch?v=HtZHDOAVnFA

[7] TU Braunschweig | Blogs. „Bauteile aus Stampflehm effizient herstellen - TU Braunschweig | Blogs.” https://magazin.tu-braunschweig.de/m-post/bauteile-aus-stampflehm-effizient-herstellen/ (Zugriff am: 27. Februar 2023).

[8] M. Gomaa, W. Jabi, V. Soebarto und Y. M. Xie, „Digital manufacturing for earth construction: A critical review,“ *Journal of Cleaner Production*, Jg. 338, S. 130630, 2022. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.130630. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622002712

[9] M. Rauch, *Gebaute Erde: Gestalten & Konstruieren mit Stampflehm,* 3. Aufl. München: DETAIL, 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.degruyter.com/document/doi/10.11129/9783955535728/html

[10] C. UNESCO World Heritage. „Old Walled City of Shibam.” https://whc.unesco.org/en/list/192/ (Zugriff am: 22. April 2023).

[11] Dachverband Lehm e.V., Hg. *Lehmbau-info Verbraucherinformation*. Weimar, 2014.

[12] KuLaDig. „Pisé-Haus Weilburg an der Lahn | Objektansicht.” https://www.kuladig.de/Objektansicht/KLD-306522 (Zugriff am: 22. April 2023).

[13] Form Earth. „Automated Rammed Earth Machines For House Walls.” https://formearth.com/ (Zugriff am: 6. März 2023).

[14] P. Marais. „OTTO COTTAGE – simply sustainable.” https://simplysustainable.co.za/projects/otto-cottage/ (Zugriff am: 22. April 2023).

[15] F. Volhard und U. Röhlen, Hg. *Lehmbau Regeln: Begriffe - Baustoffe - Bauteile,* 3. Aufl. (Praxis). Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009.

[16] Publisher. „Aktuelles - Nachhaltiges Bauen: BAM ebnet Weg für breite Anwendung von Lehmmauerwerk.” https://www.bam.de/Content/DE/Pressemitteilungen/2023/Umwelt/2023-03-16-nachhaltiges-bauen-lehmmauerwerk.html (Zugriff am: 5. April 2023).

[17] P. Petersen, „IRB 6700 und der Dreck,“ 31. August 2021. https://www.hochparterre.ch/nachrichten/themenfokus/irb-6700-und-der-dreck (Zugriff am: 27. Februar 2023).

[18] „KaLZ.” https://www.hft-stuttgart.de/forschung/projekte/aktuell/kalz (Zugriff am: 27. Februar 2023).

[19] Zentrum für Peripherie. „‚Alhambra‘ Workshop Lehmlärmschutzwände an Autobahnen.” https://zentrum-fuer-peripherie.org/startseite-test/projekte/brandenburgs-alhambra/alhambra-workshop/ (Zugriff am: 16. April 2023).

[20] V. Maniatidis und P. Walker, „A Review of Rammed Earth Construction,“ *DTI Project Report*, 2003. [Online]. Verfügbar unter: https://researchportal.bath.ac.uk/en/publications/a-review-of-rammed-earth-construction

[21] H. Stephan, „Additive im Öl – Bedeutung und Aufgaben,“ *ADDINOL Lube Oil GmbH*, 14. November 2019. https://addinol.de/service/expertentipps/additive/ (Zugriff am: 27. April 2023).

[22] G. Minke, *Building with earth: Design and technology of a sustainable architecture*. Basel: Birkhäuser Basel, 2006.

[23] Thurm C., „Analyse der Möglichkeiten der ökologisch verträglichen Modifizierung von Baulehmen mit Zuschlägen und Zusatzstoffen,“ Diplomarbeit unveröffentlicht, zitiert nach Schroeder, Horst: Lehmbau. Mit Lehm ökologisch planen und bauen. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. 2019. Darstellung von L. Disser, Masterarbeit TU München.2021., Weimar, Bauhaus-Universität, Fak. Bauingenieurwesen, 2001.

[24] I. Chang, J. Im, M.-K. Chung und G.-C. Cho, „Bovine casein as a new soil strengthening binder from diary wastes,“ *Construction and Building Materials*, Jg. 160, 1–9. zitiert aus Bachelorthesis HTWG Konstanz. A.Asal. 2021. S.54,55, 2018. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.009. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817322183

[25] Lehm-Laden GmbH & Co. KG. „Kasein.” https://www.lehm-laden.de/shop/kreidezeit-kasein-05-kg-2272#attr= (Zugriff am: 25. April 2023).

[26] H. Friese, „Kasein - Ein Kleber aus Milch,“ Seminararbeit, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2005.

[27] Lehm-Laden GmbH & Co. KG. „Weißfeinkalk I - Weißkalk CL80-Q.” https://www.lehm-laden.de/shop/zkw-otterbein-weissfeinkalk-i-weisskalk-cl80-q-25-kg-sack-13997?search=Wei%C3%9Fkalk&order=name+asc#attr= (Zugriff am: 25. April 2023).

[28] S. Walser. „Produktion von Zellulosedämmung – Siegfried Walser.” https://www.s-walser.at/einblasdaemmung/produktion/ (Zugriff am: 24. April 2023).

[29] Wikipedia. „Holzfaser.” https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Holzfaser&oldid=232893687 (Zugriff am: 24. April 2023).

[30] dataflex. „Nachhaltigkeits-Blog: Zirkularität, das neue Modewort in der Nachhaltigkeit?” https://www.dataflex-int.com/de/nachrichten/nachhaltigkeits-blog-zirkularitat-das-neue-modewort-in-der-nachhaltigkeit (Zugriff am: 3. April 2023).

[31] Umweltbundesamt. „Urban Mining.” https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/urban-mining#was-ist-urban-mining- (Zugriff am: 23. April 2023).

[32] line to circle, „Urban Mining – die Stadt als Mine für Rohstoffe,“ *Julia*, 18. Juni 2020 (Zugriff am: 23. April 2023).

[33] Madaster Germany. „Unsere Vision: Materialien eine Identität geben | Madaster.” https://madaster.de/vision/ (Zugriff am: 27. März 2023).

[34] BAMB. „About bamb - BAMB.” https://www.bamb2020.eu/about-bamb/ (Zugriff am: 23. April 2023).

[35] EPEA Part of Drees & Sommer. „Cradle to Cradle- Gebäude.” https://epea.com/leistungen/gebaeude (Zugriff am: 31. März 2023).

[36] OEKOBAU.DAT. „Beton C25/30.” https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=71667cf3-ede8-42d2-b0ff-6f1071ad3b86&version=00.04.000&stock=OBD_2021_II&lang=de (Zugriff am: 23. April 2023).

[37] OEKOBAU.DAT. „Stampflehm.” https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=59622fc0-d719-43bf-a16b-ae924ae0d276&version=20.19.120&stock=OBD_2021_II&lang=de (Zugriff am: 23. April 2023).

[38] M. R. Hall, R. Lindsay und M. Krayenhoff, Hg. *Modern earth buildings: Materials, engineering, constructions and applications* (Woodhead publishing series in energy number 33). Oxford, Ann Arbor, Michigan: Woodhead Publishing; ProQuest, 2012. [Online]. Verfügbar unter: https://learning.oreilly.com/library/view/-/9780857090263/?ar

[39] R. Lachmayer, T. Ehlers und R. B. Lippert, Hg. *Entwicklungsmethodik für die Additive Fertigung,* 2. Aufl. Wiesbaden, Germany: Springer Vieweg, 2022.

[40] Wikipedia. „Grünstandfestigkeit.” https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Grünstandfestigkeit&oldid=185920806 (Zugriff am: 9. April 2023).

[41] J. Kroder, „What does “state of the art techniques” mean? What is to be done?,“ *FB Pro GmbH*, 30. Oktober 2021. https://www.fb-pro.com/state-of-the-art-techniques-meaning/ (Zugriff am: 28. März 2023).

[42] Erne CS2 AG - Switzerland - http://www.cs2.ch. „Stampflehm.” https://www.erne.net/de/leistungen/technologien/stampflehm/ (Zugriff am: 31. März 2023).

[43] R. Westermann. „Stampflehmelemente mit QR-Code > Modulart: 2023.” https://www.modulart.ch/stampflehmelemente-mit-qr-code/ (Zugriff am: 9. März 2023).

[44] [redacted], *Stampflehmvorfertigung der Firma ERNE AG*, persönliche Kommunikation. Rüchligstrasse 53, CH-4332 Stein.

[45] ERNE AG Holzbau. „Posten | LinkedIn: Stampflehmbau.“ 2022. https://www.linkedin.com/posts/erne-ag-holzbau_lehm-stampflehmelemente-lehmbau-activity-6990574421816045568-hSXG/?utm_source=share&utm_medium=member_desktop (Zugriff am: 3. Februar 2023).

[46] Form Earth. „The First Automated Rammed Earth House Building Machine - Form Earth.“ 2020. https://www.youtube.com/watch?v=4TXj5IIkUIY (Zugriff am: 1. April 2023).

[47] Form Earth. „FORM EARTH INTO BUILDINGS.“ 2022. https://www.youtube.com/watch?v=vi8zpGqvz3c (Zugriff am: 6. März 2023).

[48] YouTube. „The First Automated Rammed Earth House Building Machine - Form Earth.” https://www.youtube.com/watch?v=4TXj5IIkUIY (Zugriff am: 6. März 2023).

[49] LEHMAG. „Trasskalk - LEHMAG.” https://lehmag.ch/materialien/trasskalk/ (Zugriff am: 1. April 2023).

[50] Martin Rauch, „Unstabilisierter Stampflehm – 100 % ERDE.: Warum ist es so schwer auf die 100 % zu vertrauen?,“ LEHM 2020- 8. Internationale Lehmbautagung.

[51] Kloft et al., „Robotische Fabrikation von Bauteilen aus Stampflehm,“ 2019.

[52] TU Braunschweig, „Robotische Fabrikation von Bauteilen aus Stampflehm,“ *Deutsche BauZeitschrift*, 26. Juni 2019. https://www.dbz.de/artikel/dbz_Robotische_Fabrikation_von_Bauteilen_aus_Stampflehm-3390495.html (Zugriff am: 3. Februar 2023).

[53] A. Chiusoli, „The first 3D printed House with earth | Gaia,“ *WASP*, 29. September 2018. https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-gaia/ (Zugriff am: 7. April 2023).

[54] A. Chiusoli, „TECLA | A 3D printed global habitat for sustainable living,“ *WASP*, 21. Januar 2021. https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-tecla/?utm_term=&utm_campaign=GLOBAL-en-SE-DSA-Sito&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=3352968755&hsa_cam=16280182754&hsa_grp=139246202851&hsa_ad=583042531321&hsa_src=g&hsa_tgt=dsa-19959388920&hsa_kw=&hsa_mt=&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gclid=Cj0KCQjw_r6hBhDdARIsAMIDhV-

Hoq_VrbJjRQiVBOU52uw8H_7hdN1-WfKNCmLuUYGBg_FYUjH_9h0aAm6lEALw_wcB (Zugriff am: 7. April 2023).

[55] WASP Srl. „Maker Economy Starter-Kit." https://www.3dwasp.com/en/maker-economy-starter-kit/ (Zugriff am: 3. Februar 2023).

[56] WASP Srl. „3D-Druckerhaus | Crane WASP | 3D-Drucker | WASP." https://www.3dwasp.com/en/3d-printer-house-crane-wasp/ (Zugriff am: 7. April 2023).

[57] Aedes Architecture Forum. „Lebende Prototypen: Digitale Fabrikation mit Biomaterialien." https://www.aedes-arc.de/cms/aedes/de/programm?id=20869192 (Zugriff am: 29. März 2023).

[58] M. Gomaa, J. Carfrae, S. Goodhew, W. Jabi und A. Veliz Reyes, „Thermal performance exploration of 3D printed cob," *Architectural Science Review*, Jg. 62, Nr. 3, S. 230–237, 2019, doi: 10.1080/00038628.2019.1606776.

[59] M. Gomaa, W. Jabi, A. Veliz Reyes und V. Soebarto, „3D printing system for earth-based construction: Case study of cob," *Automation in Construction*, Jg. 124, S. 103577, 2021. doi: 10.1016/j.autcon.2021.103577. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580521000285

[60] Deutsche Gesellschaft für MAuerwerks- und Wohnungsbau e.V. „2.2.2 Druckfestigkeit von Mauerwerk - Lehre zum Mauerwerksbau." https://www.mauerwerksbau-lehre.de/vorlesungen/2-festigkeits-und-verformungseigenschaften/22-festigkeit-von-mauerwerk/222-druckfestigkeit-von-mauerwerk (Zugriff am: 18. März 2023).

[61] A. Perrot, D. Rangeard und E. Courteille, „3D printing of earth-based materials: Processing aspects," *Construction and Building Materials*, Jg. 172, S. 670–676, 2018. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.017. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818308079

[62] BauNetz, „Vorfertigung | Holz | Glossar | Baunetz_Wissen," *BauNetz.* https://www.baunetzwissen.de/glossar/v/vorfertigung-6969916 (Zugriff am: 5. April 2023).

[63] R. Floss, *Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau: ZTV E-StB Ausgabe 2017 : Kommentar und Kompendium Erdbau, Felsbau, Landschaftsschutz für Verkehrswege,* 5. Aufl. Bonn: Kirschbaum Verlag, 2019.

[64] Wikipedia. „STL-Schnittstelle." https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=STL-Schnittstelle&oldid=227428987 (Zugriff am: 26. Februar 2023).

[65] E. Sutermeister, „Chemie des Kaseins," in *Das kasein*, E. Sutermeister und E. Brühl, Hg., [Place of publication not identified]: Springer, 1932, S. 1–29.

[66] *Baugrund, Untersuchung von Bodenproben –Proctorversuch*, DIN 18127, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Sep. 2012.

[67] Prusa Research a.s. „Infill Muster | Prusa Knowledge Base." https://help.prusa3d.com/de/article/infill-muster_177130 (Zugriff am: 18. März 2023).

[68] *Lehmsteine - Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung*, DIN 18945, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Dez. 2018.

[69] M. B. Philipp Wiehle, „Tragfähigkeit von Lehmmauerwerk – experimentelle und numerische Analyse," 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dachverband-lehm.de/lehm2020_online/pdf/lehm2020_b_wiehle-brinkmann_de.pdf

[70] J. Ozbolt, „Maßstabseffekt und Duktilität von Beton-und Stahlbetonkonstruktionen," Universität Stuttgart, 1995.

[71] Autodesk, Inc., *Inventor* (2021). [Online]. Verfügbar unter: https://www.autodesk.de/products/inventor/overview?term=1-YEAR&tab=subscription

[72] GrabCAD. „Sammlung von 3D-CAD-Modellen | GrabCAD-Community-Bibliothek: Abrollcontainer, Gabel, Bagger, Bodenfräse, Traktor, Radlader, Zelthalle." https://grabcad.com/library (Zugriff am: 15. April 2023).

[73] 3Dfindit. „Die visuelle Suchmaschine für 3D CAD, CAE & BIM Modelle: Stehlager, Spindelhubgetriebe, Schneckengetriebe mit Motor, Linearführung, Rollbahn, Förderband, Kegelradgetriebe." https://www.3dfindit.com/de/ (Zugriff am: 15. April 2023).

[74] Schüttflix. „Schüttflix." https://schuettflix.com/de/de/ (Zugriff am: 15. März 2023).

[75] MB Crusher. „Sieblöffel MB-LS170 S2, Innovativ und leistungsfähig - MB S.p.A." https://www.mbcrusher.com/de/at/produkte/siebl%C3%B6ffel/mb-ls170 (Zugriff am: 8. April 2023).

[76] conluto - Vielfalt aus Lehm. „Stampflehm grob 0-22mm." https://www.conluto.de/produkt/stampflehm-naturbraun-grob-oe-0-22-mm/ (Zugriff am: 28. März 2023).

[77] H. König, *Maschinen im Baubetrieb: Grundlagen und Anwendung,* 4. Aufl. (Leitfaden des Baubetriebs und der Bauwirtschaft). Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. [Online]. Verfügbar unter: https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=1967427

[78] Wacker Neuson, „Broschüre Walzen," Mrz. 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.wackerneuson.at/produkte/walzen

[79] Wikiwand. „Wikiwand - Walze (Baumaschine)." https://www.wikiwand.com/de/Walze_%28Baumaschine%29 (Zugriff am: 23. März 2023).

[80] CONRAD Ratgeber. „IP Schutzklassen und Schutzarten » Jetzt umfassend informieren!" https://www.conrad.de/de/ratgeber/technik-einfach-erklaert/ip-schutzklassen-und-schutzarten.html (Zugriff am: 27. April 2023).

[81] M. Rauch. „Ricola Kräuterzentrum | Lehm Ton Erde, Martin Rauch, Vorarlberg." https://www.lehmtonerde.at/de/projekte/projekt.php?pID=87 (Zugriff am: 28. März 2023).

[82] Vorarlberger Architektur Institut. „Pressemappe Mit Erde gebaut — Vorarlberger Architektur Institut: Ricola Kräuterzentrum, Martin Rauch." https://v-a-i.at/ausstellungen/mit-erde-gebaut/mit-erde-gebaut#&gid=1&pid=1 (Zugriff am: 28. März 2023).

Anhangverzeichnis

Anhang A: Technische Zeichnungen 90

a. Bauablauf: on-site Vorfertigung von Stampflehmelementen 90

b. Verdichtungsmaschine mit Materialförderungsanlage 91

c. Materialförderungsanlage 92

d. Verdichtungsmaschine 93

e. Verdichtungseinheit 94

f. Prinzip der Vorsatzschalung 95

Anhang B: Technische Datenblätter der Baustoffe (praktischer Teil) 96

Anhang C: Auswertung der Prüfkörper & Druckversuche 100

g. Auswertung der Prüfkörper 100

h. Skalierung der Prüfkörper 110

i. Vergleich der Schwindmaße 110

j. Abmessungen der Prüfkörper 111

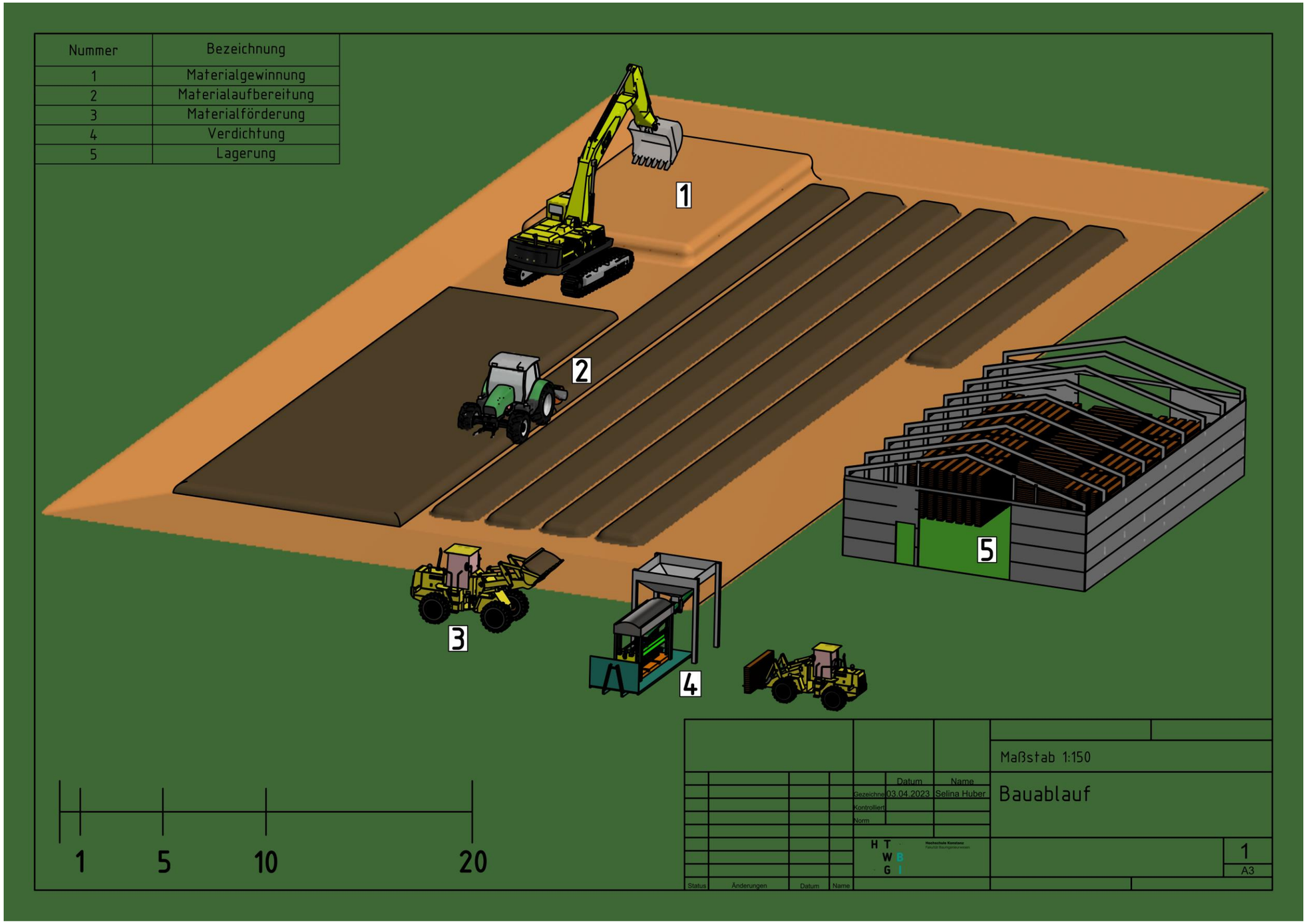
k. Massekonstanz 112

l. Auswertung der Druckversuche 113

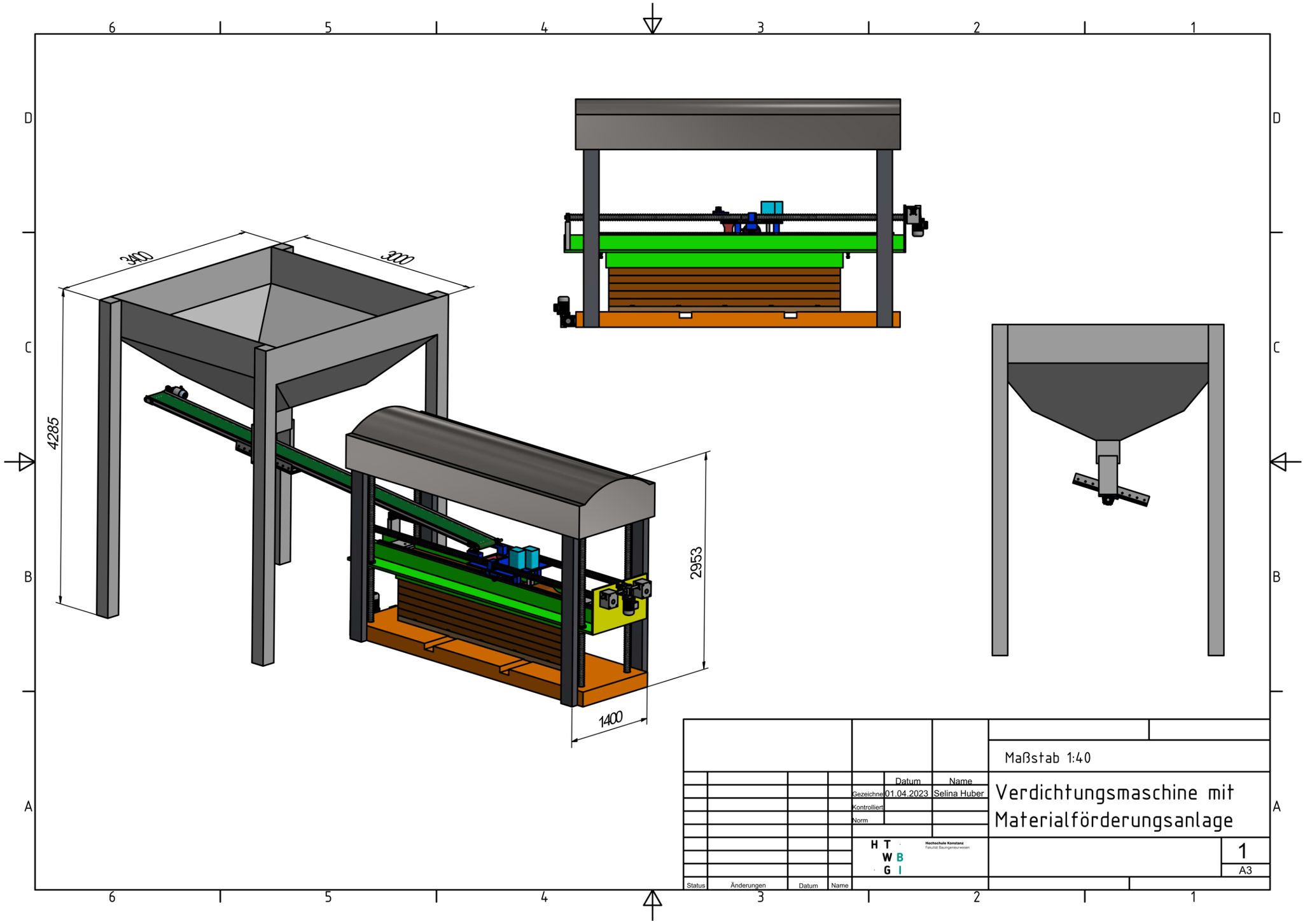
m. Kraft-Weg-Diagramme 115

Anhang A: Technische Zeichnungen

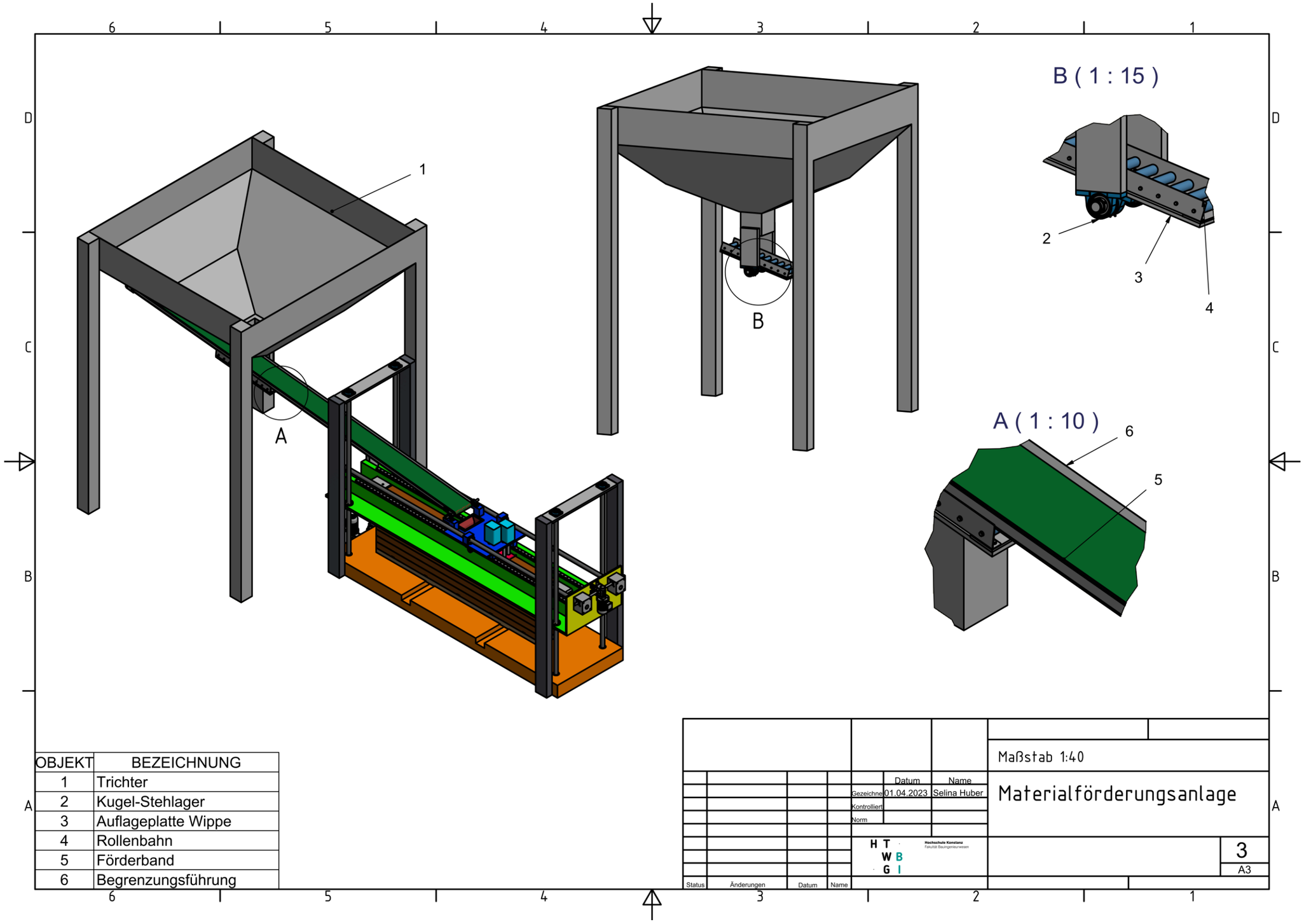
a. Bauablauf: on-site Vorfertigung von Stampflehmelementen



b. Verdichtungsmaschine mit Materialförderungsanlage

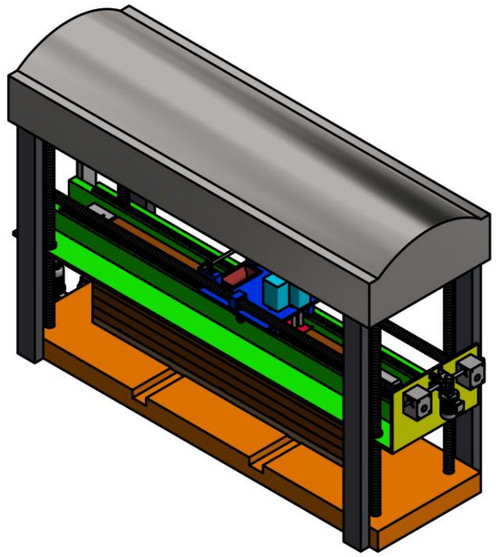


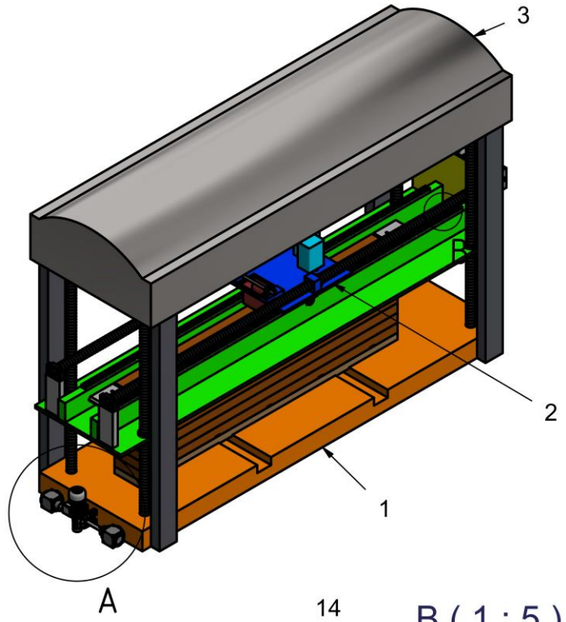
c. Materialförderungsanlage

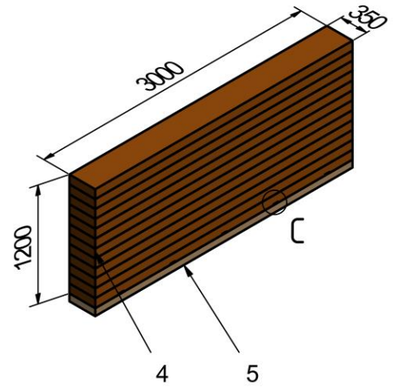


OBJEKT	BEZEICHNUNG
1	Trichter
2	Kugel-Stehlager
3	Auflageplatte Wippe
4	Rollenbahn
5	Förderband
6	Begrenzungsführung

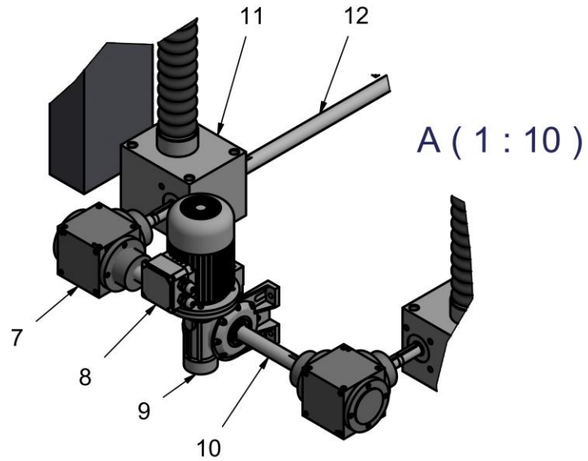
d. Verdichtungsmaschine





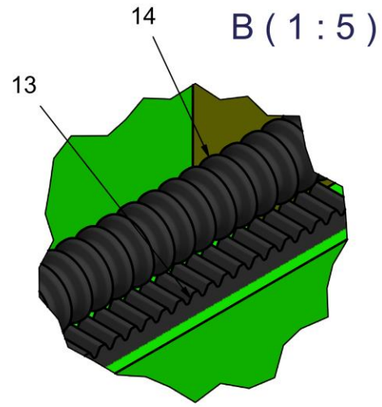


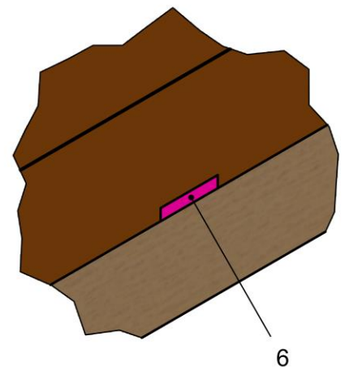
C (1 : 3)



A (1 : 10)

B (1 : 5)





OBJEKT	BEZEICHNUNG	OBJEKT	BEZEICHNUNG
1	Grundplatte	8	Elektromotor
2	Verdichtungseinheit	9	Schneckengetriebe
3	Überdachung	10	Gelenkwelle
4	Stampflehmwand	11	Spindelhubgetriebe
5	Holzbalken	12	Gelenkwelle lang
6	Holzlatten	13	Faltenbalg Linearführung
7	Kegelgetriebe	14	Faltenbalg Spindel

Maßstab 1:40

	Datum	Name
Gezeichnet	01.04.2023	Selina Huber
Kontrolliert		
Norm		

Status | Änderungen | Datum | Name

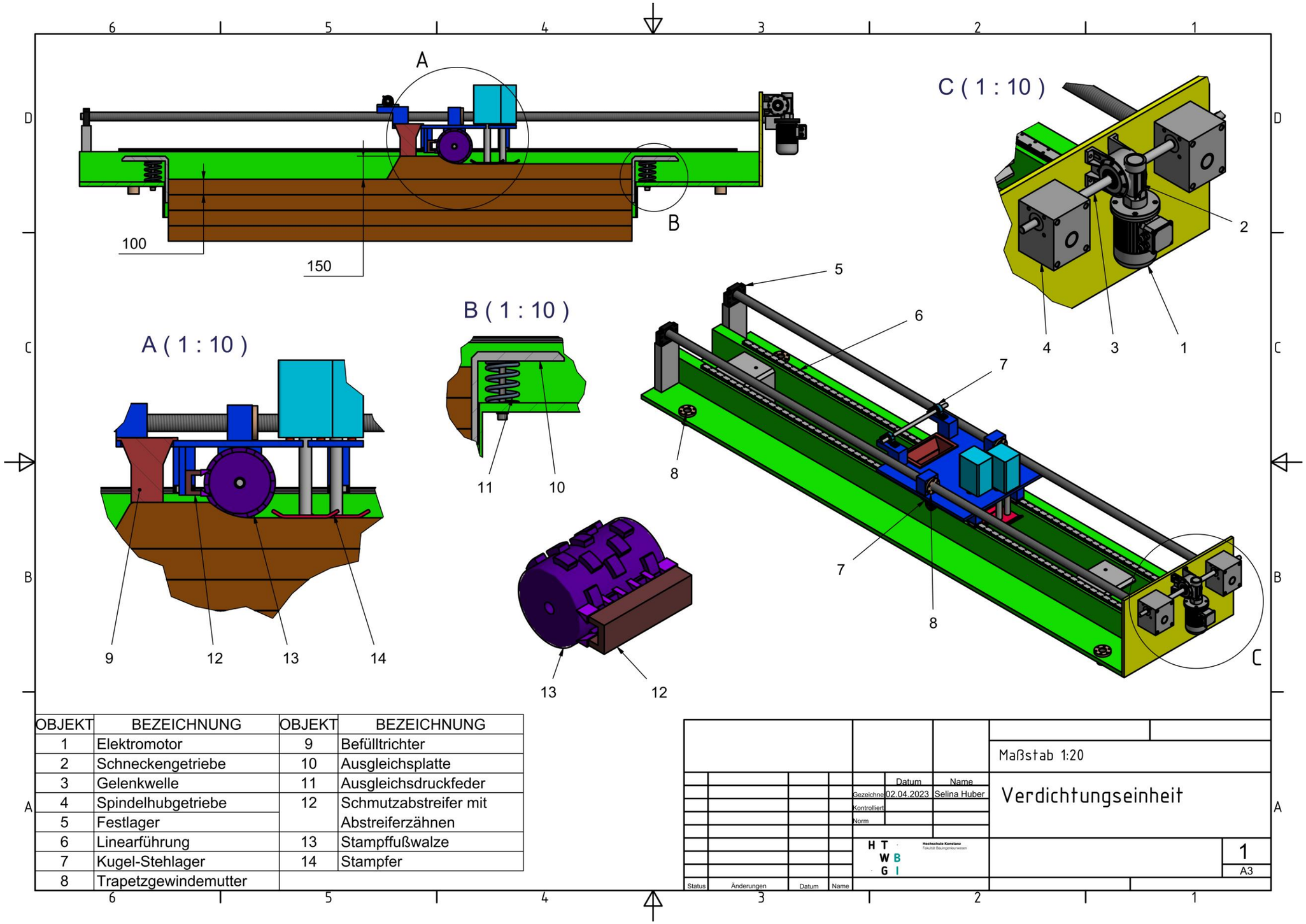
HTWG Hochschule Konstanz Fakultät Bauingenieurwesen

Verdichtungsmaschine

2

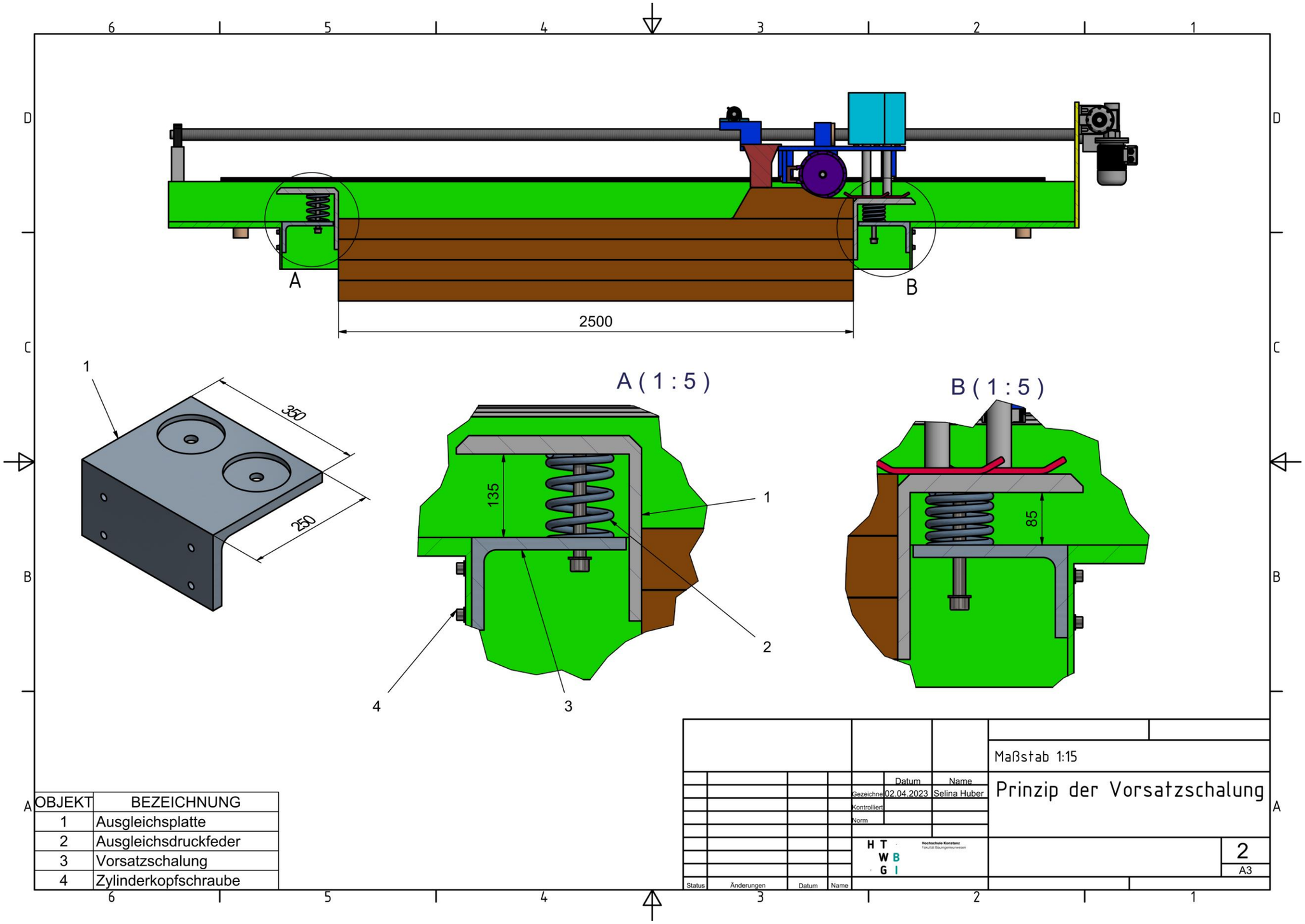
A3

e. Verdichtungseinheit



OBJEKT	BEZEICHNUNG	OBJEKT	BEZEICHNUNG
1	Elektromotor	9	Befülltrichter
2	Schneckengetriebe	10	Ausgleichsplatte
3	Gelenkwelle	11	Ausgleichsdruckfeder
4	Spindelhubgetriebe	12	Schmutzabstreifer mit Abstreiferzähnen
5	Festlager		
6	Linearführung	13	Stampffußwalze
7	Kugel-Stehlager	14	Stampfer
8	Trapetzgewindemutter		

f. Prinzip der Vorsatzschalung



OBJEKT	BEZEICHNUNG
1	Ausgleichsplatte
2	Ausgleichsdruckfeder
3	Vorsatzschalung
4	Zylinderkopfschraube

Anhang B: Technische Datenblätter der Baustoffe (praktischer Teil)

Produktblatt

CLAYTEC®

Baulehm
Art. 01.002, 01.003, 10.101

Anwendungsgebiet Bindemittel für Lehmmörtel, Lehmschüttungen, Strohlehm, Leichtlehmen usw. Ausgangsstoff für individuelle Mischungen und zur Herstellung von Wickelstaken.

Zusammensetzung Natur-Baulehm mit feinsandigem Mineralgerüst

Bindekraft Bindekraft geprüft nach 2.4.3 der „Lehmbau Regeln" des Dachverband Lehm

Lieferformen
Erdfeucht 01.003 in 1,0 t Big-Bags mit Korngrößen bis 5 mm
Trocken, gemahlen 01.002 in 1,0 t Big-Bags mit Korngrößen bis 0,5 mm
Trocken, gemahlen 10.101 in 25 kg Säcken, 48Sack/Pal. mit Korngrößen bis 0,5 mm in 25 kg Säcken, 48Sack/Pal.

Lagerung Erdfeucht vor Austrocknung (Verklumpung) oder Durchfeuchtung durch die Witterung schützen. Abgesehen von Konsistenzveränderungen ist die Lagerung unbegrenzt möglich.

Materialbedarf Der Materialbedarf liegt je nach Verwendungszweck bei 1 Raumteil Lehm zu 0,5 bis 2,5 Raumteilen Zuschlagstoff. Bei Verwendung als Schüttung ist bei der Ermittlung des Materialbedarfes zu berücksichtigen, dass das Material beim Einbau um ca. 15-20% verdichtet wird.

Aufbereitung Mit allen handelsüblichen Freifallmischern, Teller- und Trogzwangsmischern. In kleineren Mengen auch mit dem Motorquirl oder von Hand. Als Zuschläge werden in der Regel mineralisches Material der Korngrößen 0-16 mm, pflanzliches Material oder pflanzliche Fasern verwendet. Zuerst Wasser, dann Lehm und zuletzt die Zuschläge in die Mischmaschine geben und intensiv mischen.

Baulehm ist als Grundstoff für im Lehmbau erfahrene Handwerker vorgesehen. Mischungsverhältnisse sind abhängig vom Verwendungszweck und den Zuschlägen. Rezepturen sind individuell zu entwickeln.

Einbau Deckenschüttung Das Material wird zwischen Lagerhölzer oder Deckenbalken geschüttet und in der Regel lediglich schwach verdichtet. Die Trockenrohdichte und somit das Flächengewicht der Deckenfüllung hängen vom Maß der Verdichtung ab. Bei üblichem Einbau liegt die Trockenrohdichte bei ca. 1.300 kg/m³. Die Feuchtebelastung von Holz-Einschüben oder anderer angrenzender Bauteile ist zu berücksichtigen. Nach dem Einbau muss durch ausreichende Querlüftung (d.h. 24 Stunden pro Tag alle Fenster und Türen geöffnet) oder maschinell für rasche Trocknung gesorgt werden. Zum nachfolgenden Einbau von Holzböden o.ä. muss die Schüttung völlig ausgetrocknet sein.

Hinweis Ist besonders gute Rieselfähigkeit und Verarbeitbarkeit der Schüttung gefordert empfehlen wir unser abgemagertes Produkt Lehm-Mauermörtel (CLAYTEC 05.020, 05.220).

© CLAYTEC GmbH & Co. KG · 41751 Viersen · Ausgabe 02-2021 · gültig 12 Monate, danach siehe www.claytec.de

KREIDEZEIT
Naturfarben

Kaseingrundierung

Produktinformation Art. 145 11.10.2019

■ Allgemeines

Vielfältig einsetzbare farblos transparente Grundierung für nachfolgende Anstriche und dünnlagige Putzaufträge mit Kreidezeit Kaseinfarben, Kalkfarben und Putzen im Innenbereich. Kreidezeit Kaseingrundierung hat keinen reduzierenden Einfluss auf die Dampfaufnahme von Putzen (sD Wert < 0,01 m), und ist damit eine ideale Grundierung insbesondere für Lehm- und Kalkputze.

■ Anwendung

Geeignet zur Verarbeitung auf allen unbehandelten und saugenden Untergründen wie Lehm-, Kalk-, Kalkzement-, Gipsputze, Gipskarton und Gipsfaserplatten, Stein, Beton.
Empfohlen zur Grundierung saugfähiger Altanstriche vor deren Renovierung: z. B. Kreidezeit Kaseinfarben, Lehmfarben, Sumpfkalkfarben und Dispersionsfarben.
Ungeeignet für alle glatten, nicht saugfähigen Flächen und dauerfeuchte Untergründe.
Für transparente Verfestigung von Putzen, insbesondere Lehmputzen im Innenbereich; hier ist das Anlegen von Probeflächen erforderlich (siehe „Tipps").
Der Einsatz der Kaseingrundierung innerhalb der verschiedenen Kreidezeit Farb- und Putzsysteme ist in den entsprechenden Produktinformationen beschrieben.

■ Eigenschaften

- Pulver zum Anrühren mit Wasser
- Setzt die Saugfähigkeit stark saugender Untergründe herab und gleicht unterschiedliche Saugfähigkeiten des Untergrundes aus
- Verfestigt leicht sandende Untergründe. sehr gutes Eindringvermögen
- farblos transparent
- leicht zu verarbeiten
- sehr ergiebig
- hoch diffusionsfähig.
- frei von Konservierungsstoffen
- Farbreste sind kompostierbar

■ Zusammensetzung (Volldeklaration)

Kasein, Soda

■ Geeignete Werkzeuge

Geeignete Werkzeuge sind gute Fassaden- und Deckenbürsten aus Naturborsten. Kaseingrundierung nicht spritzen oder mit der Rolle auftragen. Gute Fassaden- und Deckenbürsten finden Sie in unserem Sortiment.

Fassadenbürste	(Art. P 6080)
Kalk Streichbürste	(Art. P 6082)
Deckenbürste	(Art. P 6054.1)

■ Vorarbeiten

Der Untergrund muss **saugfähig**, sauber, trocken, fest, fettfrei und frei von durchschlagenden und färbenden Inhaltstoffen sein.

- Alte Leimfarbenanstriche und andere kreidende, bzw. nicht tragfähige Altanstriche gründlich entfernen. Tapetenleimreste gründlich vom Untergrund abwaschen.
- Oberflächen gründlich entstauben, sandende Untergründe gründlich abfegen.
- Altanstriche auf gute Haftung prüfen und ggf. entfernen.
- Bindemittelanreicherungen und Sinterhaut an Putzoberflächen entfernen. Frische kalkhaltige Putze ätzen.
- Schalölreste auf Beton entfernen.
- Lose sitzende Putz-, Mauerteile entfernen und mit artgleichem Material ausbessern.
- schimmelbefallene mineralische Untergründe mit Sodalauge säubern.

■ Anrühren der Kaseingrundierung

Für das Anrühren der Kaseingrundierung eignet sich am besten ein 10 Liter-Eimer und ein Rührgerät (Bohrmaschine + Quirl). Beutelinhalt Kaseingrundierung (250 g) unter ständigem Rühren in 3 Liter sauberes kaltes Wasser geben. Dabei darauf achten, dass alle Klümpchen verrührt werden. Nach einer Quellzeit von ca. 30 Minuten noch einmal kräftig durchrühren und mit 5 Liter Wasser verdünnen.

■ Verarbeitung

Kaseingrundierung gleichmäßig und satt auftragen.
Nur so viel Flüssigkeit auftragen, wie vom Untergrund aufgenommen wird. Überstände (nassglänzende Stellen) vor dem Trocknen unbedingt mit einem Lappen abnehmen.
Verarbeitungstemperatur mind. 8°C.
Die angerührte Grundierung muss am gleichen Tag verarbeitet werden. Schlecht oder faulig riechende Grundierung unter keinen Umständen weiter verarbeiten: Gefahr langanhaltender Geruchprobleme auch nach Trocknung!

■ Trockenzeiten bei Normalklima

Nach ca. 8 Std. bei 20 °C getrocknet und mit Anstrichen oder Putzen auf Sumpfkalk- oder Kaseinbasis überarbeitbar.

■ Verbrauch

Je nach Saugfähigkeit des Untergrundes reichen 250 g Pulver für ca. 40 - 60 m². Genaue Verbrauchswerte sind am Objekt zu ermitteln.

■ Gebindegrößen

	Inhalt	Reichweite
Art. 145	250 g (ergibt 8 Liter fertige Grundierung	40-60 m²

Preise entnehmen Sie bitte der gültigen Preisliste.

KREIDEZEIT Naturfarben GmbH Kassemühle 3 . D-31195 Lamspringe . Telefon +49 (0) 50 60 - 60 80 650
Fax +49 (0) 50 60 - 60 80 680 . info@kreidezeit.de . www.kreidezeit.de

KREIDEZEIT
Naturfarben

Kaseingrundierung

Produktinformation Art. 145 11.10.2019

■ **Lagerung**
Kühl, trocken und frostfrei gelagert ist das Pulver mind. 2 Jahre haltbar.

■ **Reinigung der Werkzeuge**
sofort nach Gebrauch mit Wasser.

■ **Entsorgung von Produktresten**
Produktreste nicht in das Abwasser geben. Produktreste sind kompostierbar, bzw. können eingetrocknet in den Hausmüll gegeben werden.

■ **Tipps**
Transparentes Fixieren von Putzen:
Für das transparente Fixieren von Lehm- und anderen Putzen ohne nachfolgenden Farbauftrag empfehlen wir Kreidezeit Wandlasur Bindemittel (Art. 760). Eine detailliert Anleitung zur Vorgehensweise finden Sie in der zugehörigen Produktinformation.

■ **Kennzeichnung gem. ChemVOCFarbV**
VOC Höchstgehalt (Kat. A/h): 30 g/l (2010), Produkt enthält max. 1 g/l VOC.

■ **Kennzeichnung**
entfällt, kein Gefahrgut.

■ **Achtung**
Auf mögliche Naturstoffallergien achten. Durch die eingesetzten Naturrohstoffe tritt ein typischer Produktgeruch auf, der in trockener Umgebung mit der Zeit verschwindet! **Für Kinder unerreichbar lagern.**

Die beschriebenen Angaben wurden nach dem neuesten Stand der uns vorliegenden Erfahrungen festgestellt. Wegen der Verarbeitungsmethoden und Umwelteinflüsse sowie der verschiedenartigen Beschaffenheit der Untergründe, muss eine Verbindlichkeit für die allgemeine Rechtsgültigkeit der einzelnen Empfehlungen ausgeschlossen werden. Vor der Anwendung ist das Produkt vom Verarbeiter auf Eignung für den Anwendungszweck zu prüfen (Probeanstrich).

Bei Neuauflage oder Produktveränderung verlieren die Texte ihre Gültigkeit. Die jeweils neuesten Produktinformationen erhalten Sie bei Kreidezeit direkt oder im Internet: www.kreidezeit.de

KREIDEZEIT Naturfarben GmbH Kassemühle 3 . D-31195 Lamspringe . Telefon +49 (0) 50 60 - 60 80 650
Fax +49 (0) 50 60 - 60 80 680 . info@kreidezeit.de . www.kreidezeit.de

ZEMENT- UND KALKWERKE
OTTERBEIN

Technisches Merkblatt

Weißkalkhydrat II CL 90

Weißkalk
EN 459-1 CL 90 - S
EN 12518 (Klasse 1, Qualität A, Typ 1)

Mischungsverhältnisse für Normalmörtel in Raumteilen

Mauermörtel

Mörtelgruppe	Weißkalkhydrat	Zement	Sand
I	1	-	3
II	2	1	8
IIa	1	1	6

Putzmörtel

PIa	1	-	3,5 bis 4,5

Kalkanstriche

Hygienische Kalkanstriche (z.B. Weissen von Stallungen)	2,5 kg mit ca. 5 Liter Wasser
Kalkanstrich	1,0 kg mit ca. 4 Liter Wasser

Zusammensetzung
Otterbein Weißkalkhydrat II ist ein Weißkalk CL 90-S nach EN 459-1. Weißkalkhydrat II entspricht Klasse 1, Qualität A, Typ 1 nach EN 12518 „Produkt zur Aufbereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch". Otterbein Weißkalkhydrat II ist ein gebrannter, gelöschter Luftkalk. Die Erhärtung erfolgt durch Carbonatisierung.

Anwendung
- zur Behandlung von Trinkwasser
- zur Abwasser- und Klärschlammbehandlung
- zur Herstellung von Mauer- und Putzmörtel
- zur Erstellung von Kalkanstrichen
- zur pH-Wert-Regulierung
- im Straßenbau zur Bodenverbesserung und -verfestigung

Lieferung
in 25 kg-Säcken
in Containern
in Silo-Fahrzeugen

Lagerung
Trocken, möglichst auf Holzrosten und vor Zugluft geschützt. Die Lagerzeit soll 3 Monate nicht überschreiten.

Technische Daten

$Ca(OH)_2 + Mg(OH)_2$:	ca. 96 %
Schüttdichte:	ca. 0,4 kg/dm³
pH-Wert:	≥ 12
Neutralisationswert:	73% CaO

Sicherheitshinweise
Produkt reagiert mit Wasser stark alkalisch, deshalb: Haut und Augen schützen, bei Berührung gründlich mit Wasser spülen, bei Augenkontakt unverzüglich Arzt aufsuchen.

Qualitätsüberwachung
Otterbein Weißkalkhydrat II wird in unserem Werkslabor sowie in einem anerkannten Prüfinstitut im Rahmen der Eigenüberwachung fortlaufend auf die Einhaltung seiner Zusammensetzung und Eigenschaften geprüft. Damit ist eine gleichbleibende Qualität des Produktes gesichert. Otterbein Weißkalkhydrat II trägt das Gütezeichen „Baukalk" und ist zertifiziert nach EN 459-1.

Den Angaben dieses technischen Merkblattes liegen eigene Erkenntnisse unserer Entwicklungsabteilung und gesammelte Erfahrungen aus der Praxis zugrunde. Eine Verbindlichkeit für die exakte Gültigkeit der einzelnen Daten lässt sich daraus jedoch nicht ableiten, da unterschiedliche Verarbeitungsvoraussetzungen bzw. Verarbeitungsmethoden außerhalb unseres Einflusses liegen. Bezüglich der Qualität unserer Produkte verweisen wir auf die Gewährleistung im Rahmen unserer allgemeinen Geschäftsbedingungen. Bei weiteren Fragen zur Anwendung stehen Ihnen unsere Außendienst-Fachberater gerne zur Verfügung. Änderungen, die zur Verbesserung des Produkts führen, behalten wir uns vor. Ausgabe 06.09.2017 (Ersetzt alle früheren Ausgaben).

Zement- und Kalkwerke Otterbein GmbH & Co. KG • Hauptstraße 50 • 36137 Großenlüder
www.zkw-otterbein.de

Anhang C: Auswertung der Prüfkörper & Druckversuche

g. Auswertung der Prüfkörper

Auswertung Prüfkörper P1-P5

Materialzusammensetzung	**[g]**	**[g]**	**[%]**
Claytec Lehmpulver 10.101	2800,00	1000,00	70,00
Quarzsand 0,1-0,3 mm	500,00	178,57	12,50
Trockenmasse	3300,00	1178,57	82,50
Wasser	700,00	250,00	17,50
Gesamte Masse ∑	4000,00	1428,57	100,00

Dichteprüfung P1-P5	
Gewicht vor Trocknung in [g]	204,60
Volumen vor Trocknung in [cm^3]	125,39
Nassdichte in [g/cm^3]	1,63
Gewicht nach Trocknung in [g]	167,40
Volumen nach Trocknung in [cm^3]	118,09
Trockendichte in [g/cm^3]	1,42
Gewichtsverlust in [%]	18,18
davon Wasser bis zu [%]	17,50
Differenz = trockene Reste in Schalung in [%]	0,68
Differenz = Reste in Schalung in [g]	1,14

Druckeinstellungen	
Schichthöhe in [mm]	2,00
Anzahl massiver Schichten Boden	2
Anzahl massiver Schichten Decke	2
Anzahl vertikaler Konturen	2
Infill Bienenwaben	40%
Luftdruck für Materialförderung in [bar]	~4,8
Druckgeschwindigkeit in [mm/s]	26,00
Druckzeit	11min 54s
durchschnittliche Extrusionsmenge in [g/s]	0,29

	P1	P2	P3	P4	P5	Durchschnittswerte
Abmessungen feucht in [mm]						
x-Richtung *	49,96	50,00	50,65	50,34	50,04	50,20
y-Richtung *	49,91	50,29	50,86	50,66	50,08	50,36
z-Richtung	49,00	50,00	49,00	50,00	50,00	49,60
Gewicht feucht in [g]	205,00	209,00	207,00	211,00	191,00	204,60
Volumen in [cm^3]	122,18	125,73	126,23	127,51	125,30	125,39
Abmessungen trocken in [mm]						
x-Richtung *	48,85	49,29	48,74	50,28	49,12	49,26
y-Richtung *	49,54	49,73	49,09	49,81	48,88	49,41
z-Richtung	48,22	49,01	48,57	48,26	48,54	48,52
Gewicht trocken in [g] (Innenraumklima)	166,00	171,00	170,00	173,00	157,00	167,40
Volumen in [cm^3]	116,69	120,14	116,21	120,86	116,54	118,09
Schwindmaße in [%]						
x-Richtung	2,22	1,42	3,77	0,12	1,84	1,87
y-Richtung	0,74	1,11	3,48	1,68	2,40	1,88
z-Richtung	1,59	1,98	0,88	3,48	2,92	2,17
Durchschnittswerte einzelner Prüfkörper	1,52	1,50	2,71	1,76	2,38	1,97
Gesamtschwindmaß des Volumens	4,49	4,44	7,93	5,21	6,99	5,82

* Die Abmessungen in x- und y-Richtung wurden immer auf selber Prüfkörperhöhe gemessen, um das Schwindmaß nicht durch unterschiedliche Querschnittsflächen zu verfälschen

P = Prüfkörper
V = Vollquerschnittsprüflörper
VD = Vollquerschnittssprüfkörper Druck

Auswertung Prüfkörper V 1-5, VD 1-5

Materialzusammensetzung	**[g]**	**[g]**	**[%]**
Claytec Lehmpulver 10.101	2800,00	1000,00	70,00
Quarzsand 0,1-0,3 mm	500,00	178,57	12,50
Trockenmasse	3300,00	1178,57	82,50
Wasser	700,00	250,00	17,50
Gesamte Masse ∑	4000,00	1428,57	100,00

Dichteprüfung für V 1-5		**Dichteprüfung (mit Durchschnittswerten VD)**	
Gewicht vor Trocknung in [g]	249,00	Gewicht vor Trocknung in [g]	249,23
Volumen vor Trocknung in [cm^3]	125	Volumen vor Trocknung in [cm^3]	131,58
Nassdichte in [g/cm^3]	1,99	Nassdichte in [g/cm^3]	1,89
Gewicht nach Trocknung in [g]	207,92	Gewicht nach Trocknung in [g]	204,55
Volumen nach Trocknung in [cm^3]	111,33	Volumen nach Trocknung in [cm^3]	122,03
Trockendichte in [g/cm^3]	1,87	Trockendichte in [g/cm^3]	1,68
Gewichtsverlust in [%]	16,50	Gewichtsverlust in [%]	17,93
davon Wasser bis zu [%]	17,50	davon Wasser bis zu [%]	17,50
Differenz = Restfeuchte im Prüfkörper in [%]	-1,00	Differenz = trockene Reste in Schalung in [%]	0,43
Differenz = Restfeuchte im Prüfkörper in [g]	-2,08	Differenz = Reste in Schalung in [g]	0,88

Druckeinstellungen für VD 1-5	
Schichthöhe in [mm]	2,00
Anzahl massiver Schichten	25
Anzahl vertikaler Konturen	2
Infill geradlinig	100%
Luftdruck für Materialförderung in [bar]	~4,8
Druckgeschwindigkeit in [mm/s]	26,00
Druckzeit	15min 24s
durchschnittliche Extrusionsmenge in [g/s]	0,26

	V1-5	VD 1-5 (1)	VD 1-5 (2)	Durchschnittswerte VD
Abmessungen feucht in [mm]				
x-Richtung *	50,00	49,91	50,91	50,41
y-Richtung *	50,00	51,62	52,27	51,95
z-Richtung	50,00	50,50	50,00	50,25
Gewicht feucht in [g]	249,00	241,94	256,52	249,23
Volumen in [cm^3]	125,00	130,11	133,05	131,58
Abmessungen trocken in [mm]				
x-Richtung *	48,14	49,62	50,70	50,16
y-Richtung *	48,09	49,74	50,96	50,35
z-Richtung	48,09	48,63	48,02	48,33
Gewicht trocken in [g] (Innenraumklima)	207,92	199,73	209,36	204,55
Volumen in [cm^3]	111,33	120,01	124,06	122,03
Schwindmaße in [%]				
x-Richtung	3,72	0,58	0,42	0,50
y-Richtung	3,82	3,65	2,51	3,08
z-Richtung	3,82	3,70	3,96	3,83
Durchschnittswerte einzelner Prüfkörper	3,79	2,65	2,30	2,47
Gesamtschwindmaß des Volumens	10,94	7,76	6,76	7,25

* Die Abmessungen in x- und y-Richtung wurden immer auf selber Prüfkörperhöhe gemessen, um das Schwindmaß nicht durch unterschiedliche Querschnittsflächen zu verfälschen

P = Prüfkörper
V = Vollquerschnittsprüflörper
VD = Vollquerschnittssprüfkörper Druck

Auswertung Prüfkörper P21

Materialzusammensetzung	**[g]**	**[g]**	**[%]**
Claytec Lehmpulver 10.101	2800,00	1000,00	66,67
Quarzsand 0,1-0,3 mm	700,00	250,00	16,67
Trockenmasse	3500,00	1250,00	83,33
Wasser	700,00	250,00	16,67
Gesamte Masse ∑	4200,00	1500,00	100,00

Dichteprüfung	
Gewicht vor Trocknung in [g]	1461,00
Volumen vor Trocknung in [cm^3]	986,04
Nassdichte in [g/cm^3]	1,48
Gewicht nach Trocknung in [g]	1226,50
Volumen nach Trocknung in [cm^3]	917,01
Trockendichte in [g/cm^3]	1,34
Gewichtsverlust in [%]	16,05
davon Wasser bis zu [%]	16,67
Differenz = Restfeuchte im Prüfkörper in [%]	-0,62
Differenz = Restfeuchte im Prüfkörper in [g]	-7,56

Druckeinstellungen	
Schichthöhe in [mm]	2,00
Anzahl massiver Schichten Boden	3
Anzahl massiver Schichten Decke	3
Anzahl vertikaler Konturen	2
Infill Bienenwaben	40%
Luftdruck für Materialförderung in [bar]	~4,0
Druckgeschwindigkeit in [mm/s]	26,00
Druckzeit	1h 19min 24s
durchschnittliche Extrusionsmenge in [g/s]	0,21

	P21
Abmessungen feucht in [mm]	
x-Richtung *	99,60
y-Richtung *	100,00
z-Richtung	99,00
Gewicht feucht in [g]	1461,00
Volumen in [cm^3]	986,04
Abmessungen trocken in [mm]	
x-Richtung *	97,39
y-Richtung *	96,08
z-Richtung	98,00
Gewicht trocken in [g] (Innenraumklima)	1226,50
Volumen in [cm^3]	917,01
Schwindmaße in [%]	
x-Richtung	2,22
y-Richtung	3,92
z-Richtung	1,01
Durchschnittswerte einzelner Prüfkörper	2,38
Gesamtschwindmaß des Volumens	7,00

* Die Abmessungen in x- und y-Richtung wurden immer auf selber Prüfkörperhöhe gemessen, um das Schwindmaß nicht durch unterschiedliche Querschnittsflächen zu verfälschen

P = Prüfkörper
V = Vollquerschnittsprüflörper
VD = Vollquerschnittssprüfkörper Druck

Auswertung Prüfkörper P22

Materialzusammensetzung	**[g]**	**[g]**	**[%]**
Claytec Lehmpulver 10.101	2800,00	1000,00	65,12
Quarzsand 0,1-0,3 mm	700,00	250,00	16,28
Trockenmasse	3500,00	1250,00	81,40
Wasser	800,00	285,71	18,60
Gesamte Masse ∑	4300,00	1535,71	100,00

Dichteprüfung	
Gewicht vor Trocknung in [g]	1545,00
Volumen vor Trocknung in [cm^3]	1009,99
Nassdichte in [g/cm^3]	1,53
Gewicht nach Trocknung in [g]	1259,00
Volumen nach Trocknung in [cm^3]	905,04
Trockendichte in [g/cm^3]	1,39
Gewichtsverlust in [%]	18,51
davon Wasser bis zu [%]	18,60
Differenz = Restfeuchte im Prüfkörper in [%]	-0,09
Differenz = Restfeuchte im Prüfkörper in [g]	-1,17

Druckeinstellungen	
Schichthöhe in [mm]	2,00
Anzahl massiver Schichten Boden	3
Anzahl massiver Schichten Decke	3
Anzahl vertikaler Konturen	2
Infill Bienenwaben	40%
Luftdruck für Materialförderung in [bar]	~4,0
Druckgeschwindigkeit in [mm/s]	26,00
Druckzeit	1h 19min 24s
durchschnittliche Extrusionsmenge in [g/s]	0,23

	P22
Abmessungen feucht in [mm]	
x-Richtung *	101,09
y-Richtung *	99,91
z-Richtung	100,00
Gewicht feucht in [g]	1545,00
Volumen in [cm^3]	1009,99
Abmessungen trocken in [mm]	
x-Richtung *	98,08
y-Richtung *	96,12
z-Richtung	96,00
Gewicht trocken in [g] (Innenraumklima)	1259,00
Volumen in [cm^3]	905,04
Schwindmaße in [%]	
x-Richtung	2,98
y-Richtung	3,79
z-Richtung	4,00
Durchschnittswerte einzelner Prüfkörper	3,59
Summe aller Richtungen	10,77
Gesamtschwindmaß des Volumens	10,39

* Die Abmessungen in x- und y-Richtung wurden immer auf selber Prüfkörperhöhe gemessen, um das Schwindmaß nicht durch unterschiedliche Querschnittsflächen zu verfälschen

P = Prüfkörper
V = Vollquerschnittsprüflörper
VD = Vollquerschnittssprüfkörper Druck

Auswertung Prüfkörper P31-P35

Materialzusammensetzung	**[g]**	**[g]**	**[%]**
Claytec Lehmpulver 10.101	2800,00	1000,00	66,05
Quarzsand 0,1-0,3 mm	500,00	178,57	11,79
Trockenmasse	3300,00	1178,57	77,85
Wasser	870,00	310,71	20,52
Bindemittel: Kasein	64,00	22,86	1,51
Alkali: Natriumcarbonat Na_2CO_3	5,10	1,82	0,12
Gesamte Masse ∑	4239,10	1513,96	100,00

Dichteprüfung P31-P35	
Gewicht vor Trocknung in [g]	193,39
Volumen vor Trocknung in [cm^3]	128,31
Nassdichte in [g/cm^3]	1,51
Gewicht nach Trocknung in [g]	154,16
Volumen nach Trocknung in [cm^3]	113,09
Trockendichte in [g/cm^3]	1,36
Gewichtsverlust in [%]	20,29
davon Wasser bis zu [%]	1,51
Differenz = trockene Reste in Schalung in [%]	18,78
Differenz = Reste in Schalung in [g]	28,94

Druckeinstellungen	
Schichthöhe in [mm]	2,00
Anzahl massiver Schichten Boden	2
Anzahl massiver Schichten Decke	2
Anzahl vertikaler Konturen	2
Infill Bienenwaben	40%
Luftdruck für Materialförderung in [bar]	~5,6
Druckgeschwindigkeit in [mm/s]	26,00
Druckzeit	11min 54s
durchschnittliche Extrusionsmenge in [g/s]	0,27

	P31	P32	P33	P34	P35	Durchschnittswerte
Abmessungen feucht in [mm]						
x-Richtung *	50,50	50,42	50,86	50,23	50,79	50,56
y-Richtung *	50,61	49,89	51,96	49,88	50,93	50,65
z-Richtung	50,00	49,50	51,00	50,00	50,00	50,10
Gewicht feucht in [g]	171,80	186,30	197,79	202,37	208,67	193,39
Volumen in [cm^3]	127,79	124,51	134,78	125,27	129,34	128,31
Abmessungen trocken in [mm]						
x-Richtung *	47,18	47,56	49,14	48,83	50,50	48,64
y-Richtung *	47,43	47,86	49,56	49,08	50,40	48,86
z-Richtung	48,16	47,54	47,02	47,76	47,43	47,58
Gewicht trocken in [g] (Innenraumklima)	139,37	147,40	158,87	159,71	165,43	154,16
Volumen in [cm^3]	107,75	108,20	114,51	114,45	120,72	113,09
Schwindmaße in [%]						
x-Richtung	6,58	5,67	3,38	2,80	0,57	3,80
y-Richtung	6,29	4,08	4,62	1,60	1,04	3,53
z-Richtung	3,68	3,96	7,80	4,48	5,14	5,03
Durchschnittswerte einzelner Prüfkörper	5,52	4,57	5,27	2,96	2,25	4,11
Gesamtschwindmaß des Volumens	15,68	13,10	15,04	8,64	6,66	11,86

* Die Abmessungen in x- und y-Richtung wurden immer auf selber Prüfkörperhöhe gemessen, um das Schwindmaß nicht durch unterschiedliche Querschnittsflächen zu verfälschen

P = Prüfkörper
V = Vollquerschnittsprüflörper
VD = Vollquerschnittssprüfkörper Druck

Auswertung Prüfkörper V31-35, VD31-35

Materialzusammensetzung	**[g]**	**[g]**	**[%]**
Claytec Lehmpulver 10.101	2800,00	1000,00	63,78
Quarzsand 0,1-0,3 mm	500,00	178,57	11,39
Trockenmasse	3300,00	1178,57	75,17
Wasser	770,00	275,00	17,54
Bindemittel: Kasein	160,00	57,14	3,64
Bindemittel: Calciumhydroxid	160,00	57,14	3,64
Gesamte Masse ∑	4390,00	1567,86	100,00

Dichteprüfung V 31-35		**Dichteprüfung VD 31-35 (mit Durchschnittswerten VD)**	
Gewicht vor Trocknung in [g]	215,00	Gewicht vor Trocknung in [g]	243,20
Volumen vor Trocknung in [cm^3]	125	Volumen vor Trocknung in [cm^3]	133,21
Nassdichte in [g/cm^3]	1,72	Nassdichte in [g/cm^3]	1,83
Gewicht nach Trocknung in [g]	164,75	Gewicht nach Trocknung in [g]	191,24
Volumen nach Trocknung in [cm^3]	104,06	Volumen nach Trocknung in [cm^3]	122,19
Trockendichte in [g/cm^3]	1,58	Trockendichte in [g/cm^3]	1,57
Gewichtsverlust in [%]	23,37	Gewichtsverlust in [%]	21,37
davon Wasser bis zu [%]	17,54	davon Wasser bis zu [%]	17,54
Differenz = Restfeuchte im Prüfkörper in [%]	5,83	Differenz = trockene Reste in Schalung in [%]	3,83
Differenz = Restfeuchte im Prüfkörper in [g]	9,61	Differenz = Reste in Schalung in [g]	7,32

Druckeinstellungen VD 31-35	
Schichthöhe in [mm]	2,00
Anzahl massiver Schichten	25
Anzahl vertikaler Konturen	2
Infill geradlinig	100%
Luftdruck für Materialförderung in [bar]	~5,6
Druckgeschwindigkeit in [mm/s]	26,00
Druckzeit	15min 24s
durchschnittliche Extrusionsmenge in [g/s]	0,26

	V 31-35	VD 31-35 (1)	VD 31-35 (2)	Durchschnittswerte VD
Abmessungen feucht in [mm]				
x-Richtung *	50,00	50,68	52,44	51,56
y-Richtung *	50,00	50,26	53,08	51,67
z-Richtung	50,00	50,50	49,50	50,00
Gewicht feucht in [g]	215,00	220,01	266,39	243,20
Volumen in [cm^3]	125,00	128,63	137,78	133,21
Abmessungen trocken in [mm]				
x-Richtung *	47,42	48,99	52,38	50,68
y-Richtung *	47,51	48,98	52,95	50,96
z-Richtung	46,19	48,14	46,47	47,31
Gewicht trocken in [g] (Innenraumklima)	164,75	174,74	207,74	191,24
Volumen in [cm^3]	104,06	115,50	128,87	122,19
Schwindmaße in [%]				
x-Richtung	5,16	3,33	0,12	1,73
y-Richtung	4,98	2,56	0,24	1,40
z-Richtung	7,62	4,67	6,12	5,40
Durchschnittswerte einzelner Prüfkörper	5,92	3,52	2,16	2,84
Gesamtschwindmaß des Volumens	16,75	10,21	6,47	8,27

* Die Abmessungen in x- und y-Richtung wurden immer auf selber Prüfkörperhöhe gemessen, um das Schwindmaß nicht durch unterschiedliche Querschnittsflächen zu verfälschen

P = Prüfkörper
V = Vollquerschnittsprüflörper
VD = Vollquerschnittssprüfkörper Druck

Auswertung Prüfkörper P41-P45

Materialzusammensetzung	**[g]**	**[g]**	**[%]**
Claytec Lehmpulver 10.101	2800,00	1000,00	63,78
Quarzsand 0,1-0,3 mm	500,00	178,57	11,39
Trockenmasse	3300,00	1178,57	75,17
Wasser	770,00	275,00	17,54
Bindemittel: Kasein	160,00	57,14	3,64
Alkali/Bindemittel: Calciumhydroxid $Ca(OH)_2$	160,00	57,14	3,64
Gesamte Masse ∑	4390,00	1567,86	100,00

Dichteprüfung P41- P45	
Gewicht vor Trocknung in [g]	
Volumen vor Trocknung in [cm^3]	
Nassdichte in [g/cm^3]	
Gewicht nach Trocknung in [g]	
Volumen nach Trocknung in [cm^3]	
Trockendichte in [g/cm^3]	
Gewichtsverlust in [%]	
davon Wasser bis zu [%]	
Differenz = trockene Reste in Schalung in [%]	
Differenz = Reste in Schalung in [g]	

Druckeinstellungen	
Schichthöhe in [mm]	2,00
Anzahl massiver Schichten Boden	2
Anzahl massiver Schichten Decke	2
Anzahl vertikaler Konturen	2
Infill Bienenwaben	40%
Luftdruck für Materialförderung in [bar]	~6,8
Druckgeschwindigkeit in [mm/s]	20,00
Druckzeit	17min
durchschnittliche Extrusionsmenge in [g/s]	0,00

Die Versuchsreihe P41-P45 ist fehlgeschlagen, da sich das Material im Schlauch entmischt hat und es somit unmöglich war die Prüfkörper zu drucken.

Mögliche Ursachen:
- nicht ausreichende Reaktion zwischen Kasein und Calciumhydroxid
- zu große Menge an Calciumhydroxid, welche durch ihren Anteil und den hohen PH-Wert die Eiweißstruktur des Kaseins beschädigt hat

	P41	P42	P43	P44	P45	Durchschnittswerte
Abmessungen feucht in [mm]						
x-Richtung *						
y-Richtung *						
z-Richtung						
Gewicht feucht in [g]						
Volumen in [cm^3]						
Abmessungen trocken in [mm]						
x-Richtung *						
y-Richtung *						
z-Richtung						
Gewicht trocken in [g] (Innenraumklima)						
Volumen in [cm^3]						
Schwindmaße in [%]						
x-Richtung						
y-Richtung						
z-Richtung						
Durchschnittswerte einzelner Prüfkörper						
Gesamtschwindmaß des Volumens						

* Die Abmessungen in x- und y-Richtung wurden immer auf selber Prüfkörperhöhe gemessen, um das Schwindmaß nicht durch unterschiedliche Querschnittsflächen zu verfälschen

P = Prüfkörper
V = Vollquerschnittsprüflörper
VD = Vollquerschnittssprüfkörper Druck

Auswertung Prüfkörper P51-P55

Materialzusammensetzung	**[g]**	**[g]**	**[%]**
Claytec Lehmpulver 10.101	2800,00	1000,00	67,19
Quarzsand 0,1-0,3 mm	500,00	178,57	12,00
Trockenmasse	3300,00	1178,57	79,19
Wasser	850,00	303,57	20,40
Bindemittel: Finnpappereste	17,00	6,07	0,41
Gesamte Masse ∑	4167,00	1488,21	100,00

Dichteprüfung P51-P55	
Gewicht vor Trocknung in [g]	213,00
Volumen vor Trocknung in [cm^3]	130,50
Nassdichte in [g/cm^3]	1,63
Gewicht nach Trocknung in [g]	175,20
Volumen nach Trocknung in [cm^3]	122,32
Trockendichte in [g/cm^3]	1,43
Gewichtsverlust in [%]	17,75
davon Wasser bis zu [%]	20,40
Differenz = Restfeuchte im Prüfkörper in [%]	-2,65
Differenz = Restfeuchte im Prüfkörper in [g]	-4,65

Druckeinstellungen	
Schichthöhe in [mm]	2,00
Anzahl massiver Schichten Boden	2
Anzahl massiver Schichten Decke	2
Anzahl vertikaler Konturen	2
Infill Bienenwaben	40%
Luftdruck für Materialförderung in [bar]	~5,2
Druckgeschwindigkeit in [mm/s]	26,00
Druckzeit	11min 54s
durchschnittliche Extrusionsmenge in [g/s]	0,30

	P51	P52	P53	P54	P55	Durchschnittswerte
Abmessungen feucht in [mm]						
x-Richtung *	50,13	53,33	50,88	50,51	50,47	51,06
y-Richtung *	50,93	53,49	51,69	50,52	51,00	51,53
z-Richtung	50,00	49,00	49,50	49,50	50,00	49,60
Gewicht feucht in [g]	217,00	222,00	209,00	203,00	214,00	213,00
Volumen in [cm^3]	127,66	139,78	130,18	126,31	128,70	130,50
Abmessungen trocken in [mm]						
x-Richtung *	49,42	52,88	49,49	50,47	49,02	50,26
y-Richtung *	49,77	53,30	50,24	49,44	49,62	50,47
z-Richtung	48,24	48,00	48,26	48,40	48,21	48,22
Gewicht trocken in [g] (Innenraumklima)	180,00	181,00	172,00	168,00	175,00	175,20
Volumen in [cm^3]	118,65	135,29	119,99	120,77	117,26	122,32
Schwindmaße in [%]						
x-Richtung	1,42	0,84	2,73	0,08	2,87	1,58
y-Richtung	2,28	0,36	2,81	2,14	2,71	2,04
z-Richtung	3,52	2,04	2,51	2,22	3,58	2,78
Durchschnittswerte einzelner Prüfkörper	3,79	0,20	6,40	0,13	9,28	3,96
Summe aller Richtungen	7,21	3,24	8,04	4,44	9,16	6,40
Gesamtschwindmaß des Volumens	7,05	3,21	7,83	4,39	8,88	6,27

* Die Abmessungen in x- und y-Richtung wurden immer auf selber Prüfkörperhöhe gemessen, um das Schwindmaß nicht durch unterschiedliche Querschnittsflächen zu verfälschen

P = Prüfkörper
V = Vollquerschnittsprüflörper
VD = Vollquerschnittssprüfkörper Druck

Auswertung Prüfkörper P61-P65

Materialzusammensetzung	**[g]**	**[g]**	**[%]**
Claytec Lehmpulver 10.101	2800,00	1000,00	67,62
Quarzsand 0,1-0,3 mm	500,00	178,57	12,07
Trockenmasse	3300,00	1178,57	79,69
Wasser	790,00	282,14	19,08
Bindemittel: Finnpappereste	51,00	18,21	1,23
Gesamte Masse ∑	4141,00	1478,93	100,00

Dichteprüfung P61-P65	
Gewicht vor Trocknung in [g]	224,40
Volumen vor Trocknung in [cm^3]	129,25
Nassdichte in [g/cm^3]	1,74
Gewicht nach Trocknung in [g]	166,40
Volumen nach Trocknung in [cm^3]	118,98
Trockendichte in [g/cm^3]	1,40
Gewichtsverlust in [%]	25,85
davon Wasser bis zu [%]	1,23
Differenz = trockene Reste in Schalung in [%]	24,62
Differenz = Reste in Schalung in [g]	40,96

Druckeinstellungen	
Schichthöhe in [mm]	2,00
Anzahl massiver Schichten Boden	2
Anzahl massiver Schichten Decke	2
Anzahl vertikaler Konturen	2
Infill Bienenwaben	40%
Luftdruck für Materialförderung in [bar]	~5,6
Druckgeschwindigkeit in [mm/s]	20,00
Druckzeit	17min
durchschnittliche Extrusionsmenge in [g/s]	0,22

	P61	P62	P63	P64	P65	Durchschnittswerte
Abmessungen feucht in [mm]						
x-Richtung *	49,83	51,29	51,15	50,94	50,76	50,79
y-Richtung *	50,66	51,03	51,45	50,29	50,52	50,79
z-Richtung	50,50	50,00	50,00	50,00	50,00	50,10
Gewicht feucht in [g]	234,00	240,00	241,00	198,00	209,00	224,40
Volumen in [cm^3]	127,48	130,87	131,58	128,09	128,22	129,25
Abmessungen trocken in [mm]						
x-Richtung *	49,68	50,71	49,94	50,28	50,75	50,27
y-Richtung *	50,27	50,65	50,36	50,22	50,16	50,33
z-Richtung	46,27	46,99	47,98	47,74	46,13	47,02
Gewicht trocken in [g] (Innenraumklima)	169,00	167,00	162,00	162,00	172,00	166,40
Volumen in [cm^3]	115,56	120,69	120,67	120,55	117,43	118,98
Schwindmaße in [%]						
x-Richtung	0,30	1,13	2,37	1,30	0,02	1,03
y-Richtung	0,77	0,74	2,12	0,14	0,71	0,90
z-Richtung	8,38	6,02	4,04	4,52	7,74	6,14
Durchschnittswerte einzelner Prüfkörper	3,15	2,63	2,84	1,98	2,82	2,69
Gesamtschwindmaß des Volumens	9,36	7,77	8,29	5,89	8,42	7,95

* Die Abmessungen in x- und y-Richtung wurden immer auf selber Prüfkörperhöhe gemessen, um das Schwindmaß nicht durch unterschiedliche Querschnittsflächen zu verfälschen

P = Prüfkörper
V = Vollquerschnittsprüflörper
VD = Vollquerschnittssprüfkörper Druck

Auswertung Prüfkörper V 61-65, VD 61-65

Materialzusammensetzung	**[g]**	**[g]**	**[%]**
Claytec Lehmpulver 10.101	2800,00	1000,00	67,62
Quarzsand 0,1-0,3 mm	500,00	178,57	12,07
Trockenmasse	3300,00	1178,57	79,69
Wasser	790,00	282,14	19,08
Bindemittel: Finnpappereste	51,00	18,21	1,23
Gesamte Masse ∑	4141,00	1478,93	100,00

Dichteprüfung V 61-65		**Dichteprüfung VD 61-65**	
Gewicht vor Trocknung in [g]	250,00	Gewicht vor Trocknung in [g]	268,79
Volumen vor Trocknung in [cm^3]	125	Volumen vor Trocknung in [cm^3]	144,32
Nassdichte in [g/cm^3]	2,00	Nassdichte in [g/cm^3]	1,86
Gewicht nach Trocknung in [g]	209,30	Gewicht nach Trocknung in [g]	220,62
Volumen nach Trocknung in [cm^3]	113,46	Volumen nach Trocknung in [cm^3]	135,95
Trockendichte in [g/cm^3]	1,84	Trockendichte in [g/cm^3]	1,62
Gewichtsverlust in [%]	16,28	Gewichtsverlust in [%]	17,92
davon Wasser bis zu [%]	1,23	davon Wasser bis zu [%]	1,23
Differenz = trockene Reste in Schalung in [%]	15,05	Differenz = trockene Reste in Schalung in [%]	16,69
Differenz = Reste in Schalung in [g]	31,50	Differenz = Reste in Schalung in [g]	36,82

Druckeinstellungen VD 61-65	
Infill geradlinig	100%
Luftdruck für Materialförderung in [bar]	~5,6
Druckgeschwindigkeit in [mm/s]	20,00
Druckzeit	22min
durchschnittliche Extrusionsmenge in [g/s]	0,16

	V 61-65	VD 61-65
Abmessungen feucht in [mm]		
x-Richtung *	50,00	53,61
y-Richtung *	50,00	53,84
z-Richtung	50,00	50,00
Gewicht feucht in [g]	250,00	268,79
Volumen in [cm^3]	125,00	144,32
Abmessungen trocken in [mm]		
x-Richtung *	48,08	52,22
y-Richtung *	48,22	53,81
z-Richtung	48,95	48,39
Gewicht trocken in [g] (Innenraumklima)	209,30	220,62
Volumen in [cm^3]	113,46	135,95
Schwindmaße in [%]		
x-Richtung	3,85	2,60
y-Richtung	3,57	0,07
z-Richtung	2,10	3,22
Durchschnittswerte einzelner Prüfkörper	3,17	1,96
Gesamtschwindmaß des Volumens	9,23	5,80

* Die Abmessungen in x- und y-Richtung wurden immer auf selber Prüfkörperhöhe gemessen, um das Schwindmaß nicht durch unterschiedliche Querschnittsflächen zu verfälschen

P = Prüfkörper
V = Vollquerschnittsprüflörper
VD = Vollquerschnittssprüfkörper Druck

h. Skalierung der Prüfkörper

Mischungszusammensetzungen in [%]			
	Kantenlänge 5 cm	**Kantenlänge 10 cm**	
	ohne Bindemittel P1-P5	ohne Bindemittel P21	ohne Bindemittel P22
Claytec Lehmpulver 10.101	70,00	66,67	65,12
Quarzsand 0,1-0,3 mm	12,50	16,67	16,28
Trockenmasse	82,50	83,33	81,40
Wasser	17,50	16,67	18,60
Holzfasern	-	-	-
Bindemittel: Kasein	-	-	-
Alkali: Natriumcarbonat Na_2CO_3	-	-	-
Gesamte Masse ∑	100,00	100,00	100,00
Nassdichte in [g/cm^3]	1,63	1,48	1,53
Trockendichte in [g/cm^3]	1,42	1,34	1,39
Abweichungen der Trockendichte in [%]	-	5,63	2,11
Druckfestigkeiten in [N/mm^2]	2,02	1,35	1,10
Abweichungen der Druckfestigkeiten in [%]	-	33,17	45,54

i. Vergleich der Schwindmaße

Schwindmaße in [%]					Durchschnitt	
	ohne Bindemittel 40 % Infill	mit 0,4 % Holzfasern 40 % Infill	mit 1,23 % Holzfasern 40 % Infill	mit 1,5 % Kasein 40 % Infill	Abweichungen z zu x- und y-Richtung	Abweichungen Voll-QS zu 40 % Infill
x-Richtung	1,87	1,58	1,03	3,80		
y-Richtung	1,88	2,04	0,90	3,53		
z-Richtung	2,17	2,78	6,14	5,03		
Durchschnittswerte der Prüfkörper	1,97	3,96	1,77	4,11		
Abweichungen z zu x	13,63	43,05	83,23	24,44	41,09	
Abweichungen z zu y	13,31	26,51	85,32	29,69	38,71	
	ohne Bindemittel 100 % Infill	mit 0,4 % Holzfasern 100 % Infill	mit 1,23 % Holzfasern 100 % Infill	mit 1,5 % Kasein 100 % Infill		
x-Richtung	0,50	-	2,60	1,73		
y-Richtung	3,08	-	0,07	1,40		
z-Richtung	3,83	-	3,22	5,40		
Durchschnittswerte der Prüfkörper	2,47	-	1,96	6,61		
Abweichungen z zu x	86,91		19,19	67,96	58,02	
Abweichungen z zu y	19,64		97,98	74,06	63,89	
Abweichungen Voll-QS zu 40 % Infill	20,06	-	9,84	37,76		22,55
	ohne Bindemittel in Schalung	mit 0,4 % Holzfasern in Schalung	mit 1,23 % Holzfasern in Schalung	mit 1,5 % Kasein in Schalung		
x-Richtung	3,72	-	3,85	5,16		
y-Richtung	3,82	-	3,57	4,98		
z-Richtung	3,82	-	2,10	7,62		
Durchschnittswerte der Prüfkörper	3,79	-	3,17	5,92		
Abweichungen z zu x	2,62		-83,33	32,28	-16,14	
Abweichungen z zu y	0,00		-70,00	34,65	-11,78	
Abweichungen Voll-QS zu 40 % Infill	47,84	-	44,24	30,51		40,87
					28,96	31,71

j. Abmessungen der Prüfkörper

Abmessungen nach Vorbereitung der Oberflächen (nach schleifen oder ausgleichen einer weiteren Schicht)

* Da die Querschnittsfläche der Prüfkörper innerhalb der Schichten voneinander abweichen kann, wurden die Abmessungen anhand 2 gemessener Werte gemittelt

Abmessungen trocken in [mm]					
	P1	P2	P3	P4	P5
x-Richtung *	48,33	49,54	49,84	49,60	48,51
y-Richtung *	48,77	49,38	49,44	49,53	48,42
z-Richtung	48,13	49,01	48,22	48,44	48,33
	V1-5	VD 1-5 (1)	VD 1-5 (2)		
x-Richtung *	48,14	49,91	50,70		
y-Richtung *	48,09	49,74	50,96		
z-Richtung	48,09	48,63	48,02		
	P11				
x-Richtung *	37,01				
y-Richtung *	36,64				
z-Richtung	36,41				
	P21				
x-Richtung *	97,75				
y-Richtung *	95,91				
z-Richtung	98,52				
	P22				
x-Richtung *	96,94				
y-Richtung *	96,73				
z-Richtung	96,78				
	P31	P32	P33	P34	P35
x-Richtung *	47,18	47,56	49,14	48,83	50,50
y-Richtung *	47,43	47,86	49,56	49,08	50,40
z-Richtung	48,16	47,54	47,02	47,76	47,43
	V 31-35	VD 31-35 (1)	VD 31-35 (2)		
x-Richtung *	47,42	48,99	52,38		
y-Richtung *	47,51	48,98	53,08		
z-Richtung	46,19	48,14	46,47		
	P51	P52	P53	P54	P55
x-Richtung *	49,58	49,07	49,56	49,85	50,06
y-Richtung *	50,07	50,63	50,42	49,21	50,98
z-Richtung	47,72	48,10	48,04	48,27	48,06
	P61	P62	P63	P64	P65
x-Richtung *	49,68	50,92	50,17	50,02	51,20
y-Richtung *	50,14	50,31	50,42	49,78	50,70
z-Richtung	47,58	47,50	47,88	48,13	46,80
	V 61-65	VD 61-65			
x-Richtung *	48,08	52,22			
y-Richtung *	48,22	53,81			
z-Richtung	48,95	48,39			

k. Massekonstanz

Nach DIN 18945 für Lehmbausteine gilt:
"Die präparierten Probekörper sind bei 23 °C/50 % relative Luftfeuchte bis zur Massekonstanz zu konditionieren. Die Massekonstanz gilt als erreicht, wenn die Ergebnisse von zwei aufeinander folgenden Wägungen im Abstand von 24 h um höchstens 0,2 % der Masse bezogen auf den kleineren Messwert voneinander abweichen."

Anmerkung: Die rel. Luftfeuchte kann beim Wärmeschrank nicht automatisiert eingestellt werden, daher kommt es zu Abweichungen von bis zu +- 10%.

	1.Messung in [g]	2.Messung in [g]	Differenz in [%]
P1	165,89	165,93	0,02
P2	171,05	171,10	0,03
P3	171,82	171,88	0,03
P4	169,59	169,66	0,04
P5	156,38	156,45	0,04
V1-5	207,01	207,00	0,00
VD1-5 (1)	199,54	199,58	0,02
VD1-5 (2)	209,25	209,27	0,01
P11	69,92	69,94	0,03
P21	1226,30	1226,40	0,01
P22	1259,40	1259,60	0,02
P31	138,11	138,10	0,01
P32	145,89	145,87	0,01
P33	156,94	156,90	0,03
P34	158,18	158,14	0,03
P35	163,71	163,68	0,02
V31-35	164,75	164,24	0,31
VD31-35 (1)	172,28	172,19	0,05
VD31-35 (2)	206,40	206,29	0,05
P51	179,45	180,76	0,72
P52	180,78	179,48	0,72
P53	172,14	172,16	0,01
P54	168,44	168,46	0,01
P55	173,85	173,88	0,02
P61	169,25	169,31	0,04
P62	167,41	167,49	0,05
P63	162,42	161,89	0,33
P64	161,84	162,44	0,37
P65	172,05	172,10	0,03
V61-65	208,64	208,60	0,02
VD61-65 (1)	219,69	219,65	0,02
Test 1	195,32	195,33	0,01
Test 2	219,27	219,23	0,02

I. Auswertung der Druckversuche

Prüfung der Druckfestigkeiten

Weggesteuert in [mm/min]	0,6	
Temperatur bei Entnahme am 28.02.2023	23,3	°C
rel. Luftfeuchte bei Entnahme am 28.02.2023	52,7	%
Insgesamt 31 Prüfkörper plus 2 Testprüfkörper		

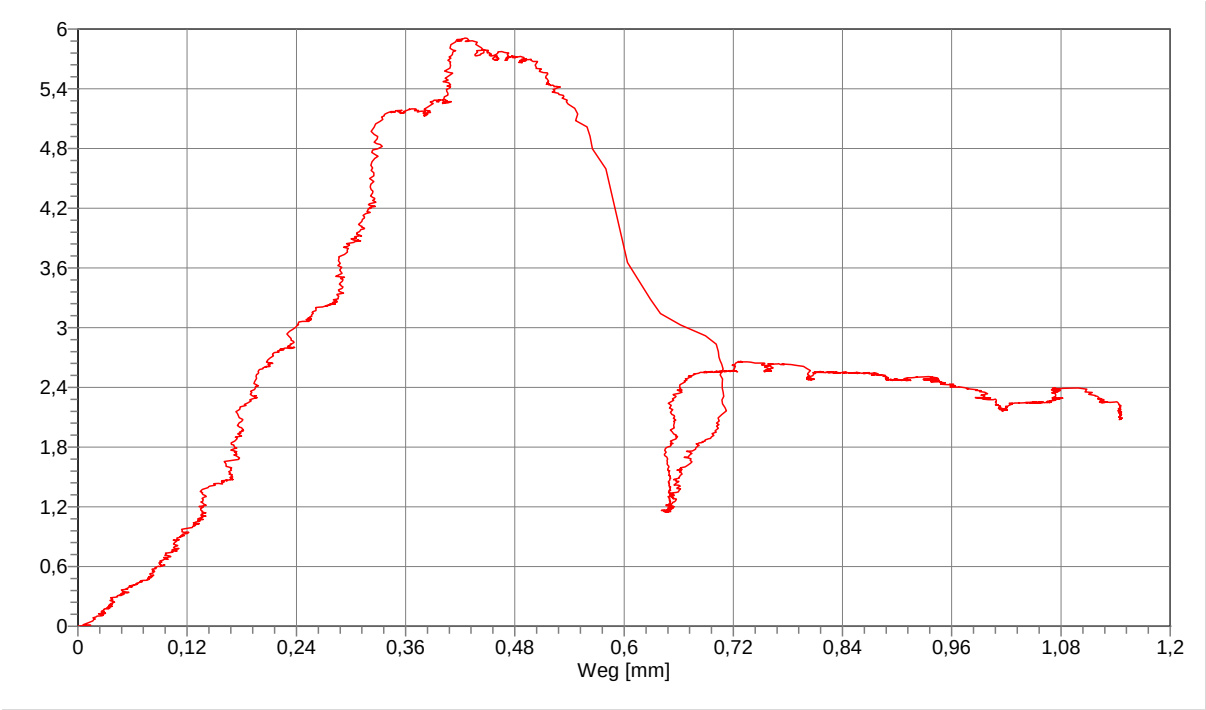
	P1	P2	P3	P4	P5	Durchschnittswerte
Querschnittsfläche gemittelt in [cm^2]	23,57	24,46	24,64	24,57	23,49	24,14
Höchstkraft F_{max} in [kN]	5,91	5,13	5,35	4,87	3,13	4,88
Druckfestigkeiten in [N/mm^2]	2,51	2,10	2,17	1,98	1,33	2,02
Abweichung in [mm] zur planebenen Oberfläche	ebenflächig	ebenflächig	ebenflächig	ebenflächig	1 Ecke leicht abfallend 0,1mm	
Bemerkungen	überwiegend Risse an Ecken			überwiegend Risse an Ecken, leichtes Abbröckeln		
	V1-5	VD1-5 (1)	VD1-5 (2)			Durchschn. VD
Querschnittsfläche gemittelt in [cm^2]	23,15	24,82	25,83			25,33
Höchstkraft F_{max} in [kN]	12,87	10,90	14,34			12,62
Druckfestigkeiten in [N/mm^2]	5,56	4,39	5,55			4,97
Abweichung in [mm] zur planebenen Oberfläche	1 Ecke leicht abfallend 0,1mm	Ecken leicht abfallend 0,1mm, einseitig	ebenflächig			
Bemerkungen	gabelförmige Risse an Seitenflächen, an OF Risse an Ecken, erster Riss ca. bei 10kN	vertiakle Risse an Ecken und diagonale Risse Seitenflächen	vertiakle Risse an Ecken und Seitenflächen erster Riss ca. bei 13,5kN			
	P11					
Querschnittsfläche gemittelt in [cm^2]	13,56					13,56
Höchstkraft F_{max} in [kN]	3,15					3,15
Druckfestigkeiten in [N/mm^2]	2,32					2,32
Abweichung in [mm] zur planebenen Oberfläche	0,1 mm Kuhle, einseitig					
Bemerkungen	diagonale, gabelförmige Risse, leichtes Abbröckeln					
	P21					
Querschnittsfläche gemittelt in [cm^2]	93,74					93,74
Höchstkraft F_{max} in [kN]	12,64					12,64
Druckfestigkeiten in [N/mm^2]	1,35					1,35
Abweichung in [mm] zur planebenen Oberfläche	Ecken leicht abfallend 0,1mm					
Bemerkungen	keine Abplatzungen, klaffende Risse an Seitenflächen u. Ecken, erster Riss ca. bei 5 kN					
	P22					
Querschnittsfläche gemittelt in [cm^2]	93,77					93,77
Höchstkraft F_{max} in [kN]	10,32					10,32
Druckfestigkeiten in [N/mm^2]	1,10					1,10
Abweichung in [mm] zur planebenen Oberfläche	0,1mm Kuhle, beidseitig					
Bemerkungen	keine Abplatzungen, klaffende diagonale Risse an Seitenflächen u. Oberfläche, senkrechte Risse an Ecken, erster Riss ca. bei 5 kN					

Querschnittsfläche gemittelt in [cm^2]	22,37	22,76	24,35	23,96	25,45	23,78
Höchstkraft F_{max} in [kN]	4,31	6,72	8,86	6,56	3,95	6,08
Druckfestigkeiten in [N/mm^2]	1,93	2,95	3,64	2,74	1,55	2,56
Abweichung in [mm] zur planebenen Oberfläche	ebenflächig	ebenflächig	ebenflächig	ebenflächig	Ecken leicht abfallend 0,1mm	
Bemerkungen	Risse vertikal an Ecken und Seitenflächen, meist durchgängig, kaum Abplatzungen					
	V31-35	VD31-35 (1)	VD31-35 (2)			Durchschn. VD
Querschnittsfläche gemittelt in [cm^2]	22,53	23,99	27,80			25,90
Höchstkraft F_{max} in [kN]	12,41	4,25	13,22			8,74
Druckfestigkeiten in [N/mm^2]	5,51	1,77	4,76			3,26
Abweichung in [mm] zur planebenen Oberfläche	ebenflächig; weiße, schimmelartige, netzartige Ansammlungen an den Oberflächen	Ecken leicht abfallend 0,1mm, einseitig	ebenflächig, Prüfkörper ausbeulend			
Bemerkungen	diagonale Risse	Prüfkörper in Einzelteile zerfallen, Einschnüren des Prüfkörpers erkennbar, erster Riss ca. bei 2kN	seitliche Abplatzungen des Prüfkörpers, Einschnürung erkennbar			
	P51	P52	P53	P54	P55	
Querschnittsfläche gemittelt in [cm^2]	24,82	24,84	24,99	24,53	25,52	24,94
Höchstkraft F_{max} in [kN]	6,55	7,42	5,69	4,94	7,10	6,34
Druckfestigkeiten in [N/mm^2]	2,64	2,99	2,28	2,02	2,78	2,54
Abweichung in [mm] zur planebenen Oberfläche	ebenflächig	ebenflächig	Ecken abfallend > 0,1mm	Ecken abfallend > 0,1mm	1 Ecke leicht abfallend 0,1mm	
Bemerkungen	Risse vertikal an Ecken, keine Abplatzungen (P53 erste Risse bei ca. 5,3kN, P54 erste Risse bei ca. 4,7kN)					
	P61	P62	P63	P64	P65	
Querschnittsfläche gemittelt in [cm^2]	24,90	25,62	25,29	24,90	25,96	25,33
Höchstkraft F_{max} in [kN]	5,29	5,81	4,88	5,14	4,83	5,19
Druckfestigkeiten in [N/mm^2]	2,12	2,27	1,93	2,06	1,86	2,05
Abweichung in [mm] zur planebenen Oberfläche	Ecken leicht abfallend 0,1mm, einseitig	Ecken leicht abfallend 0,1mm, beidseitig	1 Ecke abfallend >0,1mm	Ecken abfallend >0,1mm, einseitig	Ecken stark abfallend >0,1mm, einseitig	
Bemerkungen	Risse durch raue OF nur schwer erkennbar, Risse an Ecken und Seitenflächen					
	V61-65	VD61-65				VD
Querschnittsfläche gemittelt in [cm^2]	23,18	28,09				28,09
Höchstkraft F_{max} in [kN]	15,11	15,37				15,37
Druckfestigkeiten in [N/mm^2]	6,52	5,47				5,47
Abweichung in [mm] zur planebenen Oberfläche	Ecken leicht abfallend 0,1mm, einseitig, Kante leicht ausgebrochen	Ecken leicht abfallend 0,1mm, einseitig,				
Bemerkungen	etwas breitere, gabelförmige Risse	Risse durch raue OF nur schwer erkennbar, Risse an Ecken und Seitenflächen				
	Maximale Druckfestigkeit					
	Minimale Druckfestigkeit					
	Durchschnittliche Druckfestigkeit aller Prüfkörper					

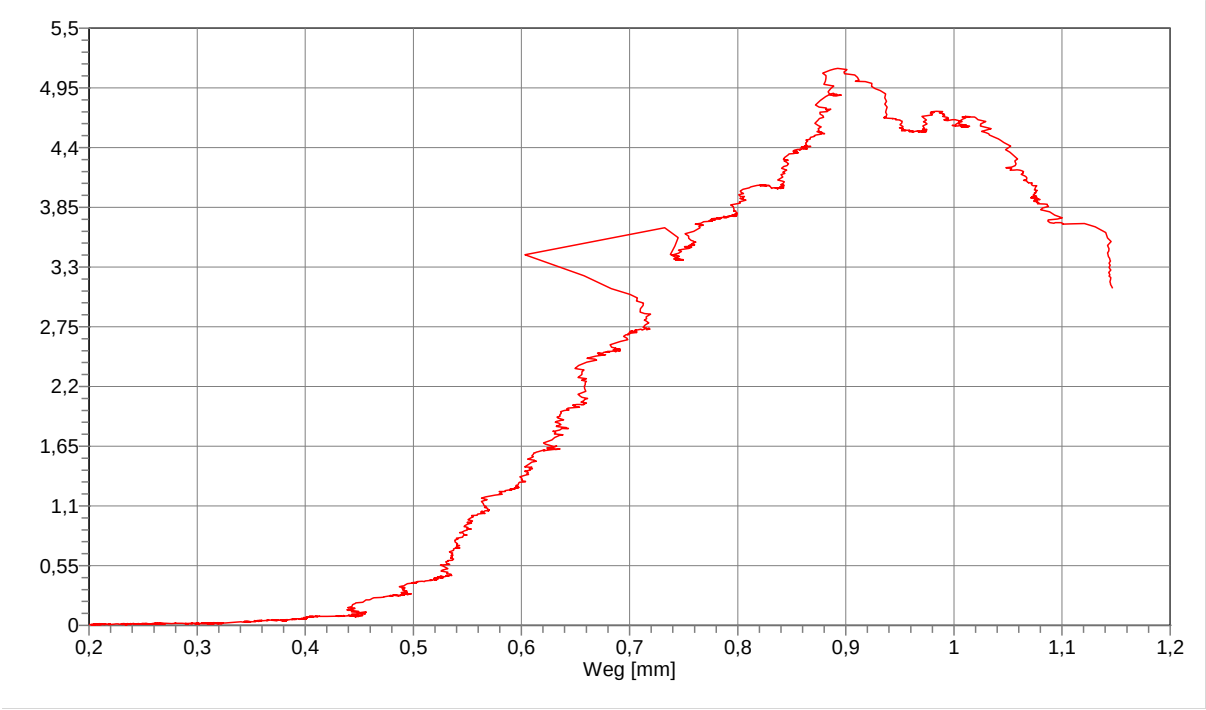
Insgesamt wurden 31 Prüfköper + 3 Testprüfkörper geprüft

m. Kraft-Weg-Diagramme

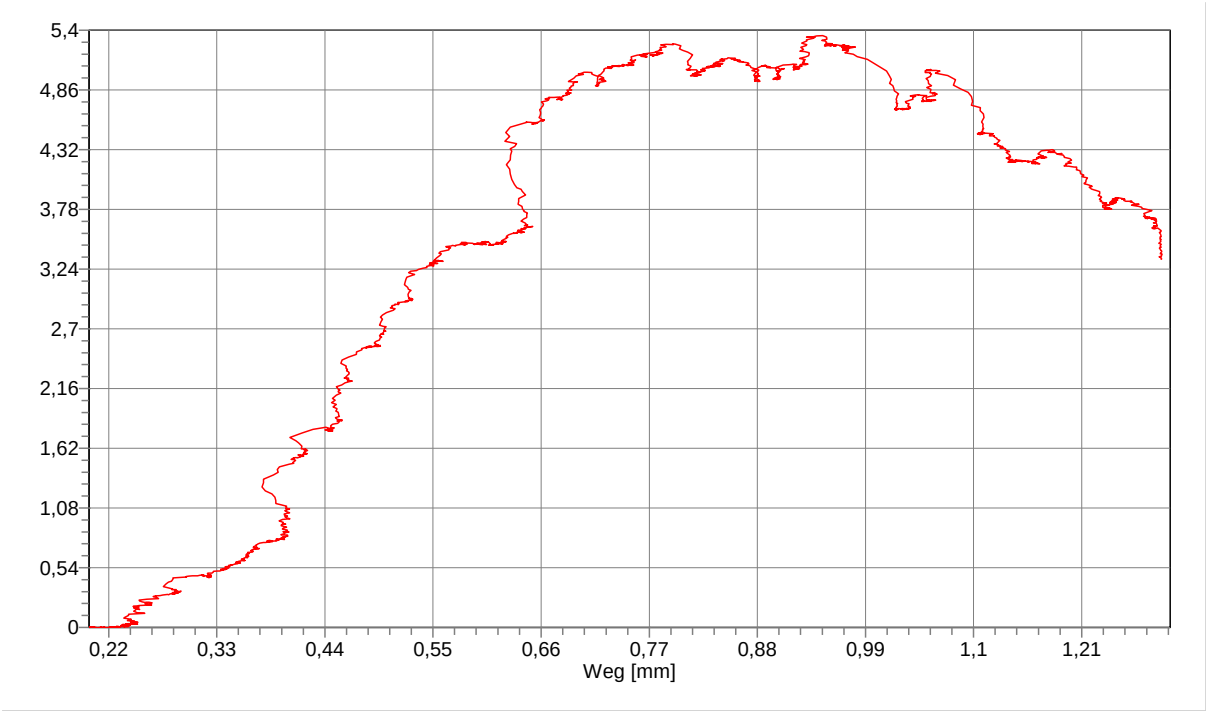
P1:



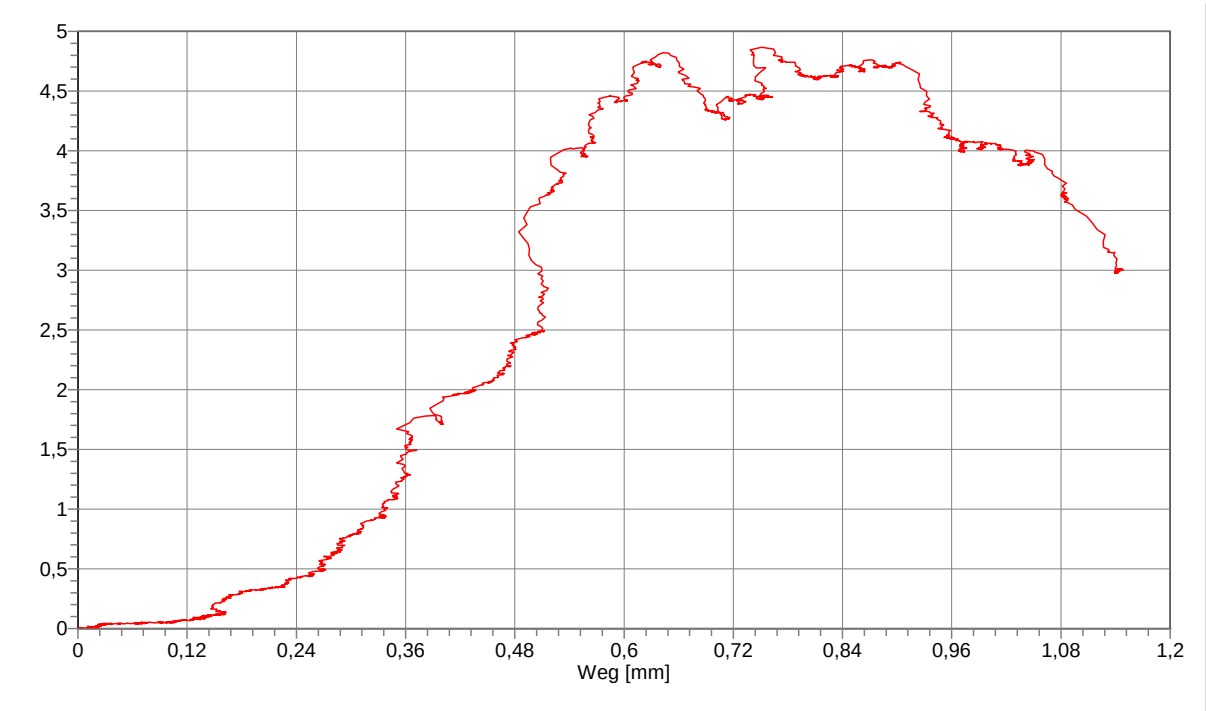
P2:



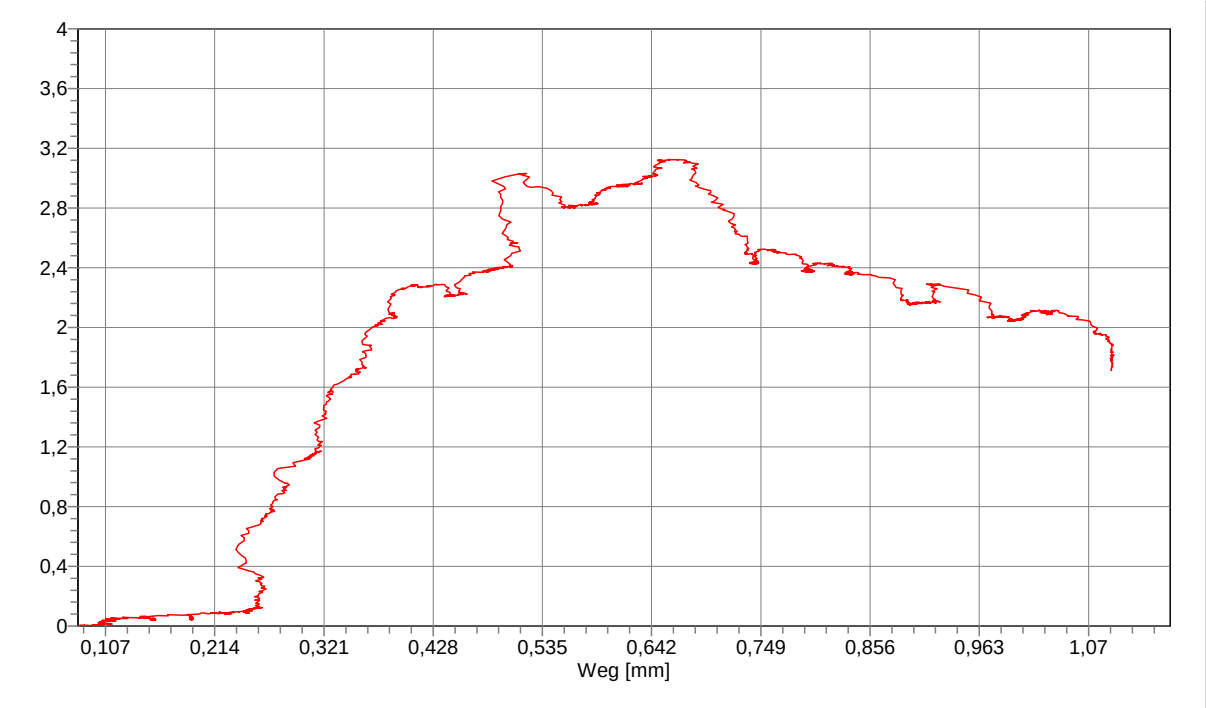
P3:


5,4
4,86
4,32
3,78
3,24
2,7
2,16
1,62
1,08
0,54
0
0,22
0,33
0,44
0,55
0,66
0,77
0,88
0,99
1,1
1,21
Weg [mm]

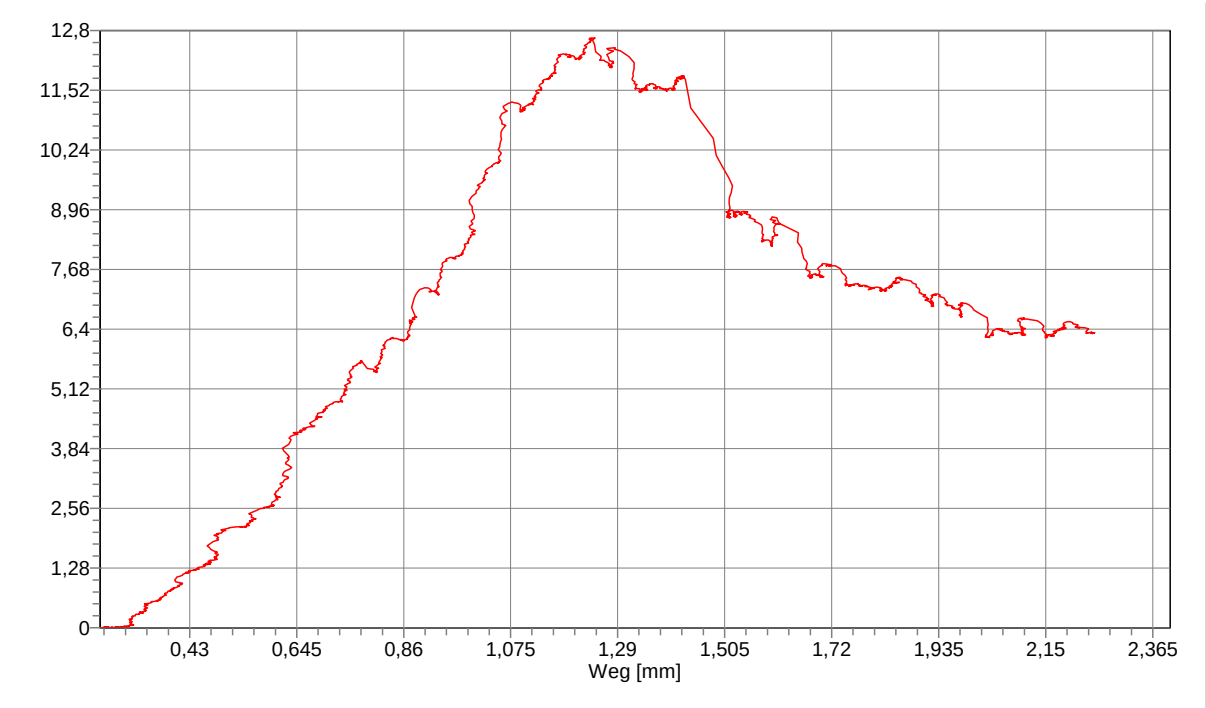
P4:


5
4,5
4
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
0
0,12
0,24
0,36
0,48
0,6
0,72
0,84
0,96
1,08
1,2
Weg [mm]

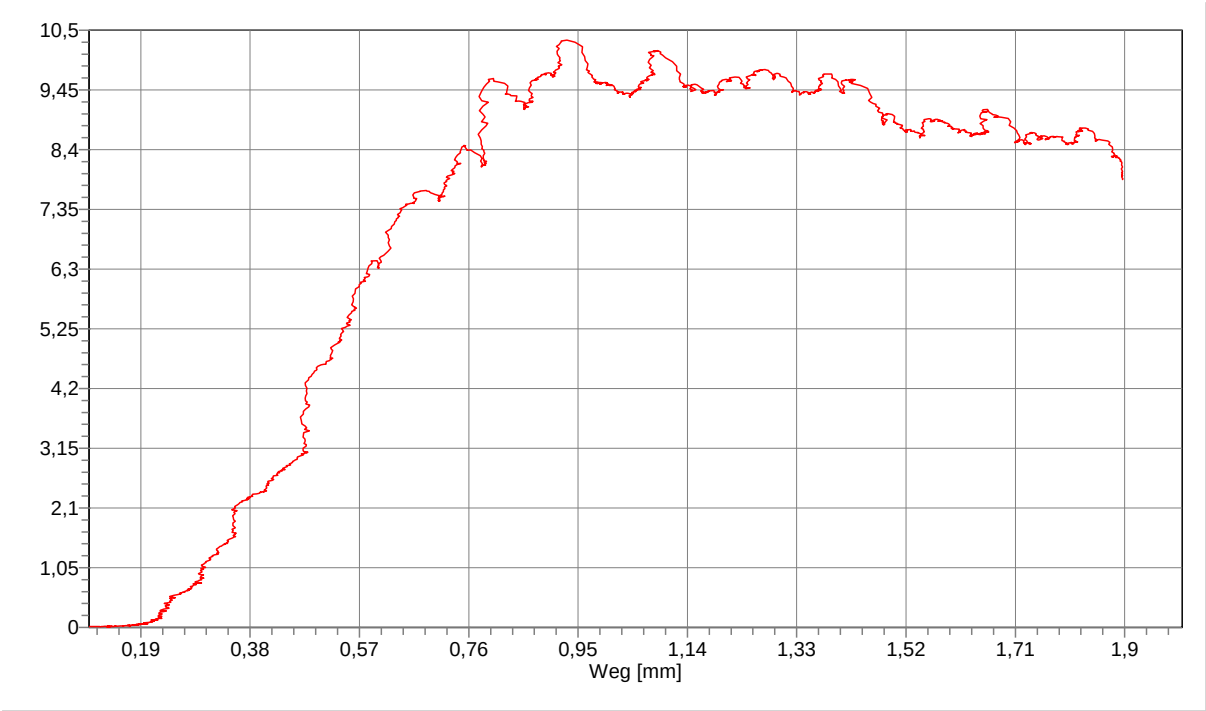
P5:


4
3,6
3,2
2,8
2,4
2
1,6
1,2
0,8
0,4
0
0,107
0,214
0,321
0,428
0,535
0,642
0,749
0,856
0,963
1,07
Weg [mm]

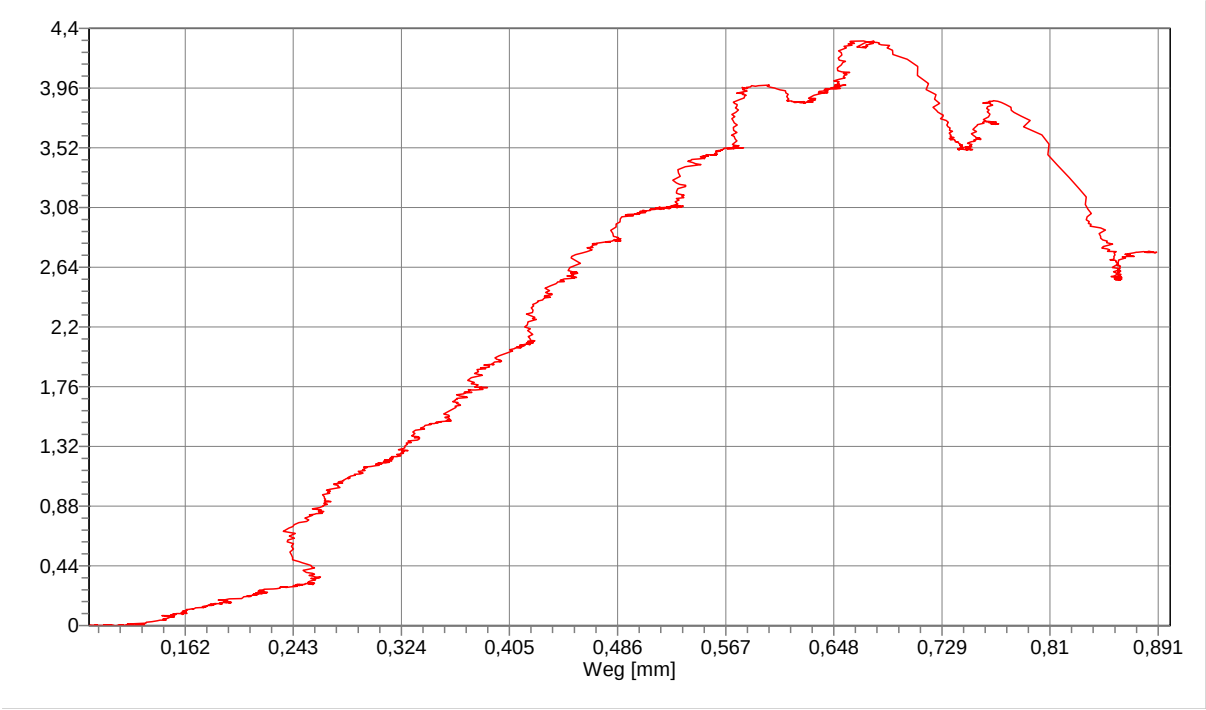
P21:


12,8
11,52
10,24
8,96
7,68
6,4
5,12
3,84
2,56
1,28
0
0,43
0,645
0,86
1,075
1,29
1,505
1,72
1,935
2,15
2,365
Weg [mm]

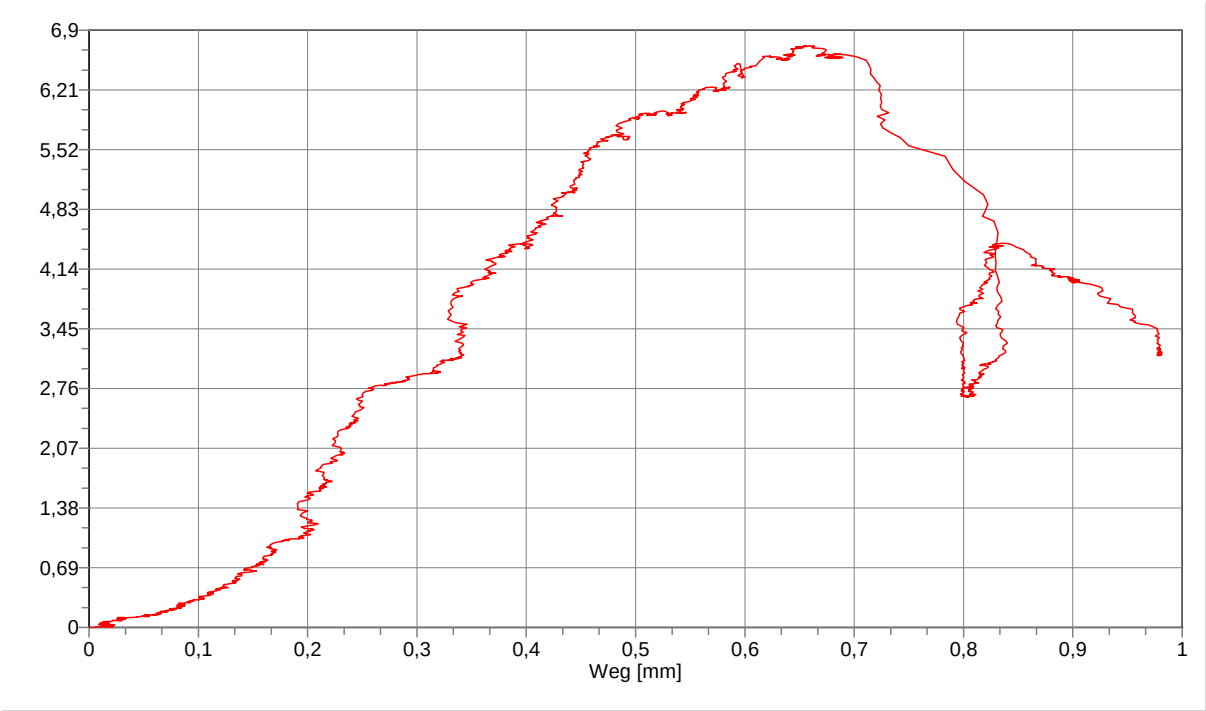
P22:


10,5
9,45
8,4
7,35
6,3
5,25
4,2
3,15
2,1
1,05
0
0,19
0,38
0,57
0,76
0,95
1,14
1,33
1,52
1,71
1,9
Weg [mm]

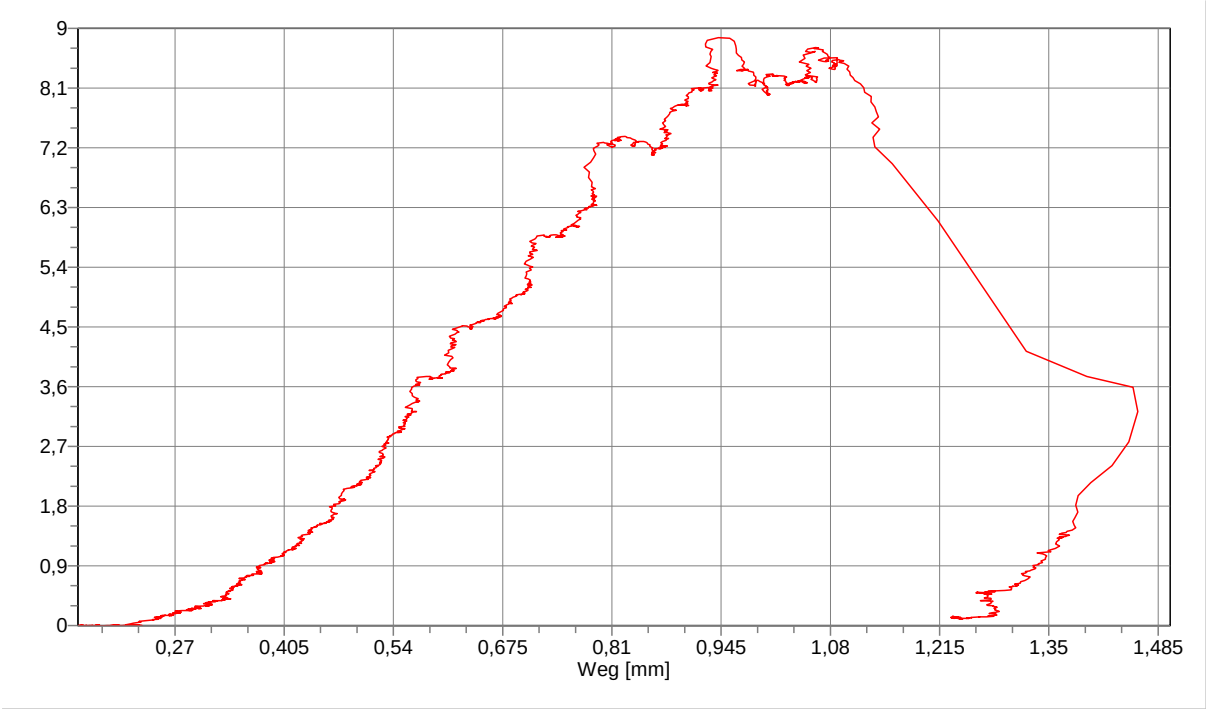
P31:


4,4
3,96
3,52
3,08
2,64
2,2
1,76
1,32
0,88
0,44
0
0,162
0,243
0,324
0,405
0,486
0,567
0,648
0,729
0,81
0,891
Weg [mm]

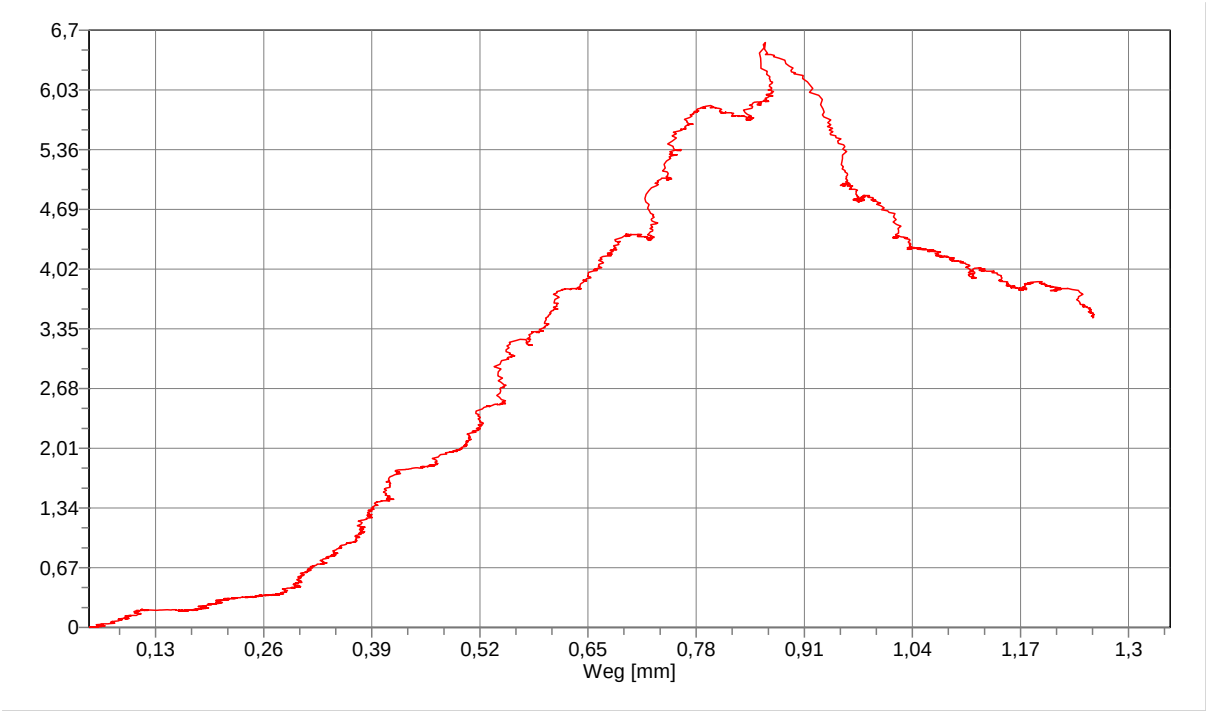
P32:


6,9
6,21
5,52
4,83
4,14
3,45
2,76
2,07
1,38
0,69
0
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1
Weg [mm]

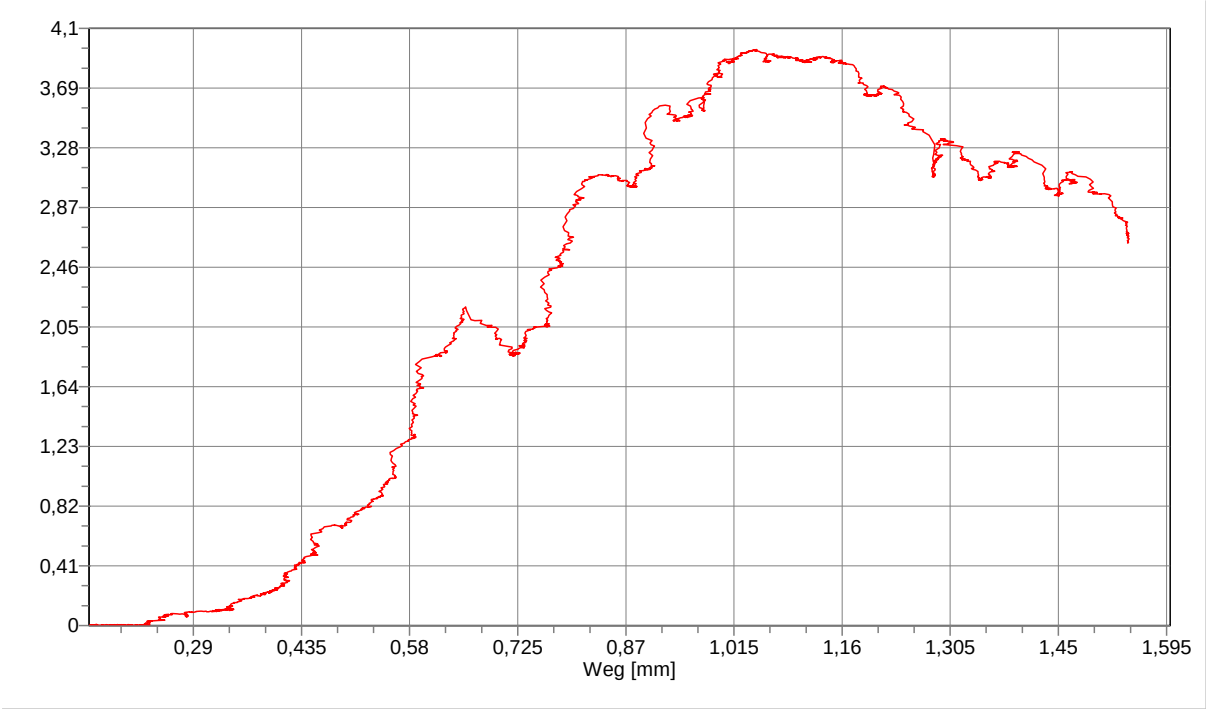
P33:


9
8,1
7,2
6,3
5,4
4,5
3,6
2,7
1,8
0,9
0
0,27
0,405
0,54
0,675
0,81
0,945
1,08
1,215
1,35
1,485
Weg [mm]

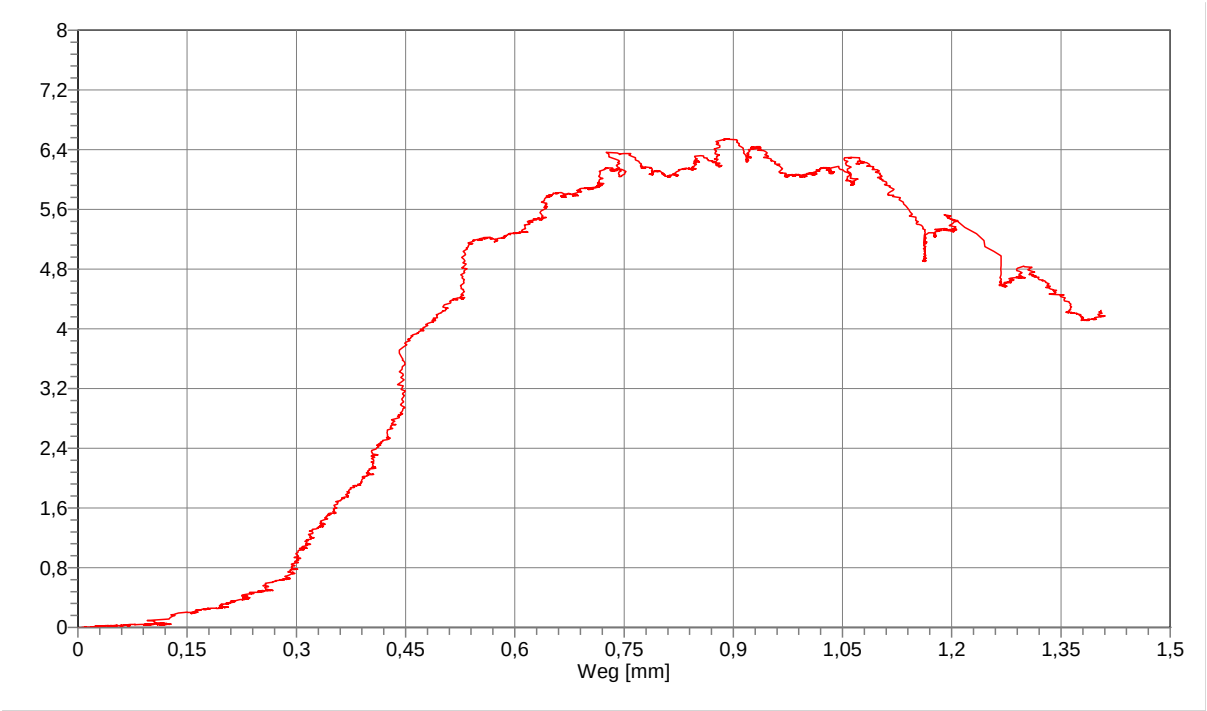
P34:


6,7
6,03
5,36
4,69
4,02
3,35
2,68
2,01
1,34
0,67
0
0,13
0,26
0,39
0,52
0,65
0,78
0,91
1,04
1,17
1,3
Weg [mm]

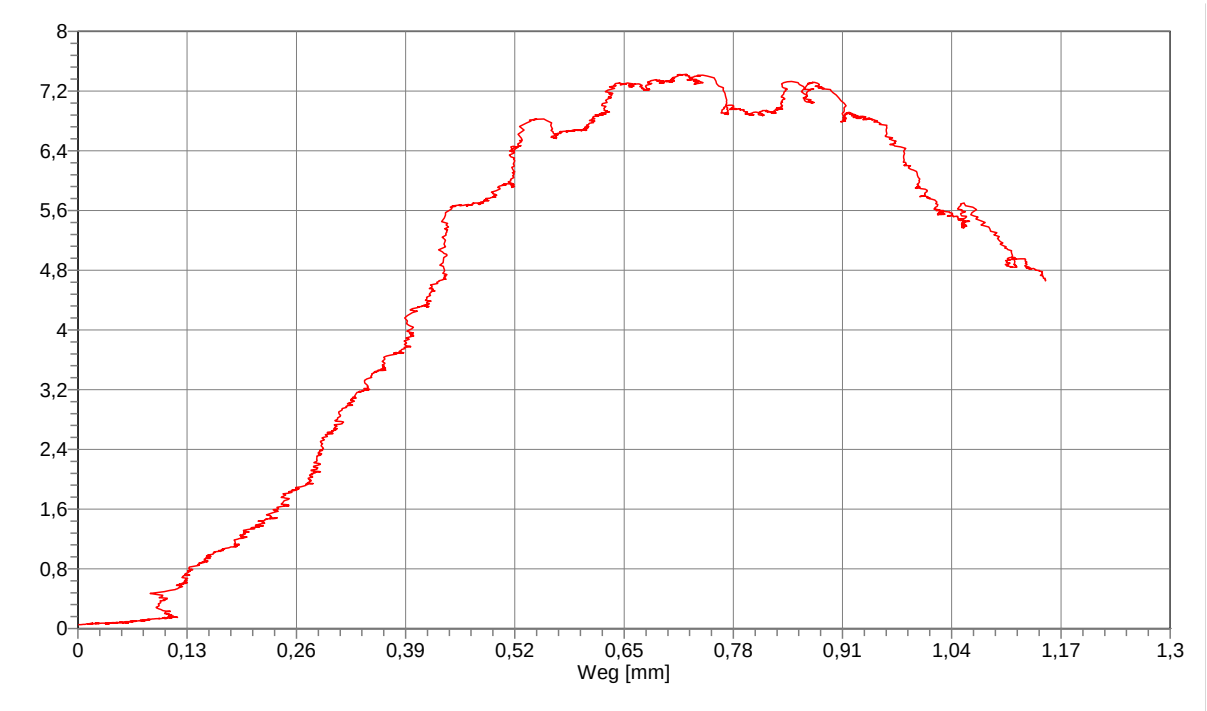
P35:


4,1
3,69
3,28
2,87
2,46
2,05
1,64
1,23
0,82
0,41
0
0,29
0,435
0,58
0,725
0,87
1,015
1,16
1,305
1,45
1,595
Weg [mm]

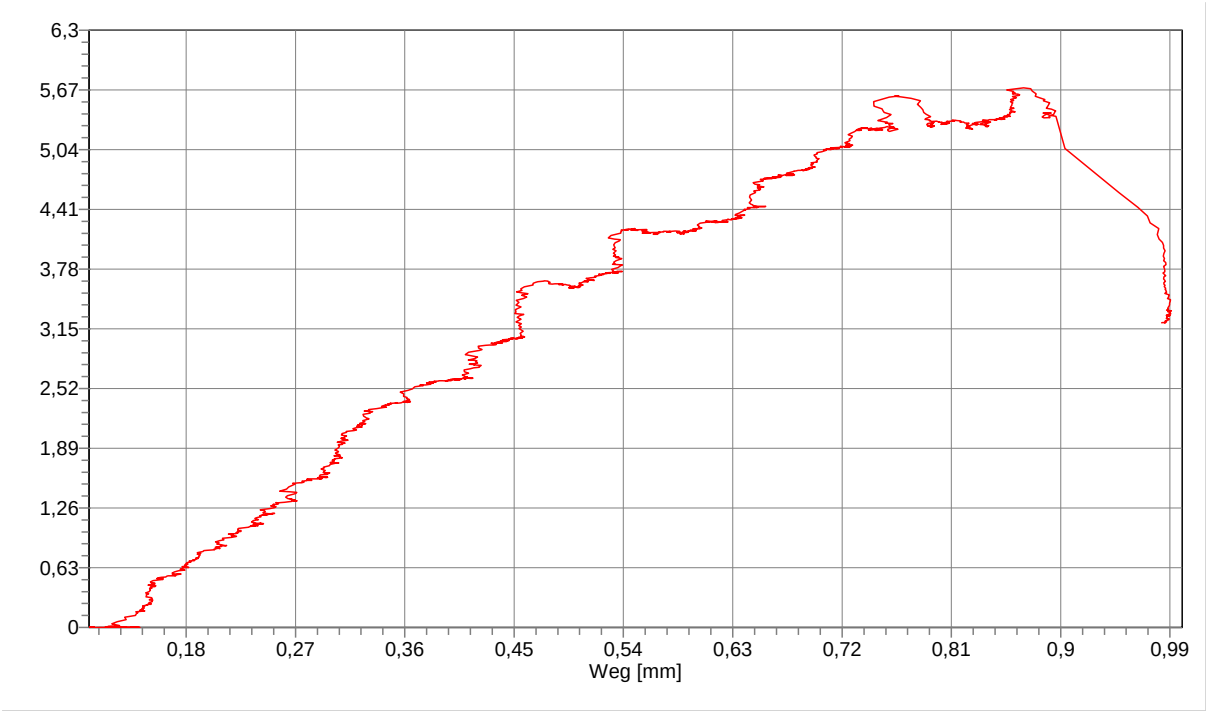
P51:


8
7,2
6,4
5,6
4,8
4
3,2
2,4
1,6
0,8
0
0
0,15
0,3
0,45
0,6
0,75
0,9
1,05
1,2
1,35
1,5
Weg [mm]

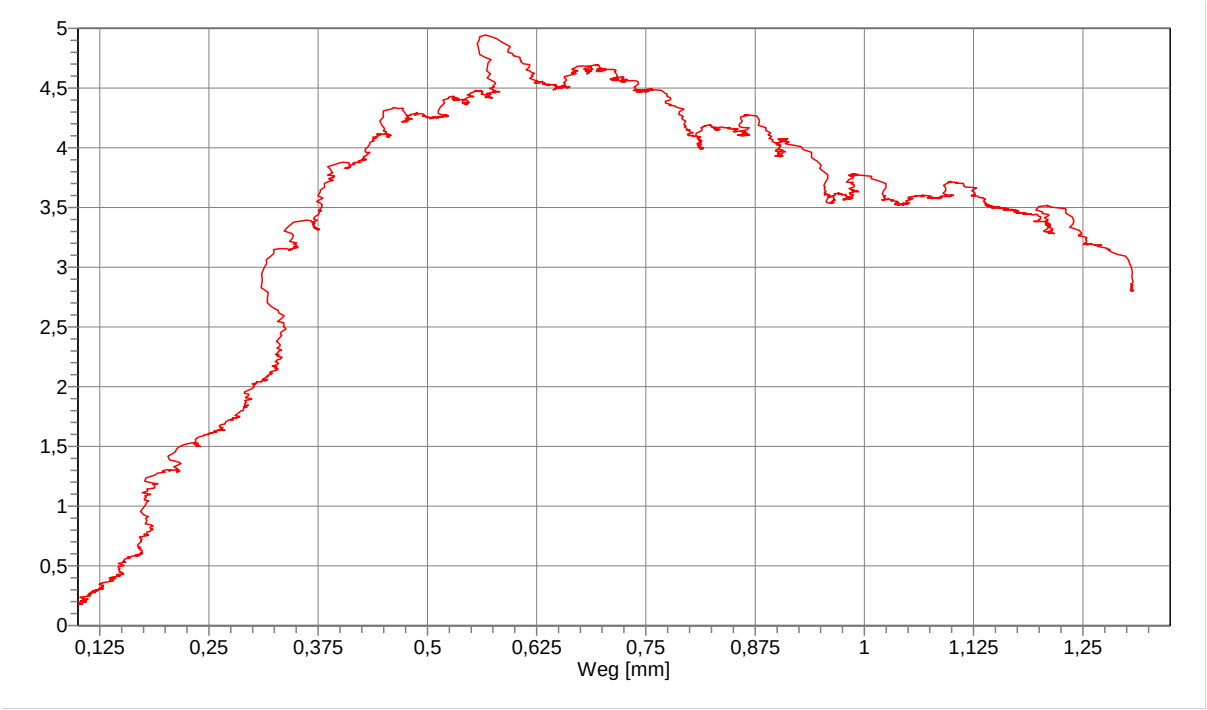
P52:


8
7,2
6,4
5,6
4,8
4
3,2
2,4
1,6
0,8
0
0
0,13
0,26
0,39
0,52
0,65
0,78
0,91
1,04
1,17
1,3
Weg [mm]

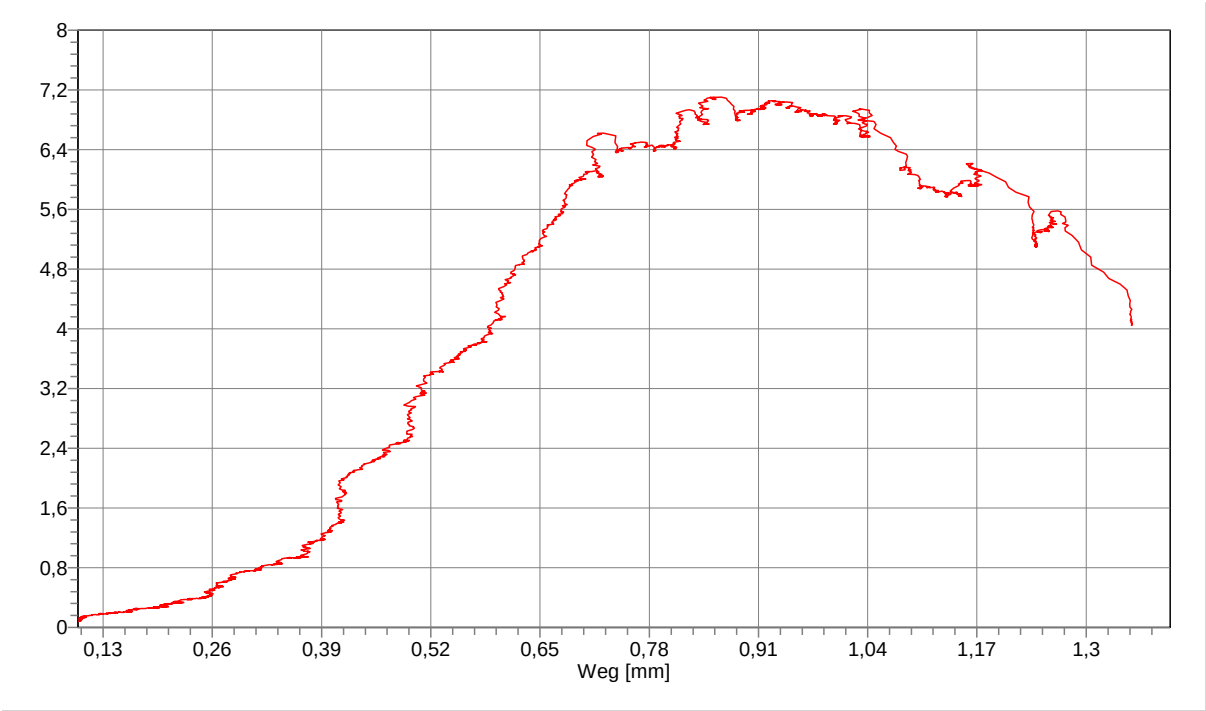
P53:


6,3
5,67
5,04
4,41
3,78
3,15
2,52
1,89
1,26
0,63
0
0,18
0,27
0,36
0,45
0,54
0,63
0,72
0,81
0,9
0,99
Weg [mm]

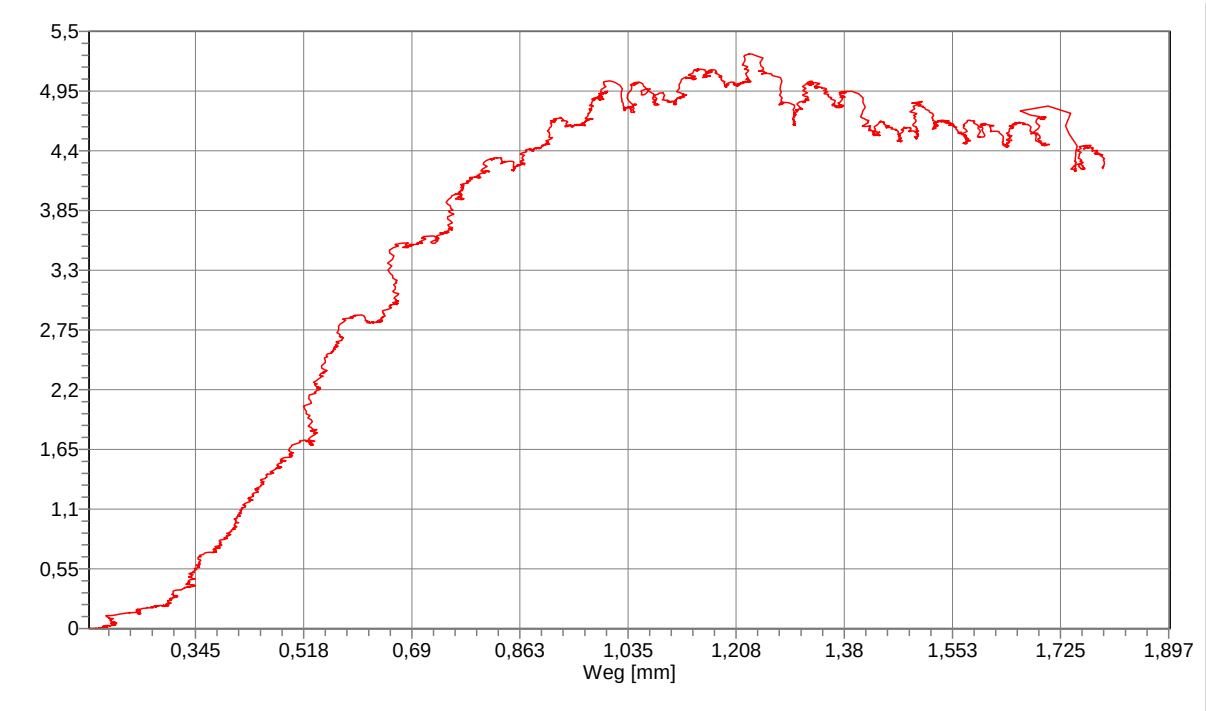
P54:


5
4,5
4
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
0,125
0,25
0,375
0,5
0,625
0,75
0,875
1
1,125
1,25
Weg [mm]

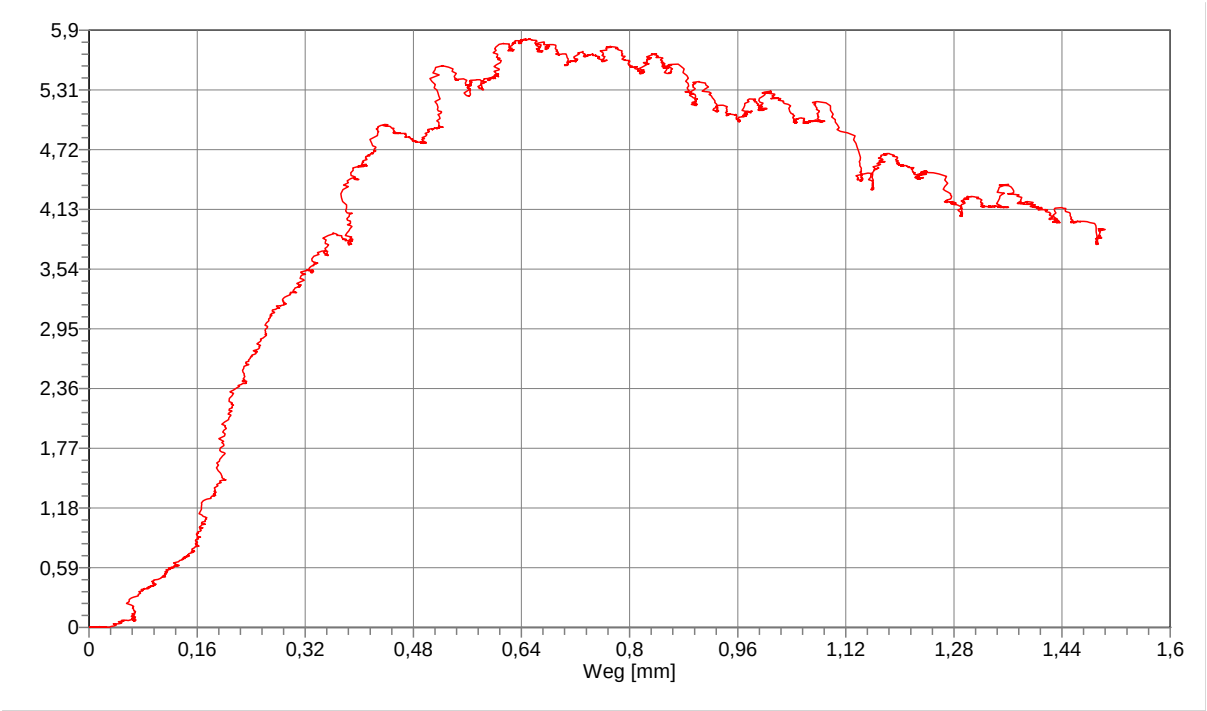
P55:


8
7,2
6,4
5,6
4,8
4
3,2
2,4
1,6
0,8
0
0,13
0,26
0,39
0,52
0,65
0,78
0,91
1,04
1,17
1,3
Weg [mm]

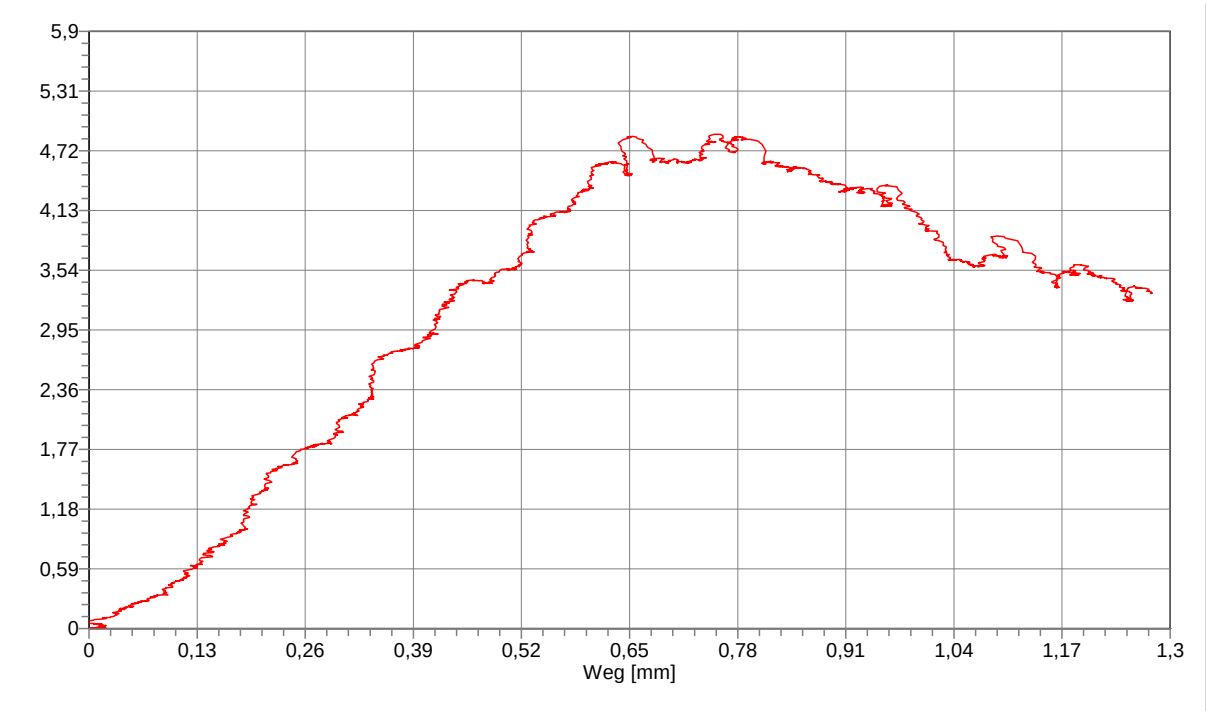
P61:


5,5
4,95
4,4
3,85
3,3
2,75
2,2
1,65
1,1
0,55
0
0,345
0,518
0,69
0,863
1,035
1,208
1,38
1,553
1,725
1,897
Weg [mm]

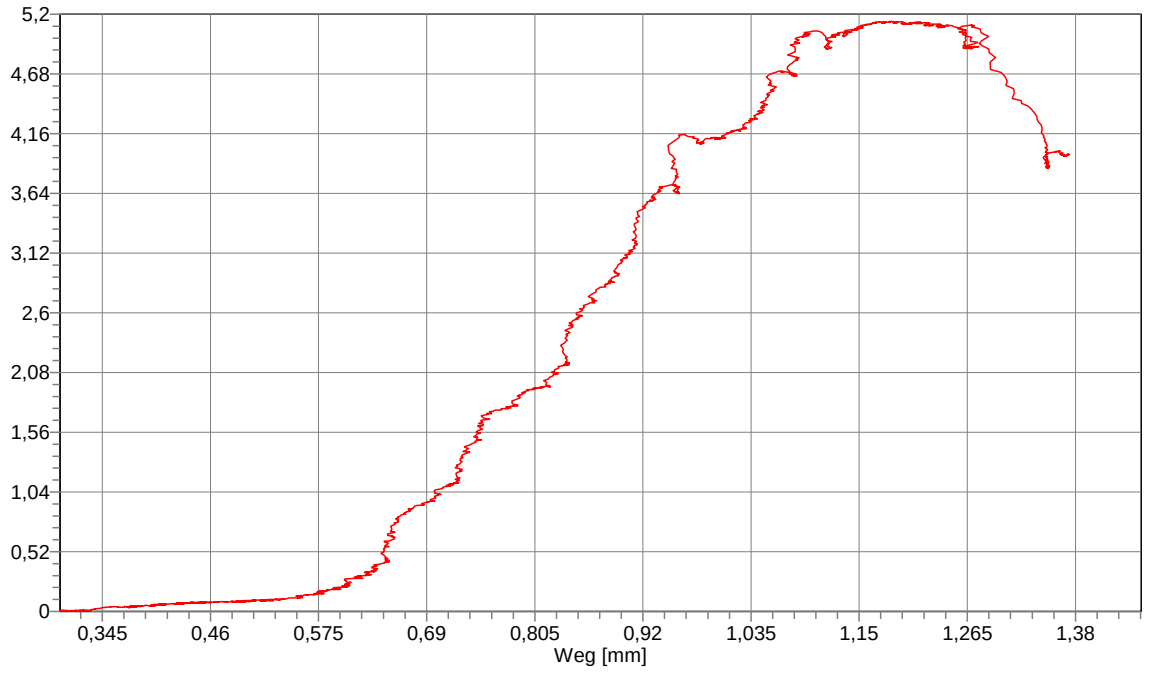
P62:


5,9
5,31
4,72
4,13
3,54
2,95
2,36
1,77
1,18
0,59
0
0
0,16
0,32
0,48
0,64
0,8
0,96
1,12
1,28
1,44
1,6
Weg [mm]

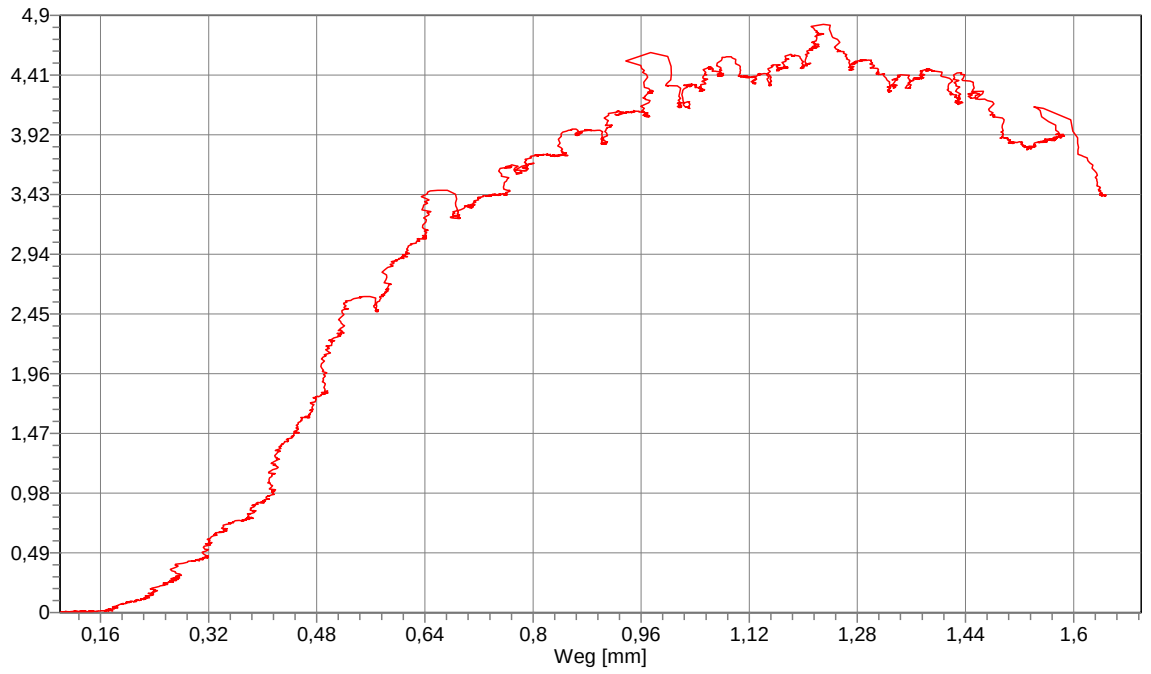
P63:


5,9
5,31
4,72
4,13
3,54
2,95
2,36
1,77
1,18
0,59
0
0
0,13
0,26
0,39
0,52
0,65
0,78
0,91
1,04
1,17
1,3
Weg [mm]

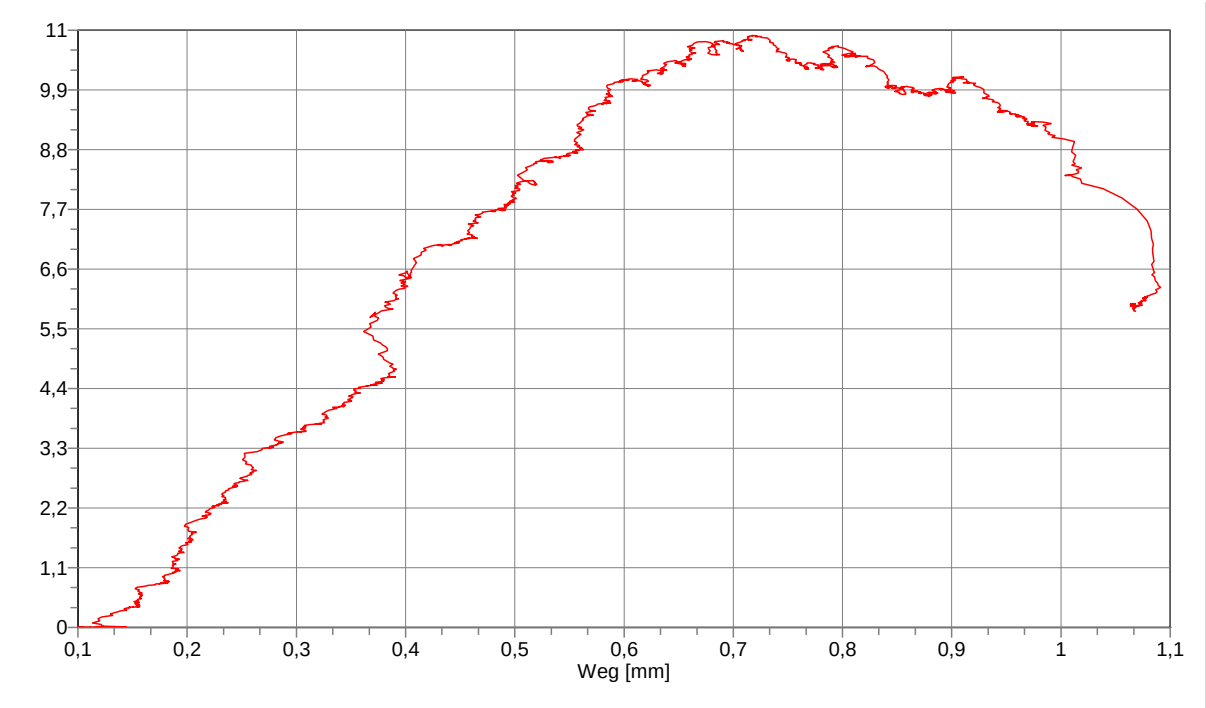
P64:


5,2
4,68
4,16
3,64
3,12
2,6
2,08
1,56
1,04
0,52
0
0,345
0,46
0,575
0,69
0,805
0,92
1,035
1,15
1,265
1,38
Weg [mm]

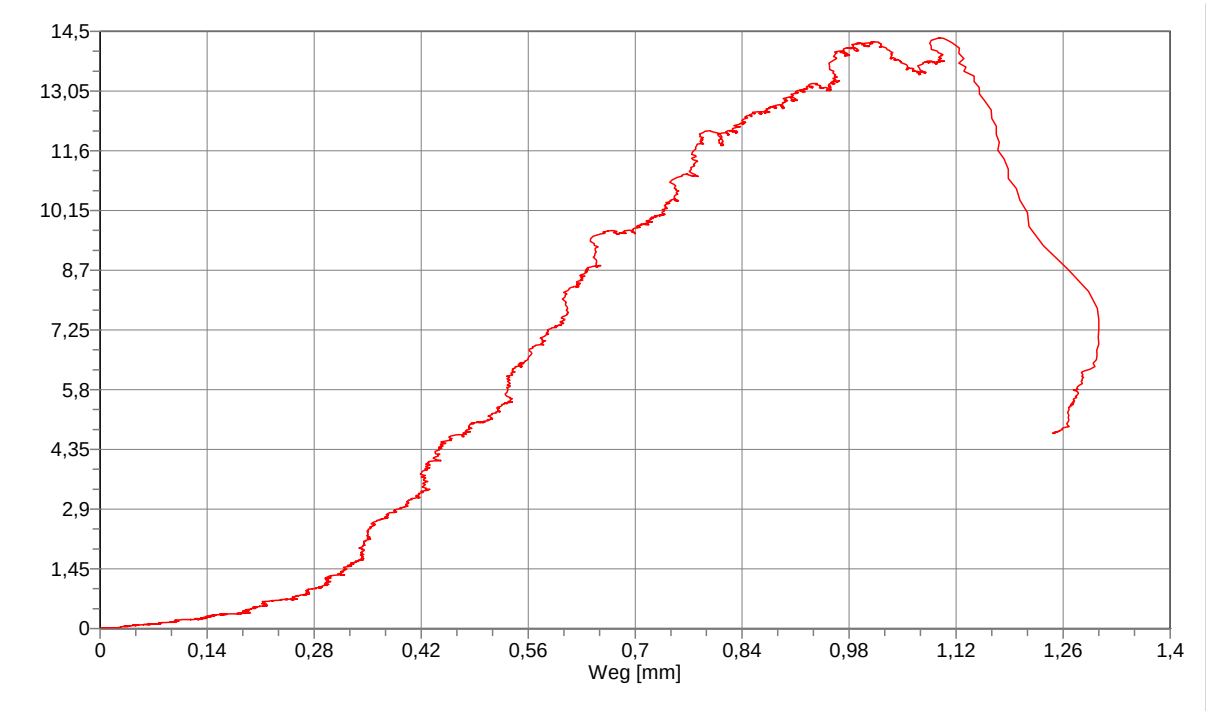
P65:


4,9
4,41
3,92
3,43
2,94
2,45
1,96
1,47
0,98
0,49
0
0,16
0,32
0,48
0,64
0,8
0,96
1,12
1,28
1,44
1,6
Weg [mm]

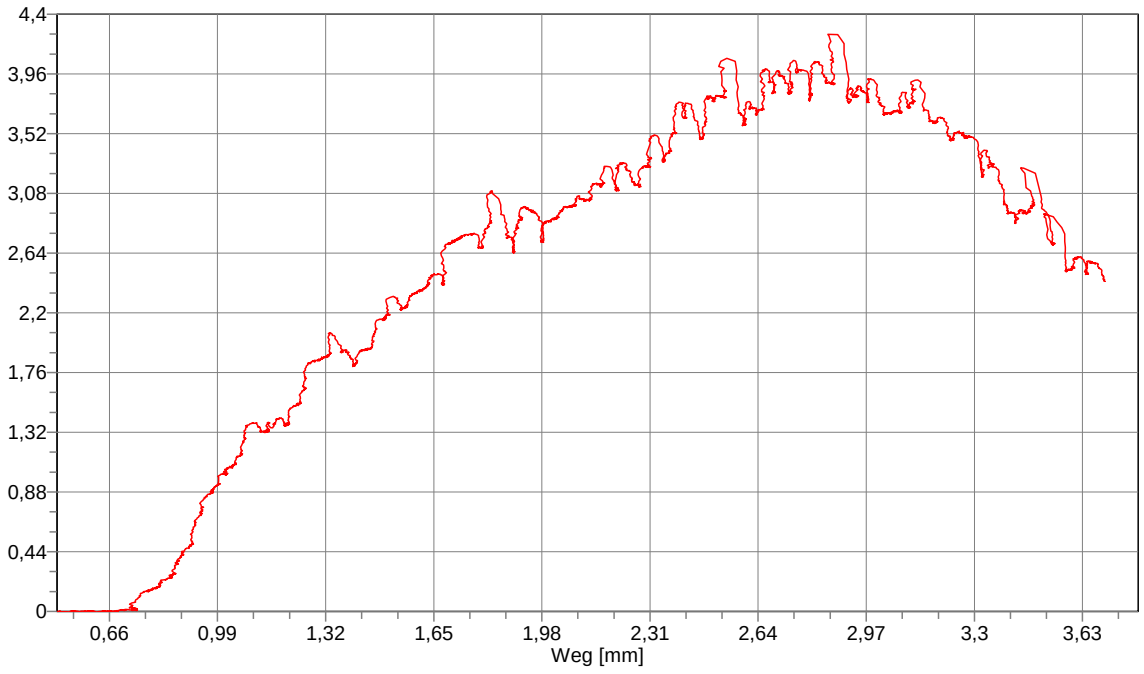
VD 1-5 (1):


11
9,9
8,8
7,7
6,6
5,5
4,4
3,3
2,2
1,1
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1
1,1
Weg [mm]

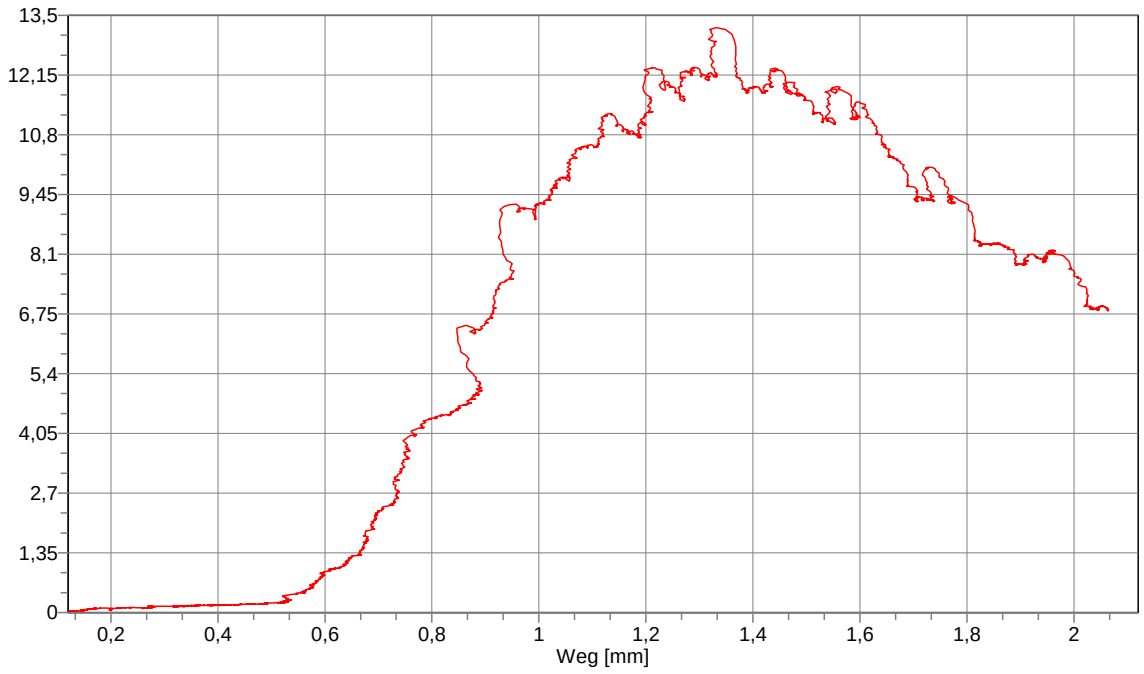
VD 1-5 (2):


14,5
13,05
11,6
10,15
8,7
7,25
5,8
4,35
2,9
1,45
0
0
0,14
0,28
0,42
0,56
0,7
0,84
0,98
1,12
1,26
1,4
Weg [mm]

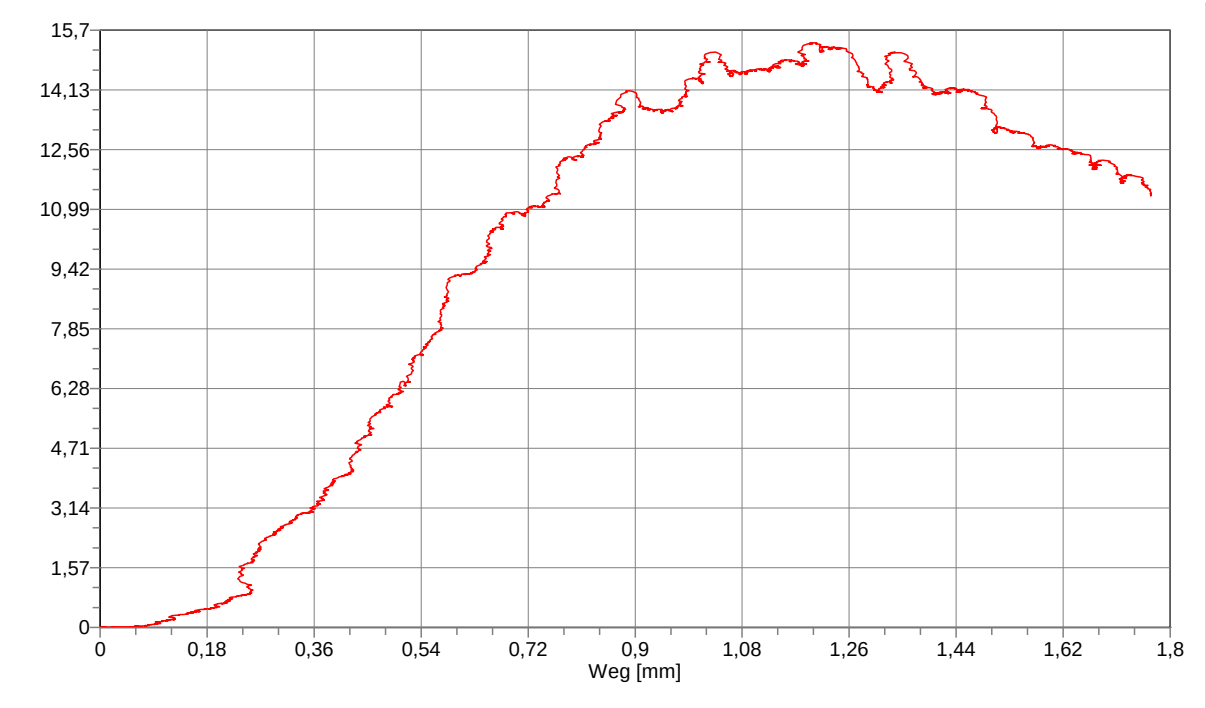
VD 31-35 (1):



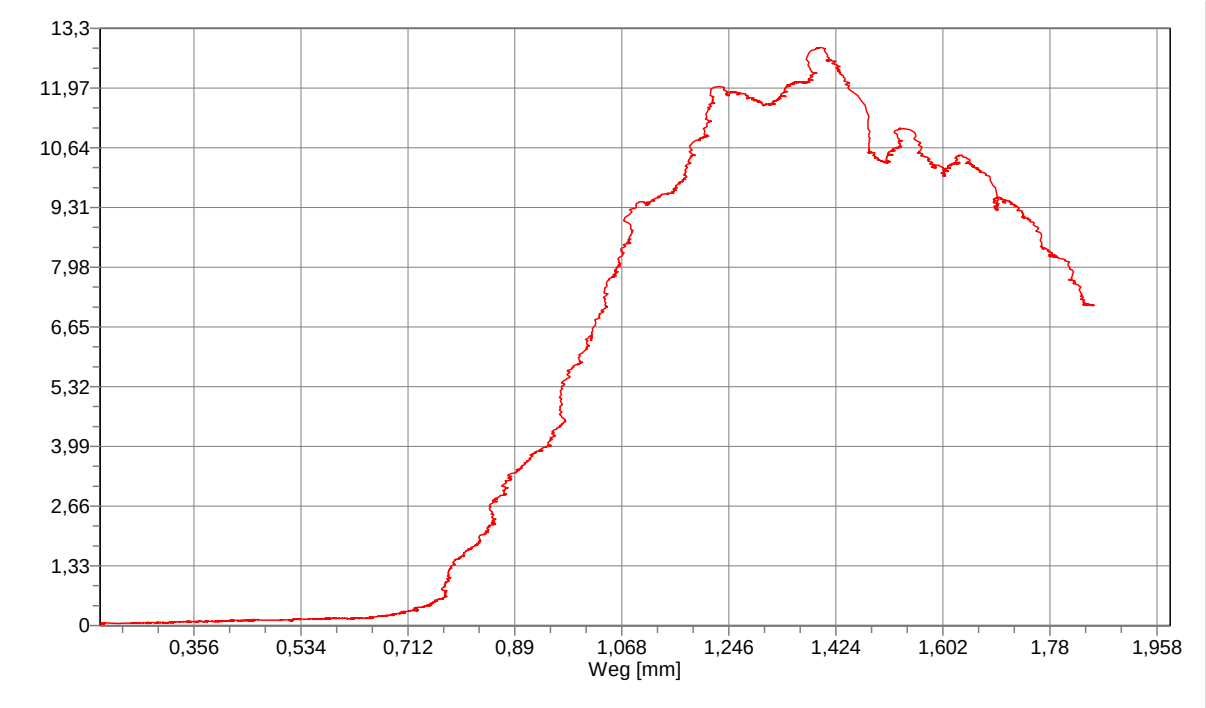
VD 31-35 (2):



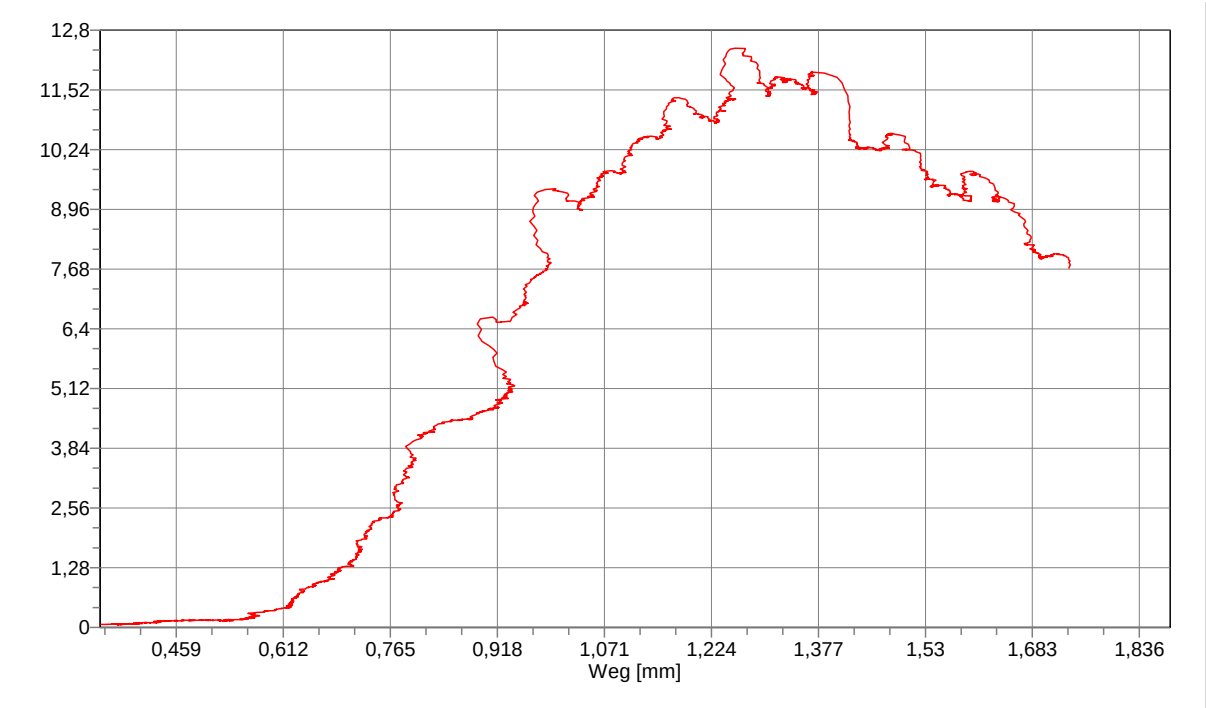
VD 61-65 (1):


15,7
14,13
12,56
10,99
9,42
7,85
6,28
4,71
3,14
1,57
0
0
0,18
0,36
0,54
0,72
0,9
1,08
1,26
1,44
1,62
1,8
Weg [mm]

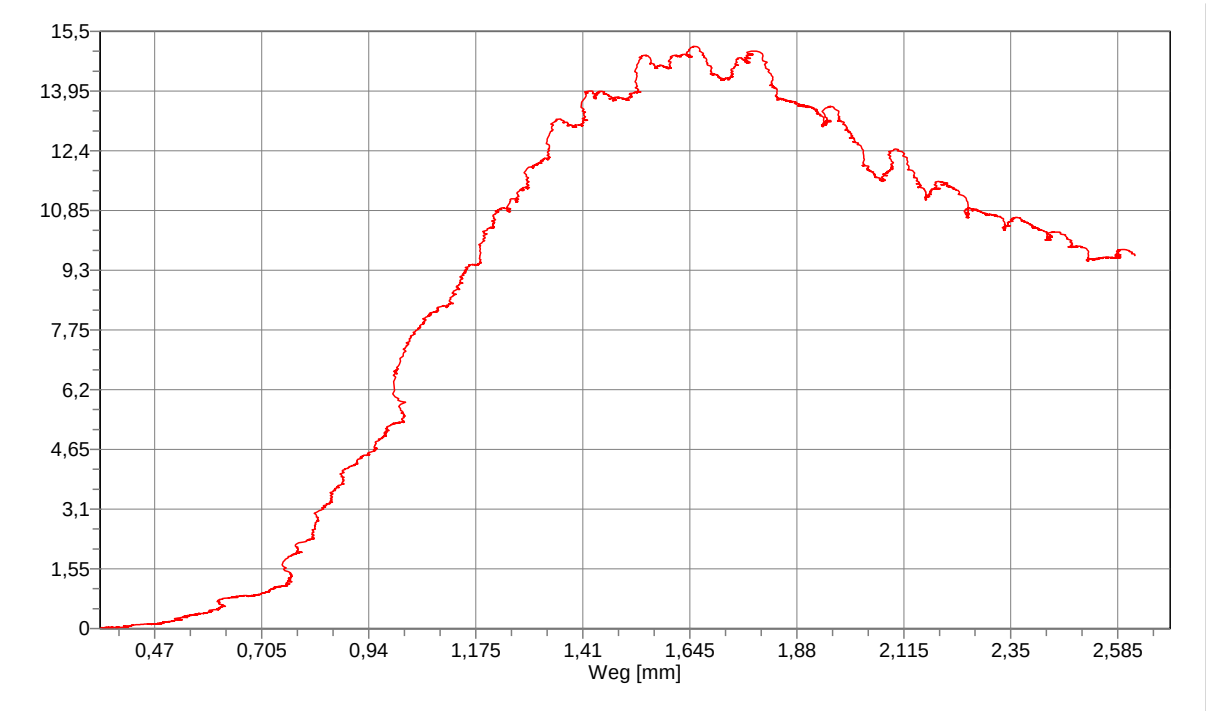
V 1-5:


13,3
11,97
10,64
9,31
7,98
6,65
5,32
3,99
2,66
1,33
0
0,356
0,534
0,712
0,89
1,068
1,246
1,424
1,602
1,78
1,958
Weg [mm]

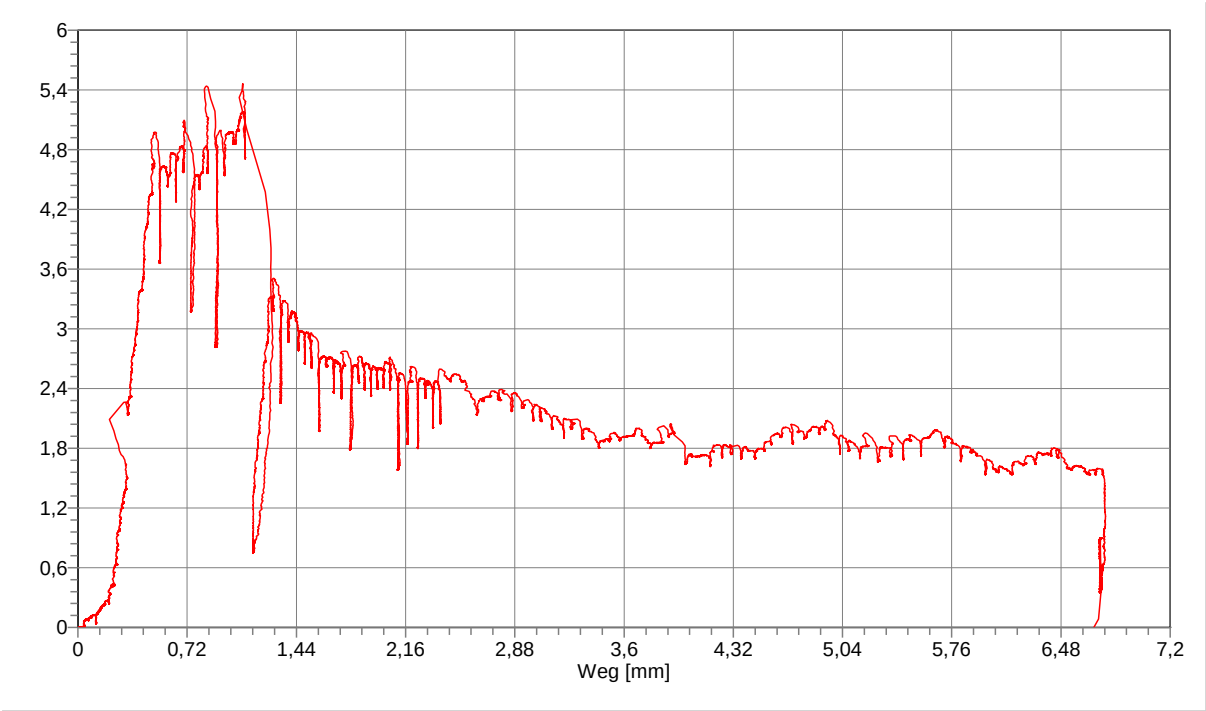
V 31-35:


12,8
11,52
10,24
8,96
7,68
6,4
5,12
3,84
2,56
1,28
0
0,459
0,612
0,765
0,918
1,071
1,224
1,377
1,53
1,683
1,836
Weg [mm]

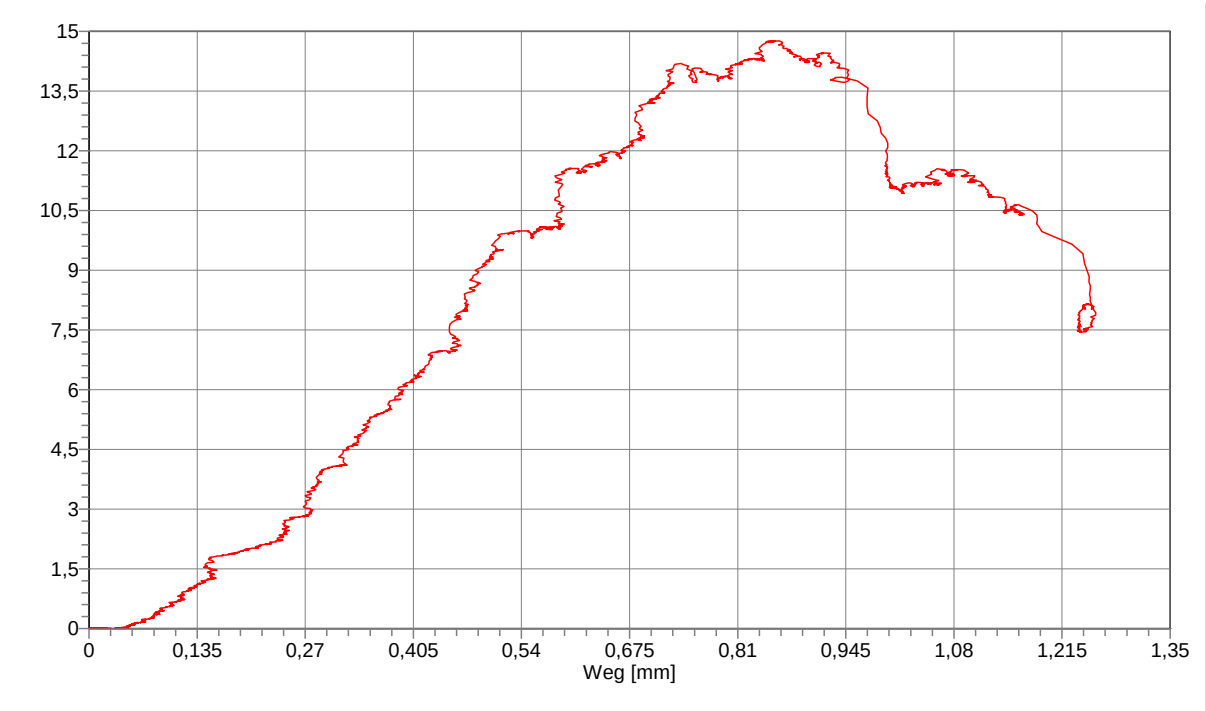
V61-65:


15,5
13,95
12,4
10,85
9,3
7,75
6,2
4,65
3,1
1,55
0
0,47
0,705
0,94
1,175
1,41
1,645
1,88
2,115
2,35
2,585
Weg [mm]

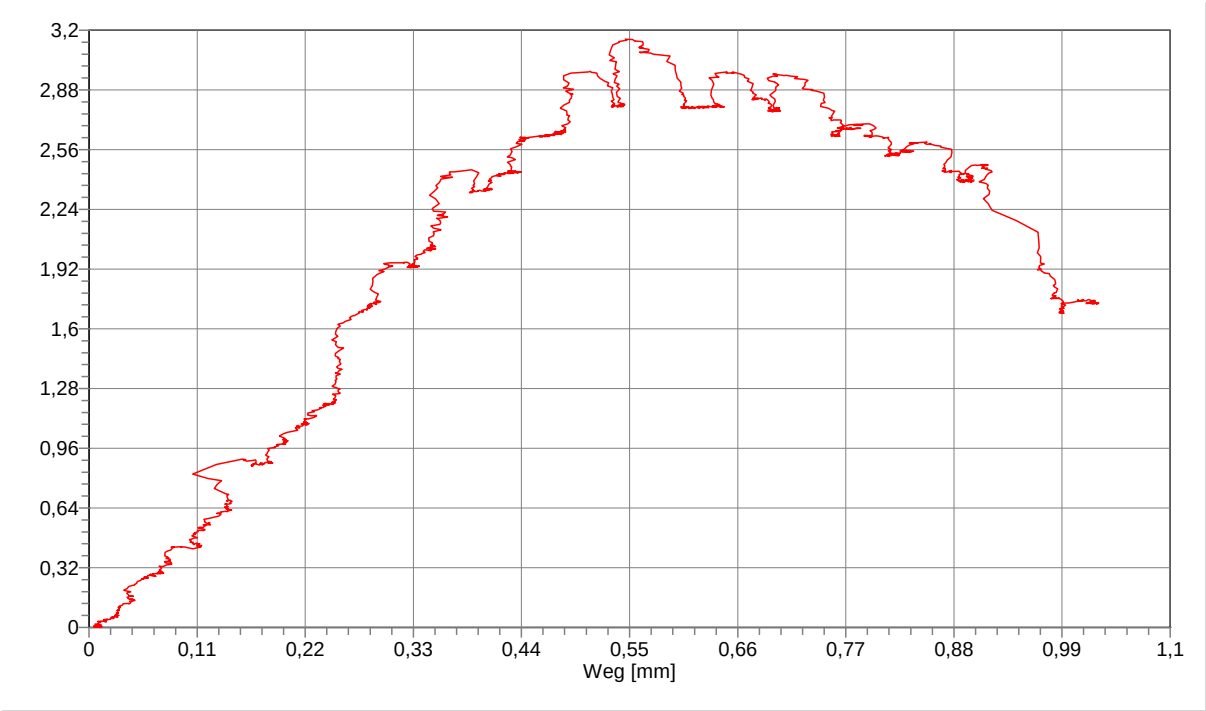
Test 1(ohne Additive, 40 % Infill):



Test 2 (mit 2% Kasein, Vollquerschnitt in Schalung):



P11 (Lehmputz):



Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich eidesstattlich, dass ich die vorliegende Arbeit zum Thema

Weiterentwicklung zirkulärer und automatisierter Bauweisen des modernen Lehmbaus

Beispielhafte Untersuchungen der Stampflehmherstellung und des 3D-Drucks mit Lehm

selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt habe, insbesondere, dass ich alle Stellen, die wörtlich oder annähernd wörtlich oder dem Gedanken nach aus Veröffentlichungen, unveröffentlichten Unterlagen und Gesprächen entnommen worden sind, als solche an den entsprechenden Stellen innerhalb der Arbeit durch Zitate kenntlich gemacht habe, wobei in den Zitaten jeweils der Umfang der entnommenen Originalzitate kenntlich gemacht wurde. Die Arbeit lag in gleicher oder ähnlicher Fassung noch keiner Prüfungsbehörde vor und wurde bisher nicht veröffentlicht. Ich bin mir bewusst, dass eine falsche Ver-sicherung rechtliche Folgen haben wird.

[redacted], den 30. April 2023

[redacted]

Selina Huber