

Diplomarbeit

Einfluss der mechanischen Aktivierung auf die Festigkeit von Lehmbaustoffen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads
Diplom-Ingenieur / Diplom-Ingenieurin
eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

Diploma Thesis

Influence of mechanical activation on the strength values of clay building materials

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur / Diplom-Ingenieurin
of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

von

Melanie Kadlec

Matr.Nr.: 01025421

unter der Anleitung von

Betreuung: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. **Azra Korjenic**
Dipl.-Ing. **Erich Streit**, BSc

Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie
Forschungsbereich Ökologische Bautechnologien
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/E207-03, 1040 Wien, Österreich

Wien, im Mai 2023

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich bei der Erstellung meiner Diplomarbeit unterstützt und mich während meiner Studienzeit begleitet haben.

Ein besonderer Dank gilt Frau Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Azra Korjenic, die in ihrem Forschungsbereich Ökologische Bautechnologien spannende, richtungsweisende und wichtige Forschung betreibt und es mir so ermöglicht hat diese Diplomarbeit zu verfassen.

Weiters möchte ich mich bei Univ. Ass. Dipl.-Ing, Erich Streit, für die Betreuung und Unterstützung während der Erstellung der Diplomarbeit, und bei Michael Mitterböck für das Heranführen an die Thematik und die tatkräftige Hilfe im Labor bedanken.

Der größte Dank gilt meiner Familie, die während meiner gesamten Studienzeit immer hinter mir gestanden hat. Insbesondere meine Mutter Regina hat mich jederzeit mit allen ihr zur Verfügung stehenden Mitteln unterstützt.

Ganz besonders möchte ich mich bei meinem Partner Christian bedanken, der mich in den letzten Phasen des Studiums stets unterstützt hat. Überdies hat er nicht nur das Lektorat dieser Diplomarbeit übernommen, sondern auch die anspruchsvollsten Abende und Nächte mit unserer Tochter Sophie.

Schließlich möchte ich mich bei allen Studienkollegen und Freunden bedanken, welche mich durch meine Studienzeit begleitet haben und diese besonders und unvergesslich gemacht haben.

Kurzfassung

Bei der Herstellung von Zement für die Errichtung von Gebäuden werden weltweit große Mengen an Treibhausgasen freigesetzt. Durch den voranschreitenden Klimawandel ist das Bedürfnis der Allgemeinheit nach ressourcenschonenden und klimafreundlichen Baustoffen in den letzten Jahren gestiegen. Die vorliegende Diplomarbeit untersucht den Einfluss der mechanischen Aktivierung der Tonminerale im Lehm auf dessen mechanische Eigenschaften. Konkret wurden dabei die Druck- und Biegezugfestigkeit untersucht.

Die im Zuge des Forschungsprojektes angefertigten REM-Aufnahmen zeigen deutlich, dass es zu einer Veränderung der vorhandenen Materialstruktur kommt in Zuge dessen sich die Eigenschaften des Materials verändern.

Um den Einfluss der Aktivierung zu untersuchen wurden Probekörper hergestellt, die bis zur Massenkonstanz getrocknet und anschließend auf ihre Festigkeit geprüft wurden. Für die Probekörper wurde Berglehm der Firma Andreas Zöchbauer GmbH aus St. Pölten in Niederösterreich verwendet. Das Material wurde im Vorfeld mit einer Brechanlage aufbereitet und danach gesiebt. Für die Erstellung der Probekörper wurde eine Prüfmethodik angelehnt an die europäische Norm EN 1015-11 – *Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk* festgelegt. Dazu wurde das Material mit 10, 15 oder 20 Ma% Wasser angemischt und mit einem Druck von bis zu 200 bar verpresst.

In Anhängigkeit der Zusammensetzung konnten bei einigen Probekörpern Verbesserungen der Druckfestigkeit durch Aktivierung nachgewiesen werden. Insbesondere bei den Probekörpern mit einer Wasserzugabe von 15 Ma% (Serie 9) und 20 Ma% (Serie 10) war eine Steigerung der Druckfestigkeit um 37% und um 74% bei einer Mahldauer von 60 Minuten nachweisbar. Die Ergebnisse der Biegezugfestigkeit zeigten keine Festigkeitssteigerung. Durch den Versuch wurde allerdings deutlich, dass die mechanischen Eigenschaften stark von der zugegebenen Wassermenge, der Art der Verdichtung und dem angewendeten Druck, sowie dem Ausgangsmaterial abhängen.

Abstract

The production of cement for the construction of buildings leads to a great amount of greenhouse gases being emitted worldwide. Due to increasing climate change, the general demand for sustainable and climate-friendly building materials has been on the rise in recent years. The thesis at hand studies the influence of mechanical activation of clay materials in loam on its mechanical properties, specifically compressive strength and flexural strength. This thesis aims to serve as a starting point for further research and the development of sustainable loam construction material.

The REM images taken as part of the research project clearly show a change in the structure of the material which in turn changes its properties.

The influence of activation was studied on samples that were dried until constant mass was reached and subsequently tested on their stability. The samples were produced using mountain loam by the Company Andreas Zöchbauer GmbH from St. Pölten in Lower Austria. Beforehand, the material had to be processed in a crushing plant and was then sifted. The testing method for the production of the samples was derived from the European Norm EN 1015-11 – *Method of testing for mortar for masonry*. The material was mixed with 10, 15 or 20 Ma% water. A pressure up to 200 bar for the grouting of the samples was used.

While the results for flexural strength came up inconclusive, significant improvement of compressive strength was proven in several samples. Especially the samples with 15 Ma% (Series 9) and 20 Ma% (Series 10) water showed an improvement of compressive strength up to 37% and 74% after grinding the material for 60 Minutes. The trial also showed, however, that the mechanical traits were strongly dependent on the amount of water added, the form of compression used and the pressure applied, as well as the starting material used.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG.....	1
1.1	Problemstellung	2
1.2	Zielsetzung	2
2	GRUNDLAGEN.....	3
2.1	Geschichte des Lehmbaues	3
2.2	Moderner Lehmabau – Lehmabau aktuell in Österreich	5
2.2.1	Kindergarten Muntlix, Vorarlberg	5
2.2.2	Haus Rauch, Vorarlberg.....	5
2.3	Moderner Lehmabau – Lehmabau international.....	6
2.3.1	Alnatura Campus, Darmstadt	6
2.3.2	TECLA Haus in Massa Lombarda	7
2.4	Lehmabaustoffe	8
2.4.1	Stampflehm.....	8
2.4.2	Wellerlehm.....	8
2.4.3	Leichtlehm.....	9
2.4.4	Lehmplatten	9
2.4.5	Lehmmörtel.....	9
2.5	Bestandteile von Lehm	10
2.5.1	Sand.....	11
2.5.2	Schluff	11
2.5.3	Ton	12
2.5.3.1	Zweischichtminerale.....	12
2.5.3.2	Dreischichtminerale.....	13
2.5.3.3	Vierschichtminerale.....	13
2.6	Vorkommen von Lehm in Österreich	14
2.7	Arten von Lehm.....	14
2.7.1	Geschiebemergel, Geschiebelehm.....	15
2.7.2	Löss, Lösslehm.....	15
2.7.3	Berglehm, Gehängelehm.....	15
2.7.4	Verwitterungslehm	15
2.7.5	Auenlehm.....	15
2.8	Eigenschaften von Lehm	16
2.8.1	Mechanische Eigenschaften von Lehm	16
2.8.2	Physikalische Eigenschaften von Lehm	17
2.8.2.1	Rohdichte.....	17
2.8.2.2	Wärmespeicherfähigkeit	18
2.8.2.3	Wärmeleitfähigkeit	19
2.8.2.4	Ausgleichsfeuchte.....	19
3	FESTIGKEITSSTEIGERUNG VON TON.....	21
3.1	Thermische Energiezufuhr	21

3.2	Mechanische Energiezufuhr	25
3.2.1	Mechanische Aktivierung von Kaolinit im Lehm	26
3.2.2	Auswirkungen der mechanischen Aktivierung.....	26
3.3	Zusatzstoffe und Zusatzmittel	29
4	MATERIAL UND METHODE	33
4.1	Material	33
4.1.1	Aufbereitung	37
4.1.2	Korngrößenverteilung	37
4.1.3	Mechanische Aktivierung	38
4.1.4	Scheibenschwingmühle.....	39
4.2	Vorversuche	40
4.2.1	Silikon-Prismen.....	40
4.2.2	Silikon-Würfel.....	41
4.2.3	Stahl-Prismen	42
4.3	Fazit und Festlegung der Probekörperherstellung	43
4.4	Probekörper	43
4.4.1	Anzahl der Probekörper	44
4.4.2	Probekörper entsprechend der ursprünglichen Zusammensetzung.....	45
4.4.2.1	Übersicht der Probekörper	48
4.4.2.2	Erkenntnisse aus der ersten Probekörper-Herstellung	49
4.4.3	Probekörper aus den Materialanteilen mit einer Korngröße unter 0,25 mm.....	50
4.4.3.1	Übersicht der Probekörper	52
4.4.4	Probekörper mit Bewehrung.....	53
4.5	Normative Grundlagen	54
4.5.1	Biegezugfestigkeit	54
4.5.2	Druckfestigkeit	55
4.6	Festigkeitsprüfung der Probekörper	56
4.7	Schwindverhalten der Probekörper	57
5	ERGEBNISSE UND CONCLUSIO	58
5.1.1	Ergebnisse der Prüfung	58
5.1.2	Auswertung der Ergebnisse	60
5.2	Schwindverhalten der Probekörper	65
5.3	Conclusio und Aussicht	70

1 EINLEITUNG

Anfang 2021 haben sich die EU-Mitgliedstaaten im Hinblick auf die angestrebte Klimaneutralität im Jahr 2050 darauf geeinigt, das Klimaziel für 2030 zu verschärfen. Eines der Hauptziele ist dabei die Senkung der Treibhausgasemissionen um 55% im Vergleich zum Stand aus dem Jahr 1990 [1]. Zuvor war eine Reduktion um 40% das erklärte Ziel. Zu den klimawirksamen Gasen, den so genannten Treibhausgasen (THG) zählen Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Distickstoffmonoxid (N₂O) sowie die fluorierten Treibhausgase (F-Gase), wobei zur Berechnung der Gesamtemission an Treibhausgasen die Emissionswerte aller Gase in ein CO₂-Äquivalent umgerechnet werden [2]. 8,1 Millionen Tonnen des CO₂-Äquivalents, dies entspricht ungefähr 10% der gesamt in Österreich verursachten Treibhausgase, werden dabei vom Sektor Gebäude in den Phasen Bau, Nutzung, Renovierung und Abriss verursacht [2]. EU-weit entfallen sogar 36% der Treibhausgasemissionen auf den Sektor Gebäude [3].

Ein großer Anteil der Treibhausgase, die vom Sektor Gebäude in der Phase Bau verursacht werden, entsteht bei der Herstellung von Zement [4]. Ein Baustoff, der durch den vermehrten Einsatz von Beton und den anhaltenden Bauboom in großen Massen produziert wird. Ein Ziel der Bauindustrie ist daher die Entwicklung und Produktion von klimafreundlichen und nachhaltigen Baustoffen aus Ressourcen, die lokal gewonnen werden können.

Lehm ist einer der ältesten Baustoffe der Welt, der heutzutage kaum noch eingesetzt wird. Dabei bietet er sich als ökologischer Baustoff regelrecht an: er ist weltweit verfügbar, günstig, leicht zu gewinnen und hat im verbauten Zustand positiven Einfluss auf das Raumklima.

1.1 Problemstellung

Lehm wird heutzutage als Baustoff kaum mehr genutzt. Das liegt daran, dass Lehm zwar eine von der Natur gegebene, innere Bindekraft besitzt, im Vergleich zu vielen anderen Baustoffen wie Beton, Stahl und Holz aber nur geringe Druck- und Zugfestigkeiten aufweisen kann. Zwar gibt es in der Geschichte des Lehmbaues durchaus auch Lehm in tragender Funktion, diese Bauteile sind jedoch vergleichsweise massiv ausgeführt und mit einer entsprechenden Bewehrung ergänzt. Ein weiteres Problem ist, dass Lehm ein Naturprodukt ist, dessen Eigenschaften stark von der Art aber auch dem Ort der Entstehung abhängen [5]. Aus diesem Grund wird Lehm zwar bereits oft als Putz zur Verbesserung des Raumklimas eingesetzt, aber selten in Bereichen, in denen eine hohe mechanische Festigkeit erforderlich ist.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Diplomarbeit ist die Beantwortung der Frage, ob durch mechanisch-physikalische Aktivierung von Tonmineralen eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von Lehmprodukten erreicht werden kann. Eine Verbesserung der Festigkeitseigenschaften, insbesondere der Druck- und Biegezugfestigkeit, würde Lehmabaustoffe konkurrenzfähiger zu Baustoffen wie Beton oder Holz machen und könnte so die weitere Entwicklung von Lehmabaustoffen positiv beeinflussen.

Um den Einfluss der Aktivierung zu untersuchen werden mehrere Probekörper mit mechanisch-physikalisch aktivierten Tonmineralen hergestellt und ihre mechanischen Eigenschaften mit jenen verglichen, die Probekörper ohne Aktivierung erreichen.

2 GRUNDLAGEN

In den nachfolgenden Kapiteln werden unter anderem die Geschichte des Lehmbaues, die Arten und das Vorkommen von Lehm sowie deren Eigenschaften erläutert. Besonders wird der Aufbau von Lehm sowie die mechanische Aktivierung der Tonminerale beschrieben.

2.1 Geschichte des Lehmbaues

Während in einigen Regionen der Welt, wie zum Beispiel im Nahen Osten oder in Asien, bis heute beeindruckende, historische Lehmbauten zu bewundern sind und auch heute teilweise noch mit Lehm gebaut wird, sind in Europa andere Baustoffe vorherrschend. Das ist im Wesentlichen auf die weltweit unterschiedlichen Klimazonen zurückzuführen.

Vor allem in trockenen und heißen Klimazonen, in denen Baustoffe wie Holz aber auch Steine knapp sind, hat sich Lehm schon seitdem Menschen begonnen haben sesshaft zu werden als geeigneter Baustoff gezeigt. Um eine Lastabtragung durch Lehm zu ermöglichen, muss die Struktur entsprechend massiv ausgebildet werden. Dadurch herrscht gleichzeitig ein kühles, angenehmes Klima in den Wohnräumen. So wurden in Ägypten bereits ca. 5000 Jahre v. Chr. Lehmziegel aus getrocknetem Nilschlamm hergestellt und auch Teile der Chinesischen Mauer bestehen aus Lehm [6]. Ein sehr bekanntes Gebäude in Afrika ist die große Moschee von Djenné (Abbildung 1), die 1988 in die Liste des UNESCO-Weltkulturerbes aufgenommen wurde [7]. Sie besteht fast ausschließlich aus Lehm und ist das größte sakrale Lehmgebäude der Welt. Ihre ursprüngliche Form wurde bereits im 14. Jahrhundert errichtet, das Gebäude wie es heute bekannt, ist stammt jedoch aus dem Jahr 1907 [8].



Abbildung 1: Die große Moschee von Djenné in Mali [9]

Ganz im Gegensatz dazu war das Klima in Europa gemäßigter, aber auch regnerischer und kälter. Da Baustoffe wie Holz und Steine ausreichend vorhanden waren, entwickelte sich hier vor allem die Skelettbauweise, bei der die tragende Struktur oft aus Holz gebildet wurde und Lehm die Zwischenräume füllte. Vor allem die mittelalterlichen Fachwerkbauten in ganz Europa erinnern heute noch daran. In Österreich kann man vor allem in den Weingebieten in Niederösterreich und im Burgenland noch einige Lehmbauten bewundern, viele sogenannte Kellerröhren wurden in den Lehm gegraben und das gewonnene Material anschließend oberirdisch verbaut [6].

Mit der Entwicklung und Verbreitung neuer Baustoffe, zuerst jener von gebranntem Ziegel und später vor allem von Beton sowie Stahlbeton, wurde Lehm nach und nach als Baustoff verdrängt. In manchen Teilen Europas hatte Lehm jedoch sowohl während als auch nach den beiden Weltkriegen eine kleine Renaissance, was vor allem dem Mangel an Ressourcen geschuldet war. Durch diesen Einsatz in der Nachkriegszeit und der Tatsache, dass Lehm in den letzten Jahren vor allem in von Armut betroffenen Ländern eingesetzt wurde, wird dem Baustoff bis heute oft minderwertige Qualität nachgesagt.

2.2 Moderner Lehmbau – Lehmbau aktuell in Österreich

Erst in den letzten Jahren rückte Lehm langsam wieder in den Fokus der Bauindustrie. Zurückzuführen ist das vor allem auf den wachsenden Mangel an Ressourcen und den Wunsch nach nachhaltigen Baustoffen. Mit der neu gewonnenen Aufmerksamkeit kam es auch zur Bildung von verschiedenen Interessensverbänden und Organisationen in Europa.

Bereits 2017 wurde die Gründung des Vereins „Netzwerk Lehm“ beschlossen, der es sich zur Aufgabe gemacht hat, als Interessenverband zu agieren und den Lehmbau international zu fördern [10]. Auf der Homepage des Vereins werden eine Vielzahl von Projekten vorgestellt, bei denen Lehm sowohl als tragendes Element, als Boden oder aber konservativ als Putz eingesetzt wird. Beispielhaft werden hier zwei Projekte kurz beschrieben.

2.2.1 Kindergarten Muntlix, Vorarlberg

Der Kindergarten in der Gemeinde Zwischenwasser in Vorarlberg wurde mit möglichst nachhaltigem und schadstoffarmem Material geplant [11]. Ein großer Anteil des Aushubes wurde direkt für den 9 cm starken Stampflehm Boden des Gebäudes, verwendet durch dessen hohe Speichermasse ein angenehmes Klima im Gebäude herrscht.

2.2.2 Haus Rauch, Vorarlberg

Mit seiner Firma setzt sich Martin Rauch seit über 30 Jahren für Stampflehm ein. In seinem Heimatort Schlins in Vorarlberg hat er sich ein Wohnhaus gebaut (Abbildung 2), bei welchem Lehm als vorwiegender Baustoff eingesetzt wurde. Dafür wurde das Aushubmaterial gesiebt und direkt für die Herstellung der tragenden Stampflehmwände und des Stampflehm Bodens verwendet [11].



Abbildung 2: Haus Rauch in Schilns, Vorarlberg [12]

2.3 Moderner Lehm- bau – Lehm- bau international

Auch international entwickelte sich der Lehm- bau weiter. In Deutschland wurde zum Beispiel bereits 1992 der Interessenverband „Dachverband Lehm e.V.“ gegründet, der es sich zum Ziel gemacht hat den „zukunfts- fähigen Baustoff Lehm“ zu fördern [13]. 1999 hat der Verband die, über die Grenzen Deutschlands hinaus bekannten, Lehm- bau- Regeln veröffentlicht, die den aktuellen Stand der Technik in Deutschland darlegen [14]. Zwei besonders interessante Projekte in Europa werden im Folgenden beispielhaft vorgestellt.

2.3.1 Alnatura Campus, Darmstadt

Bei der Errichtung des Bürogebäudes der Firma Alnatura in Darmstadt (Abbildung 3) wurden 3,5 Meter mal 1 Meter große Stampflehm- Fertigteile direkt vor Ort hergestellt und zu 12 Meter hohen, selbsttragenden Fassadenteilen geschichtet. Im Inneren der Fertigteile befindet sich eine 17 cm dicke Kerndämmung aus Schaumglasschotter. Insgesamt sind die Stampflehm- wände 69 cm dick [15] [16]. Das große Speichervolumen des dichten Stampflehmes sorgt für ein ausgeglichenes Klima im Inneren des Gebäudes.



Abbildung 3: Stampflehm-Fassade des Alnatura-Campus im Bau [15]

2.3.2 TECLA Haus in Massa Lombarda

Beim Bau des Tecla-Hauses (Abbildung 4) wurde eine sehr moderne Bauweise, der 3D-Druck von Gebäuden, mit dem sehr traditionsreichen Baustoff Lehm kombiniert, um ein Wohnhaus zu errichten. Das verwendete Material stammt direkt aus der Gegend und wurde vor dem Einsatz mit dem 3D-Drucker mit Wasser, einem Bindemittel und Fasern aus Reis vermischt [17]. Anschließend wurden 350 jeweils 12 mm dicke Schichten aufgespritzt, um die tragenden Lehmwände zu bilden.



Abbildung 4: Tecla Haus in Massa Lombarda [17]

2.4 Lehmbaustoffe

Anhand der Beispiele in den Abschnitten 2.2 und 2.3 ist bereits erkennbar, dass Lehm in vielen verschiedenen Formen eingesetzt werden kann. Historisch bekannt sind vor allem Stampflehm, Wellerlehm und Lehmsteine aber auch Lehmmörtel und Lehmputz. Lehmplatten ergänzen heutzutage das Angebot im Trockenbau und Lehmfarben die schadstofffreie Produktpalette der Innenraumgestaltung. Lehm ist wasserlöslich, weshalb Lehm im Regelfall als Baustoff im Spritzwasserbereich oder im erdberührten Bereich ausgeschlossen wird, doch auch hier gibt es aktuelle Forschungsergebnisse, die neue Möglichkeiten aufzeigen. So wurde beispielweise ein Fußbodenaufbau aus Glasschaumgranulat und drei unterschiedlichen darüberliegenden Lehmschichten hinsichtlich des Wärme- und Feuchtetransportes untersucht. Der untersuchte Aufbau ist hygrophisch funktionstüchtig und könnte in Zukunft als ökologische Alternative zu der konventionellen Bodenplatte aus Beton eingesetzt werden [18].

2.4.1 Stampflehm

Bei Wänden aus Stampflehm wird der feuchte Lehm lageweise in eine vertikale Schalung eingebracht und anschließend durch Stampfen verdichtet. Traditionell wurde der Lehm manuell gestampft, ab der 1. Hälfte des 20. Jahrhunderts wurden außerdem elektrische und pneumatisch betriebene Stampfeinrichtungen eingesetzt [19] [20]. Ein Nachteil des lageweisen Einbaues ist die Rissbildung, die vor allem aus dem ungleichmäßigen Schwinden resultiert. Moderne Stampflehm-Bauweisen sehen daher oftmals einen geschossweisen, möglichst kontinuierlichen Einbau vor. Durch den hohen Verdichtungsgrad der Wände sind Stampflehmwände die Lehm-Baustoffe mit der höchsten Dichte (siehe Abschnitt 2.8.2.1).

2.4.2 Wellerlehm

Wellerlehm unterscheidet sich von Stampflehm vor allem durch die Zugabe von Stroh oder anderen geeigneten Faserstoffen. Stroh oder Faserstoffe dienen dabei als eine Art Bewehrung. Außerdem können mit Wellerlehm Wände ohne Schalung errichtet werden. Dafür werden abwechselnd 5 cm hohe Faserschichten mit 10 cm breiigen oder dickflüssigen Lehmlagen geschichtet, bis eine Höhe von maximal 60 cm erreicht wird. Nach einigen Tagen Trocknungszeit ist es möglich, die nächste Schicht aufzusetzen oder die bestehende Schicht gerade abzustechen. Heutzutage wird

Wellerlehm aufgrund des hohen Aufwandes vor allem zur Reparatur von bestehenden Konstruktionen eingesetzt [5] [20].

2.4.3 Leichtlehm

Ähnlich wie bei Wellerlehm werden dem Leichtlehm Zuschläge beigelegt. Dabei sind organische Zuschläge, wie zum Beispiel Stroh möglich oder mineralische leichte Zuschläge, wie etwa Blähton, Bims oder Perlit. Durch den hohen Anteil an Leichtzuschlägen verbessern sich einerseits die wärmedämmenden Eigenschaften, andererseits ist der Baustoff dadurch schlechter für tragende Wandkonstruktionen geeignet. Leichtlehm wird daher vor allem für nichttragende Elemente, zum Beispiel für die Ausfachungen von Fachwerkwänden verwendet [5] [13].

2.4.4 Lehmplatten

Lehmplatten sind plattenförmige Baustoffe, denen in der Regel eine Bewehrung in Form von beispielsweise Stroh, Schilfrohmatten oder Kokosfasern beigelegt wird. Lehmplatten mit einer Dicke unter 5 cm sind nicht selbsttragend, hier benötigt man eine tragende Unterkonstruktion. Solche Platten eignen sich daher ideal für den Trockenbau, wo sie als Wand- oder Deckenverkleidung eingesetzt werden können. Auch ein Einsatz als verlorene Schalung ist möglich. Lehmplatten mit einer Dicke über 5 cm sind selbsttragend und können für nichttragende Wände im Innenausbau eingesetzt werden [13] [21].

2.4.5 Lehmmörtel

Die Anwendung von werksmäßig hergestelltem Lehmmauermörtel und Lehmputzmörtel ist nach DIN 18946 und DIN 18947 geregelt. Lehmmauermörtel wird zur Herstellung von tragenden und nichttragenden Lehmsteinmauerwerken verwendet, Lehmputzmörtel wird zum Verputzen von Wänden und Decken im Innenausbau sowie im witterungsgeschützten Außenbereich eingesetzt. Außerdem kommt Lehmörtel in der Form von Lehmspritzmörtel bei der Ausfachung von Fachwerktragwerken oder bei der Herstellung von Vorsatzschalen zum Einsatz.

Lehmmörtel wird aus Lehm, organischen oder mineralischen Zusatzstoffen und Wasser hergestellt. Leichtlehmmörtel bezeichnet einen Mörtel mit den entsprechenden leichten Zusatzstoffen und einer Rohdichte unter 1200 kg/m^3 . [5] [20]

2.5 Bestandteile von Lehm

Lehm kann grundsätzlich als Dreikornmisch aus den drei Hauptfraktionen des Feinbodens, Sand, Schluff und Ton, verstanden werden. Die drei Hauptfraktionen weisen eine Korngröße unter 2 mm auf, wobei Ton eine Korngröße unter 2 µm, Schluff eine Korngröße zwischen 2 und 63 µm und Sand eine Korngröße über 63 µm besitzt [5]. In Abbildung 5 ist die in der Bodenmechanik übliche grafische Darstellung der Kornverteilung dargestellt. Der rot markierte Bereich zeigt die im Lehm vertretenen Fraktionen Ton, Schluff und Sand. Durch Einzeichnen der Massenanteile der im Boden enthaltenen Kornfraktionen lässt sich eine Korngrößenverteilungslinie darstellen.

Die in Abbildung 5 eingezeichnete exemplarische Korngrößenverteilungslinie entspricht der Bodenart Lösslehm. Aus der Abbildung ist erkennbar das dieser Lösslehm zu etwa 85% aus dem sogenannten Schlämmkorn und nur zu etwa 15% aus Sand besteht.

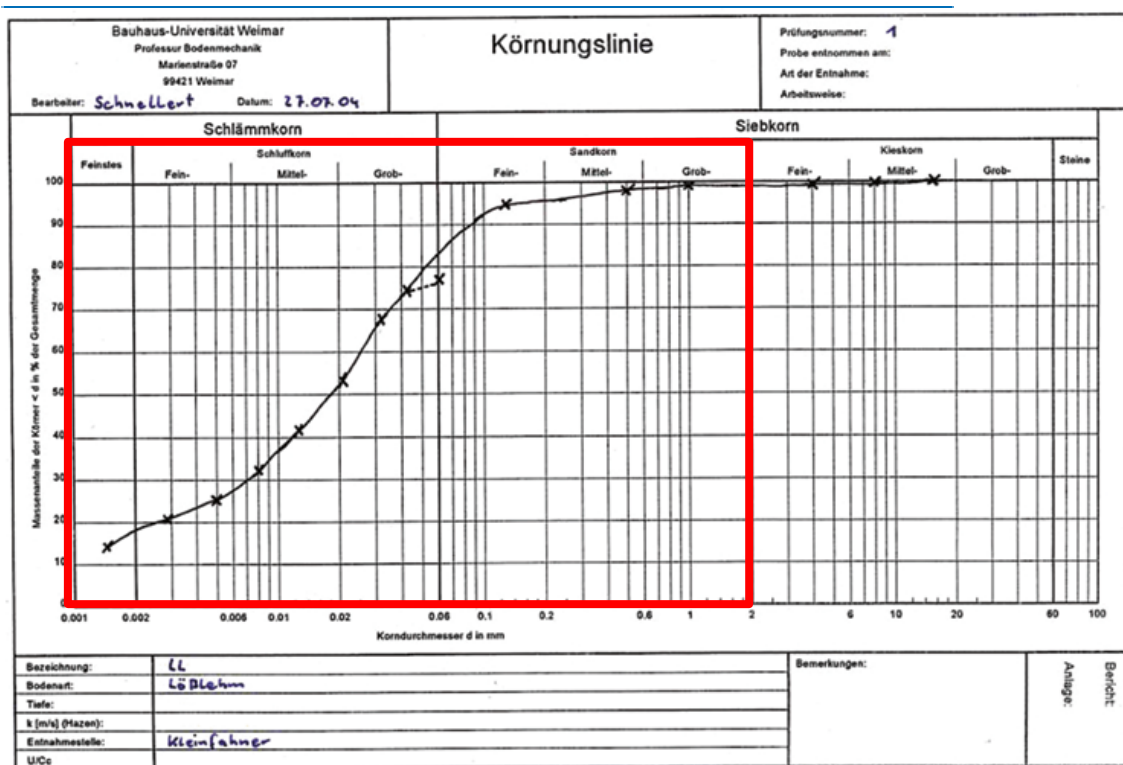


Abbildung 5: Kornverteilungslinie von Lösslehm [5]

Da Lehm ein Naturprodukt ist, ist das Mischungsverhältnis der Hauptfraktionen vom Ort und der Art der Entstehung des Lehmes abhängig. Eine einheitliche Zusammensetzung gemäß einer Norm, wie es bei anderen Baustoffen wie Beton oder Stahl üblich ist, existiert daher nicht. Abgesehen von den drei Hauptfraktionen Ton,

Schluff und Sand können daher auch feiner, mittelfeiner oder grober Kies beziehungsweise Steine im Lehm enthalten sein [19].

Nach Art der Entstehung lässt sich Lehm in Geschiebemergel, Geschiebelehm, Löss, Lösslehm, Berglehm, Gehängelehm, Verwitterungslehm und Auenlehm unterscheiden (siehe Abschnitt 2.7).

2.5.1 Sand

Die Bezeichnung Sand gibt keine mineralische Zusammensetzung eines Bodens an, sondern sagt lediglich aus, dass der Boden zu mehr als 50% aus Körnern mit einer Korngröße zwischen 0,063 mm und 2 mm besteht. Sand ist ein Verwitterungsprodukt aus anderen Gesteinen, dass durch chemische oder physikalische Verwitterung entstehen kann. Ein großer Anteil des auf der Erde vorkommenden Sandes setzt sich vor allem aus Quarz zusammen [22].

Sand bildet die größte Kornfraktion im Lehm. Es ist ein loses, nicht bindiges Material. Abhängig von der Dauer und der Art des Transportes können die Körner noch kantig oder aber auch abgerundet sein.

Im Lehmboden übernehmen die Sandkörner die gleiche Aufgabe wie die Gesteinskörnung im Beton. Erst durch die Beigabe eines Bindemittels - im Lehm übernimmt Ton diese Aufgabe - entsteht ein Gefüge, dass sich zur weiteren Verarbeitung eignet.

Eine reine Sandschicht ist in der Regel wasserdurchlässig, gut durchlüftet und leicht bearbeitbar. Andererseits ist eine reine Tonschicht durch die großen Bindungskräfte der Tonminerale ein relativ wasserundurchlässiger, schlecht belüfteter und vor allem schwer bearbeitbarer Boden, der erst durch die Beigabe von Sand für die Herstellung von Baustoffen verwertbar wird.

2.5.2 Schluff

Schluff beziehungsweise Silt bezeichnet klastische Sedimente mit einer Korngröße zwischen 2 μm und 63 μm . Als klastisch werden Sedimente bezeichnet, wenn ihre Bestandteile vor allem durch mechanische Zerstörung beziehungsweise Transport anderer Gesteine entstanden sind [22].

In der Regel besteht Schluff wie Sand aus feinen Quarzkörnern. Je nachdem ob es sich um einen tonigen beziehungsweise lehmigen Schluff (mehr Tonanteile) oder

einen sandigen Schluff (mehr Sandanteile) handelt, wird Schluff als mehr oder weniger bindig eingestuft [23].

2.5.3 Ton

Als Ton wird in der Geotechnik einerseits eine Kornfraktion mit einer Korngröße kleiner $2\ \mu\text{m}$ bezeichnet und andererseits das Tonmineral, ein Verwitterungsprodukt aus primären Silikaten. Dieses Tonmineral weist ebenfalls eine Korngröße kleiner $2\ \mu\text{m}$ auf und kann sich stark auf die Bodeneigenschaften auswirken [24]. Auch auf die Eigenschaften von Lehm haben die enthaltenen Tonminerale einen großen Einfluss, weshalb der Aufbau und die Besonderheiten in Folge genauer betrachtet werden.

Anhand ihres strukturellen Aufbaues lassen sich unter anderem Zweischicht-, Dreischicht- und Vierschichtminerale unterscheiden, wobei eine Schicht in der Regel aus Siliziumtetraedern („T-Schicht“ – Abbildung 6) oder Aluminiumoktaedern („O-Schicht“ - Abbildung 7) besteht. Bei den Siliziumtetraedern ist ein Silizium-Atom von Sauerstoff-Atomen umschlossen, wobei die gedachte Verbindung der Sauerstoff-Atome mit Linien die Form eines Tetraeders ergibt. Bei den Aluminiumoktaedern wird ein Aluminium- oder Magnesium-Atom von Sauerstoff-Atomen umgeben, deren gedachte Verbindung die Form eines Oktaeders ergibt.

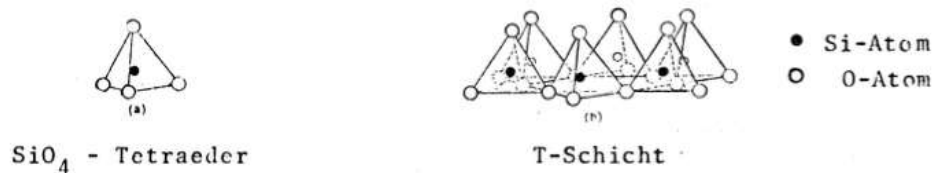


Abbildung 6: Siliziumtetraeder, „T-Schicht“ [25]

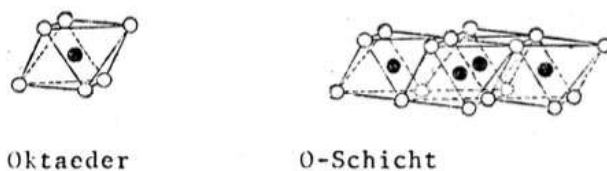


Abbildung 7: Aluminiumoktaeder, „O-Schicht“ [25]

2.5.3.1 Zweischichtminerale

Zweischichtminerale sind Tonminerale, die aus einer Tetraeder-Oktaeder Schichtfolge („TO-Folge“ - Abbildung 8) aufgebaut werden. Zwischen den vielen einzelnen TO-Folgen, die das Tonmineral aufbauen, entstehen Wasserstoffbrücken,

die zu einem hohen Zusammenhalt führen. [24] Durch den guten Zusammenhalt und den geringen Abstand aufgrund der Wasserstoffbrücken, ist es Zweischichtmineralen nicht möglich, andere Ionen oder Moleküle aufzunehmen [26]. Zweischichtminerale sind daher kaum quellfähig. Zu den Zweischichtmineralen zählen zum Beispiel Kaolinit und Chrysotil.

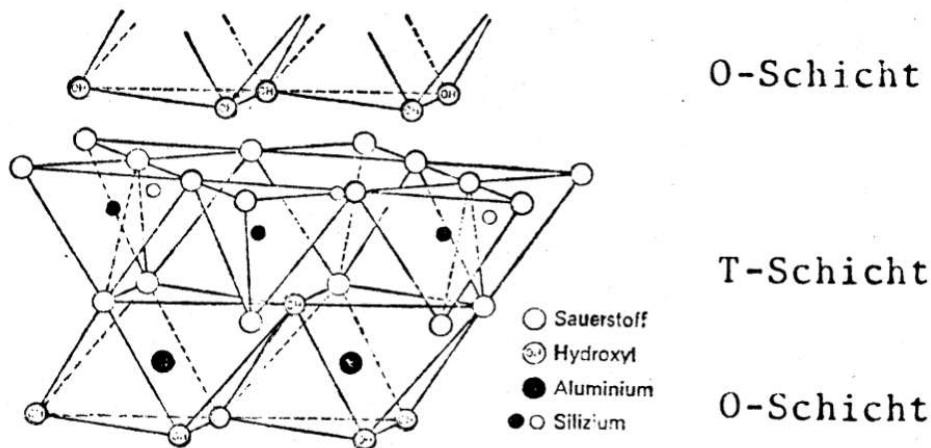


Abbildung 8: Schematische Darstellung der Kaolinit Struktur [25]

2.5.3.2 Dreischichtminerale

Dreischichtminerale sind aus zwei Tetraeder- und einer Oktaederschicht aufgebaut, sie bilden eine „TOT-Folge“. Bei der Bildung von Dreischichtmineralen kommt es zum sogenannten isomorphen Ersatz [24] [26], dabei werden das zentrale Silizium-Atom des Tetraeders beziehungsweise das Aluminium- oder Magnesium-Atom des Oktaeders durch ein niederwertiges Atom mit gleichem Ionendurchmesser ausgetauscht. Ein Kennzeichen von Dreischichtmineralen ist somit ein negativer Ladungsüberschuss, der wiederum ausgeglichen wird, indem positiv geladene Kationen eingelagert werden. Durch die fehlenden Wasserstoffbrücken ist der Zusammenhalt generell geringer und Dreischichtminerale können daher gut Wasser aufnehmen und wieder abgeben. Sie sind somit, mit Ausnahme der Glimmer-Gruppe, quellfähig. Zu den Dreischichtmineralen zählen zum Beispiel das quellfähige Mineral Smektit und das nicht quellfähige Mineral Illit.

2.5.3.3 Vierschichtminerale

Vierschichtminerale bilden eine „TOTO-Folge“. Sie sind den Zweischichtmineralen sehr ähnlich und auch hier wird der Zusammenhalt durch Wasserstoffbrücken gebildet.

Sie sind wie Zweischichtminerale nicht quellfähig. Zu den Vierschichtmineralen zählt zum Beispiel Chlorit [26].

2.6 Vorkommen von Lehm in Österreich

Lehm ist ein bindiger Mischboden, der in der obersten Schicht der Erdkruste zu finden ist und durch Verwitterung oder Umsortierung von Fest- oder Lockergesteinen entsteht. Ein natürliches Lehmvorkommen ist daher weltweit vorhanden.

In Österreich ist vor allem im Norden, ausgehend von der Böhmisches Masse in Oberösterreich und Niederösterreich, bis zum Burgenland aber auch im Süden der Steiermark, ein erhöhtes Lehmvorkommen vorhanden. Dabei findet man im Bereich der Böhmisches Masse Sand und lehmigen Sand, im Bereich der Molasse sandigen Lehm beziehungsweise Lehm. In der Flyschzone die sich bis zum Bodensee erstreckt, findet man ebenfalls sandige Lehme [27]. Abbildung 9 zeigt eine Übersichtskarte Österreichs mit den verschiedenen geologischen Bereichen.

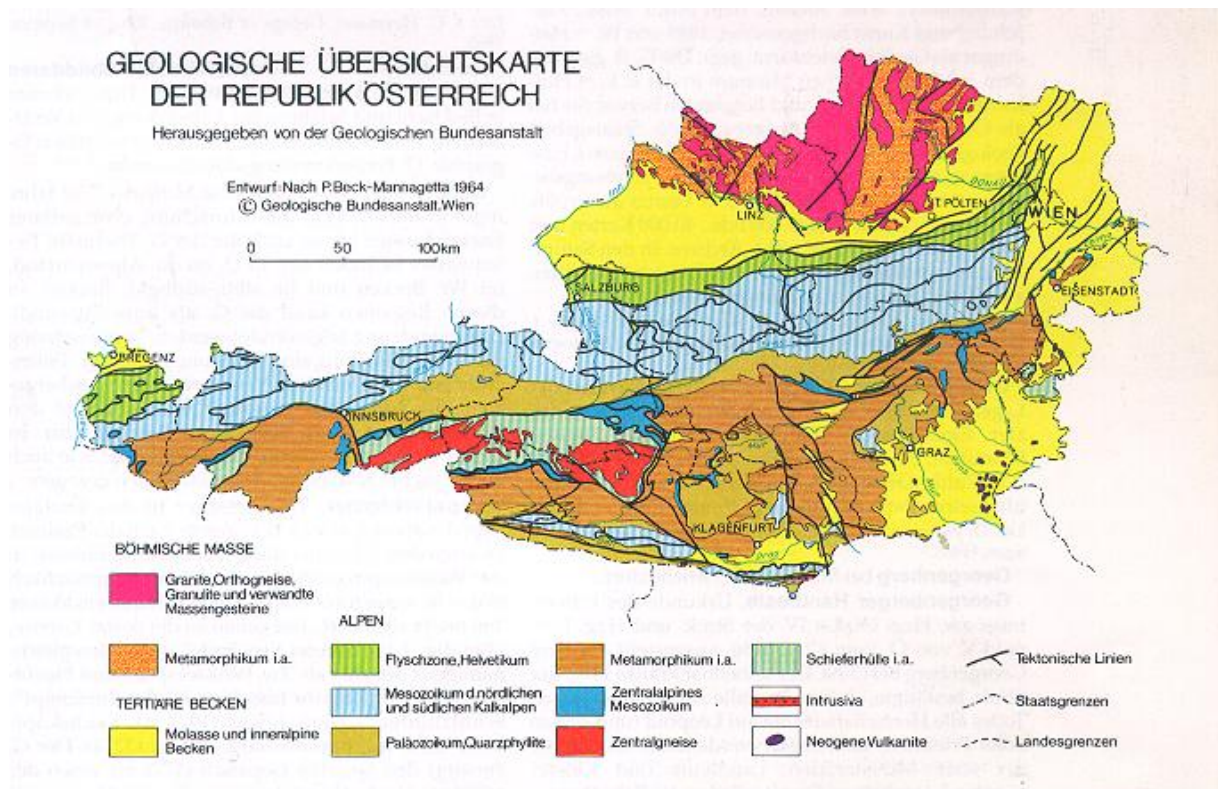


Abbildung 9: Geologische Übersichtskarte von Österreich [28]

2.7 Arten von Lehm

Nach der Art der Entstehung unterscheidet man die verschiedenen Arten von Lehm, in den folgenden Abschnitten werden diese näher beschrieben.

2.7.1 Geschiebemergel, Geschiebelehm

Geschiebemergel ist ein Sedimentgestein aus dem von einem Gletscher bewegten Moränenmaterial, das unsortiert an der Basis des Gletschers abgelagert wird. Es enthält typischerweise die Kornfraktionen Ton, Schluff, Sand und Kies bis hin zu Findlingen. Mergel zeichnet sich durch einen nennenswerten Anteil von Kalk in der Bodenmischung aus. Durch nachträgliche Verwitterung kann der Kalkanteil aus dem Mergel herausgelöst werden, man spricht dann von kalkfreiem Geschiebelehm [5].

2.7.2 Löss, Lösslehm

Löss ist ein feinkörniges Sediment, das vor allem aus Schluff besteht und einen nennenswerten Kalkanteil besitzt. Es wird primär durch Wind transportiert und abgelagert. Nach der Ablagerung wird durch Verwitterung der obersten Schichten Kalk gelöst und es können sich Tonminerale bilden, wodurch Lösslehm entsteht [5].

2.7.3 Berglehm, Gehängelehm

Berglehm entsteht durch Verwitterung von unterschiedlichsten Gesteinsmaterialien in höheren beziehungsweise gebirgigen Lagen. Er kann sowohl Sandstein und Schiefer als auch Granit und Gneis in unterschiedlichen Größen beinhalten, wobei die Form der einzelne Körner rund oder kantig sein kann. Gehängelehm entspricht im Wesentlichen einem Berglehm, der vom Ort seiner Entstehung abgerutscht ist [5] [29].

2.7.4 Verwitterungslehm

Verwitterungslehm ähnelt dem Geschiebelehm in seiner Kornverteilung, wurde jedoch im Gegensatz zu Geschiebelehm nicht bewegt. Das bedeutet er befindet sich noch an seiner primären Lagerstätte. Dadurch dass der Boden nicht umgelagert wurde, besitzen die Sand- und Kieskörner, noch ihre eckige und kantige Form [5] [30].

2.7.5 Auenlehm

Auenlehm ist ein meist feinkörniges Sediment aus Feinsand, Schluff und Ton, das sich im Bereich von Flüssen beziehungsweise Flussauen ablagert und meist Hummus-Einlagerungen aufweist. Je nach Geschwindigkeit des Gewässers kann die Kornform von weniger rund bis rund variieren [5].

2.8 Eigenschaften von Lehm

Für die Entwicklung von Lehmbaustoffen ist es wichtig die Eigenschaften des Ausgangsmaterials zu kennen. Hinsichtlich der Forschungsfrage dieser Diplomarbeit werden zuerst die mechanischen Eigenschaften von Lehm näher erläutert. Um zu verdeutlichen weshalb Lehm ein aussichtsreicher Baustoff der Zukunft sein kann, werden der Vollständigkeit halber anschließend auch die physikalischen Eigenschaften beschrieben.

Allgemein lässt sich sagen, dass durch die Zugabe von Feuchtigkeit, in der Regel in Form von Wasser, Lehmbaustoffe weich und formbar werden. Durch das Verdunsten des Wassers trocknet der Baustoff, wird fest und erhält mechanische Festigkeiten. Gleichzeitig mit dem Verdunsten des Wassers geht eine Verkleinerung des Volumens einher, die sogenannte Trockenschwindung [14].

Abhängig vom Aufbau der im Lehm enthaltenen Tonminerale kann die Wasseraufnahmefähigkeit des Baustoffes kleiner oder größer sein, vor allem einige Dreischichtminerale sind stark quellfähig und können große Mengen Wasser aufnehmen (siehe Abschnitt 2.5.3 – Dreischichtminerale). Mit der Aufnahme von größeren Mengen Wasser wird jedoch auch das Schwindverhalten ausgeprägter.

Durch das Schwinden können Risse im Baustoff auftreten, welche die Festigkeitseigenschaften negativ beeinflussen. Lehm hat aber, im Gegensatz zu Betonbaustoffen, bei denen Schwinden auch ein Problem darstellt, die Fähigkeit nach dem Trocknen erneut Wasser aufzunehmen und sich auszudehnen. Diese Volumensänderungen sind schwer vorherzusehen, da sie nicht nur vom Ton im Lehm, sondern auch von der Menge und Dauer der Feuchteeinwirkung abhängig sind.

2.8.1 Mechanische Eigenschaften von Lehm

Wie unter Abschnitt 2.7 erläutert, ist Lehm ein Naturprodukt, dessen Zusammensetzung sowohl vom Ort als auch von der Art der Entstehung abhängt. Da wesentliche Faktoren wie der Tongehalt und die Korngrößenverteilung beim Ausgangsmaterial stark variieren, variieren auch die daraus resultierenden Festigkeitseigenschaften. Durch die anschließende Weiterverarbeitung zu Lehmprodukten, bei der wiederum die Art der Aufbereitung, die Menge des zugegebenen Wassers, die gewählte Herstellungsart der Werkstoffe, die Art der Trocknung und auch die Zugabe von Zuschlägen oder Zusatzstoffen variabel sind, streuen die Festigkeitseigenschaften weiter deutlich.

Aufgrund fehlender Forschungsergebnisse und fehlender Normen ist die Festigkeitsbestimmung im Lehmabau aktuell meist auf die Druckfestigkeit beschränkt, zu deren Bestimmung man sich an den Prüfverfahren für Betonbau und Mauerwerksbau orientiert [5].

Während gestampfte Lehmabauern [32] bereits eine Druckfestigkeit von rund 2 N/mm^2 erreichen, lassen vorangegangene Untersuchungen [33] an industriellen Lehmprodukten darauf schließen, dass man von einer Druckfestigkeit zwischen 2 und 5 N/mm^2 ausgehen kann, wobei bei idealen Voraussetzungen ein Maximum von 10 bis 11 N/mm^2 erreichbar ist.

Analog zur Bestimmung der Druckfestigkeit lässt sich auch die Biegezugfestigkeit über die Prüfverfahren des Betonbaues und des Mauerwerkbaues bestimmen. Die Biegezugfestigkeit von Stampflehm beträgt im Durchschnitt $0,5 \text{ N/mm}^2$ [5] [34]. Die Festigkeit kann durch Beigabe einer Art Bewehrung in Form von Fasern oder Geweben noch erhöht werden. Die Biegezugfestigkeit von Lehmsteinen liegt bei $0,25 \text{ N/mm}^2$ [5].

Lehmabaustoffe können prinzipiell eine Zugfestigkeit vorweisen. Im Gegensatz zu der Druckfestigkeit liegt die maximale Belastungsgrenze bei Zugbeanspruchung allerdings viel niedriger. Lehm kann somit nicht zur Abtragung von Zugkräften herangezogen werden [5].

2.8.2 Physikalische Eigenschaften von Lehm

Die physikalischen Eigenschaften von Lehm sind wie die mechanischen Eigenschaften maßgeblich von der Materialzusammensetzung sowie der Art und dem Ort der Entstehung abhängig. Im folgenden Abschnitt wird unter anderem näher auf die Rohdichte sowie die bauphysikalischen Eigenschaften Wärmeleitfähigkeit und Wärmespeicherfähigkeit eingegangen.

2.8.2.1 Rohdichte

Als Rohdichte eines porösen Werkstoffes wird der Quotient aus Masse durch Volumen inklusive der Porenräume bezeichnet.

Die Rohdichte von unbehandeltem Lehm hängt daher vor allem vom Wassergehalt und von der Art und Größe der Verdichtung, die dem Lehm am Ort der Entstehung widerfahren ist, ab. Bei Lehmabaustoffen wird die Rohdichte wiederum durch die weiteren Bearbeitungsschritte beeinflusst. Je nach gewählter Verarbeitungsart und

hinzugefügten Zusatzstoffen kann die Trockenrohddichte von Lehmbaustoffen, wie in Tabelle 1 ersichtlich, stark variieren:

Tabelle 1: Trockenrohddichten von Lehmbaustoffen [5]

Lehmbaustoff	Trockenrohddichte [kg/m ³]
Stampflehm	1700 - 2400
Wellerlehm	1400 - 1700
Leichtlehm	300 - 1200
Lehmschüttung	300 - 2200
Lehmmörtel	600 - 1800
Lehmsteine	600 - 2200
Lehmplatte	300 - 1800

Bei Stampflehm wird die Rohddichte durch das zusätzliche Verdichten in der Verarbeitung erhöht, während bei Wellerlehm Stroh als Zuschlag hinzugefügt und das Material in Schichten eingebracht wird. Dies sorgt für eine vergleichsweise geringere Rohddichte. Leichtlehm wiederum wird mit leichten mineralischen oder organischen Zusatzstoffen wie Blähton oder Hanffasern vermischt, um die Rohddichte weiter zu verringern. Baustoffe wie Lehmsteine und Lehmplatten sind je nach Hersteller und Anwendung mit unterschiedlichen Zusatzstoffen angereichert, weshalb hier eine große Bandbreite an möglichen Trockenrohddichten besteht.

2.8.2.2 Wärmespeicherfähigkeit

Mit steigender Rohddichte ρ [kg/m³], Bauteildicke d [m] und spezifischer Wärmespeicherkapazität c [kJ/kg·K] steigt auch die flächenbezogene Wärmespeicherfähigkeit Q eines Baustoffes an:

$$Q = \rho \cdot d \cdot c \quad (2.1)$$

Die spezifische Wärmespeicherkapazität c von Lehm ohne Beigabe von organischen oder mineralischen Zuschlägen beträgt etwa 1 kJ/kg·K [5].

Eine hohe Wärmespeicherfähigkeit sagt aus, dass ein Baustoff prinzipiell gut geeignet ist, um große Energiemengen in Form von Wärme aufzunehmen und zu speichern. So kühlen Konstruktionen mit einer hohen Wärmespeicherfähigkeit im

Winter langsamer ab und heizen sich im Sommer während einer kurzen Hitzeperiode von wenigen Tagen langsamer auf [35].

2.8.2.3 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)] wiederum ist ein Kennwert, der angibt welche Wärmemenge bei einem Temperaturunterschied von 1 Kelvin in einer Sekunde durch 1 m² einer 1 m dicken Schicht eines Baustoffes hindurch geleitet wird.

Die Wärmeleitfähigkeit ist dabei vor allem von der Porengröße und deren Verteilung abhängig. Mit steigendem Porengehalt und daher mit sinkender Rohdichte sinkt auch die Wärmeleitfähigkeit [36].

Die Wärmeleitfähigkeit ist der wichtigste Kennwert, um das Dämmverhalten von Baustoffen zu bewerten. Je niedriger die Wärmeleitfähigkeit, umso schlechter wird Wärme durch den Baustoff geleitet und umso besser dämmt er. Stampflehm ist zum Beispiel zwar ein guter Wärmespeicher, als Dämmstoff jedoch durch die hohe Rohdichte und hohe Wärmeleitfähigkeit gänzlich ungeeignet.

2.8.2.4 Ausgleichsfeuchte

Hygroskopische Baustoffe sind in der Lage Feuchtigkeit aus der Umgebung, zum Beispiel in Form von Wasserdampf, aufzunehmen. Dabei entziehen die Baustoffe der Umgebung so lange Feuchtigkeit, bis sich ein Gleichgewicht mit der Umgebung einstellt [36] und die Ausgleichs- oder Gleichgewichtsfeuchte erreicht ist.

Die Ausgleichsfeuchte von Lehm wird in der Literatur zwischen 2 bis 4,5% angegeben, hängt aber von dem in Abschnitt 2.5.3 beschriebenen Aufbau der Mineralstruktur ab [5]. Im Lehm sind die Tonminerale jene hygroskopischen Bestandteile, die die Aufnahme des Wasserdampfes möglich machen. Ein hoher Tongehalt wirkt sich in einer höheren Feuchtigkeitsaufnahme aus. Lehm, der sich vor allem aus Dreischicht-Tonmineralen zusammensetzt, hat außerdem aufgrund der höheren spezifischen Oberfläche und dem damit höheren Anteil an Mikroporen im Vergleich zu den Zweischichtmineralen ein höheres Potential Feuchtigkeit aufzunehmen [5] [37].

Die niedrige Ausgleichsfeuchte von Lehm bedeutet, dass der Baustoff verhältnismäßig trocken ist. Lehm kann in einem geschlossenen Raum überschüssige Feuchtigkeit aufnehmen, speichern und zeitversetzt bei sinkender Luftfeuchtigkeit auch wieder an den Raum abgeben. Damit wird durch Lehm ein angenehmes

Raumklima geschaffen und der Baustoff hilft dabei, kritische Feuchtebereiche, vor allem hinsichtlich Schimmelbildung, zu vermeiden. Wichtig für die feuchteregulierende Wirkung eines Baustoffes ist aber nicht nur das quantitative Aufnahmevermögen, sondern auch die Geschwindigkeit, mit welcher die Feuchtigkeit aufgenommen bzw. abgegeben werden kann. Untersuchungen haben gezeigt, dass Lehm Feuchtigkeit wesentlich schneller als andere Baustoffe aufnehmen kann [19].

Außerdem kann Lehm dadurch einen konservierenden Einfluss auf Baustoffe in der Umgebung haben, die selbst eine höhere Gleichgewichtsfeuchte aufweisen. Lehm entzieht diesen Baustoffen somit die Feuchtigkeit und schützt die Konstruktion zum Beispiel vor tierischen Schädlingen oder Pilzen [38]. Eine Tatsache, die man sich historisch gesehen vor allem im Fachwerkbau zu Nutze gemacht hat (Abbildung 10).



Abbildung 10: Historisches Lehmfachwerk mit hölzernem Flechtwerk und einer Ausfachung aus Lehm und Stroh [39]

3 FESTIGKEITSSTEIGERUNG VON TON

Wenn Lehm beziehungsweise Ton trocknet, verdunstet das zuvor in der Gitterstruktur gespeicherte Wasser und der Baustoff härtet aus. Die so erreichte Festigkeit kann deutlich durch Hervorrufen einer chemischen Reaktion gesteigert werden. Diese Vorgehensweise nützt man zum Beispiel beim Brennen von Keramik. Um eine chemische Reaktion hervorzurufen ist das Vorhandensein von Energie notwendig. Diese Energie kann jedoch in verschiedenen Formen vorhanden sein: in thermischer, elektrischer oder mechanischer [40].

Abgesehen von dem Hervorrufen einer chemischen Reaktion ist es außerdem möglich, dem Lehmbaustoff Zusatzstoffe oder Zusatzmittel beizufügen [5]. Zu den Zusatzstoffen zählen unter anderen auch mineralische oder organische Faserstoffe, die als eine Art Bewehrung dienen und die Zugfestigkeit verbessern können. Zusatzmittel wiederum verändern die chemische Struktur der Tonminerale, mit ihrer Beigabe ist es unter anderem möglich, das Schwindverhalten oder die Witterungsbeständigkeit zu verbessern.

Um die mechanische Aktivierung in Relation zu anderen Methoden der Festigkeitssteigerung zu setzen, werden die oben genannten Möglichkeiten in diesem Kapitel kurz dargestellt.

3.1 Thermische Energiezufuhr

Unter dem Begriff „Sintern“ versteht man einen physikalisch chemischen Vorgang, bei dem es infolge einer Temperaturbehandlung zu einer Verfestigung beziehungsweise Verdichtung von keramischen, porösen Formkörpern kommt. [41] [42].

Porzellan ist ein typisch keramisches Produkt, dass aus den Rohstoffen Kaolinit, Quarz und Feldspat entsteht. Das Verhalten von Kaolinit während des Brennvorganges wurde dabei schon ausführlich untersucht. Bei der Erwärmung von Kaolinit kommt es ab einem Temperaturbereich von 500°C zur Bildung von Metakaolin [43] [44]. Werden die Ausgangsstoffe von Porzellan weiter erhitzt, kommt es oberhalb von 1000°C zur Bildung von Mullit.

Für eine chemische Reaktion von Kaolinit durch Wärmezufuhr muss also zumindest eine Temperatur von 500°C erreicht werden. Untersuchungen mit einer Differenzialthermoanalyse (DTA) zeigen, dass bei einer Temperatur von 580°C das als OH-Gruppe gespeicherte Strukturwasser abgegeben wird [41]. In Abbildung 11 ist dies mit der Stelle „b“ gekennzeichnet.

Dabei scheint die Siliziumtetraeder-Schicht weitgehend erhalten zu bleiben, während es in der Aluminiumoktaeder-Schicht aufgrund der Abspaltung des Wassers zu einer Umorientierung kommt.

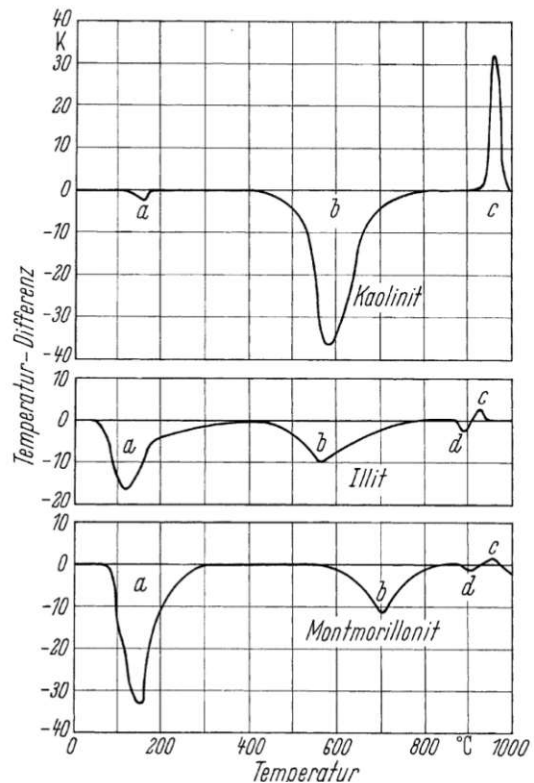


Abbildung 11: DTA-Kurven der Tonminerale Kaolinit, Illit und Montmorillonit [46]

Kommt es zu einer weiteren Erhitzung auf über 1000°C, bildet sich aus Kaolinit Primärmullit, das die schuppige Form von Kaolinit weitgehend beibehält. Bei Auftreten von Schmelzphasen, wie es beim Brennen von Keramik der Fall ist, bildet sich jedoch das nadelförmige Sekundärmullit. Dieses Sekundärmullit hat aufgrund seines Aufbaues einen deutlichen Einfluss auf die Eigenschaften des gebrannten Keramikkörpers: sowohl die Festigkeit als auch die Temperaturwechselbeständigkeit werden erhöht [45].

In dem Bericht „Branchensteckbrief der Keramikindustrie“ der **Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft** an das deutsche Bundesministerium für Wirtschaft und Energie werden die in Tabelle 2 angeführten Verbrauchs- und Emissionszahlen für das Jahr 2016 angegeben [46].

Tabelle 2: Übersicht über Produktionsmenge, Emissionsmenge und Energieverbrauch der Ziegelproduktion deutschen Keramikindustrie im Jahr 2016

Produkt	Produktionsmenge in Mio. t	Emissionsmenge in Mio. t CO ₂	CO ₂ /t	Energieverbrauch in TWh/a	TWh/Mio. t
Ziegel	8,7	1,6	0,18	6	0,69

Der Gesamtenergieverbrauch der deutschen Keramikindustrie (dies umfasst die Produkte Fliesen, technische Keramik, feuerfeste Keramik und Ziegel) im Jahr 2016 liegt bei 11,4 TWh/a bei einer Gesamtproduktionsmenge von 11,2 Millionen Tonnen (entspricht **1,02 TWh/Mio. t**). Der Großteil der Energie wird dabei in Form von thermischer Energie eingesetzt, wobei hauptsächlich Erdgas als Brennstoff genutzt wird. Der Hochtemperatur-Prozess der für die Herstellung von Fliesen, Keramik und Ziegel notwendig ist, entspricht nicht gerade einem nachhaltigen Herstellungsprozess. Ein Vergleich mit den Kennzahlen der Zementindustrie macht dies deutlich. Der Gesamtenergieverbrauch der deutschen Zementindustrie im Jahr 2015 lag bei 30,7 TWh/a bei einer Gesamtproduktionsmenge von 34 Millionen Tonnen (entspricht **0,90 TWh/Mio. t**) [47]. Ziegel werden im Wesentlichen aus Lehm oder Ton hergestellt [48], die in Tabelle 2 angeführten Emissionswerte für Ziegel entsprechen daher jenen von gebrannten Lehmziegeln. Lehmsteine dagegen werden nicht gebrannt, sondern mit Zufuhr von Wärme getrocknet.

Bei einer vom Ziegelproduzent Wienerberger AG in Auftrag gegebenen Untersuchung aus dem Jahr 2004 wurde der Energieverbrauch für die Herstellung von gebrannten Lehmziegel und getrocknete Lehmsteine gegenübergestellt [49]. Für das Trocknen der Lehmsteine wurden zwei Möglichkeiten verglichen:

- Trocknen durch eine Wärmezufuhr durch Erdgasverbrennung (Variante 1)
- Trocknen durch eine Wärmezufuhr die rein aus der Abwärme eines gesonderten Brennprozesses gewonnen wird (Variante 2).

Das Ergebnis der Untersuchung ist in Abbildung 12 dargestellt.

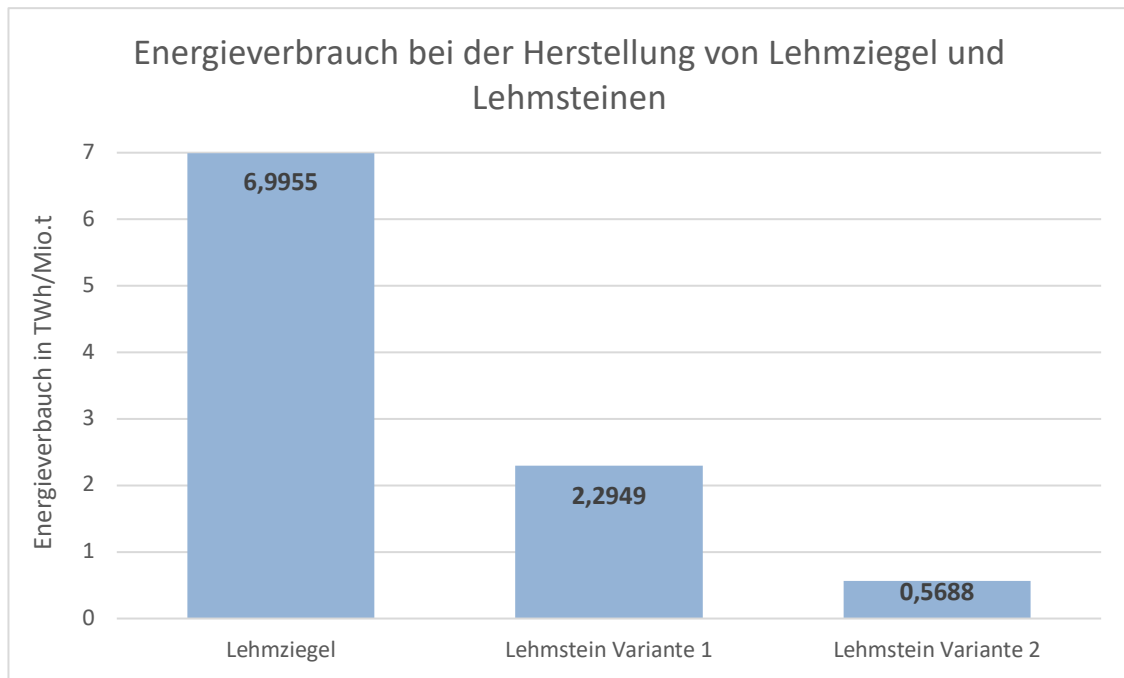


Abbildung 12: Energieverbrauch bei der Herstellung von Lehmziegel und Lehmsteinen [49]

Neben dem Energieverbrauch wurde auch das Treibhauspotential von Lehmziegel und Lehmsteinen untersucht. Mit Hilfe des Treibhauspotentials (GWP = Global Warming Potential) lassen sich Baustoffe hinsichtlich ihres gesamten Beitrages zur Erderwärmung vergleichen. Dabei wird sowohl die Herstellung, die Nutzung als auch die Entsorgung eines Baustoffes berücksichtigt. Um die Emissionen der einzelnen Baustoffe dabei vergleichbar zu machen, werden die unterschiedlichen Treibhausgase die beispielweise während der Herstellung entstehen auf ein CO₂-Äquivalent umgerechnet [50]. Das Ergebnis der Untersuchung ist in der folgenden Abbildung 13 dargestellt.

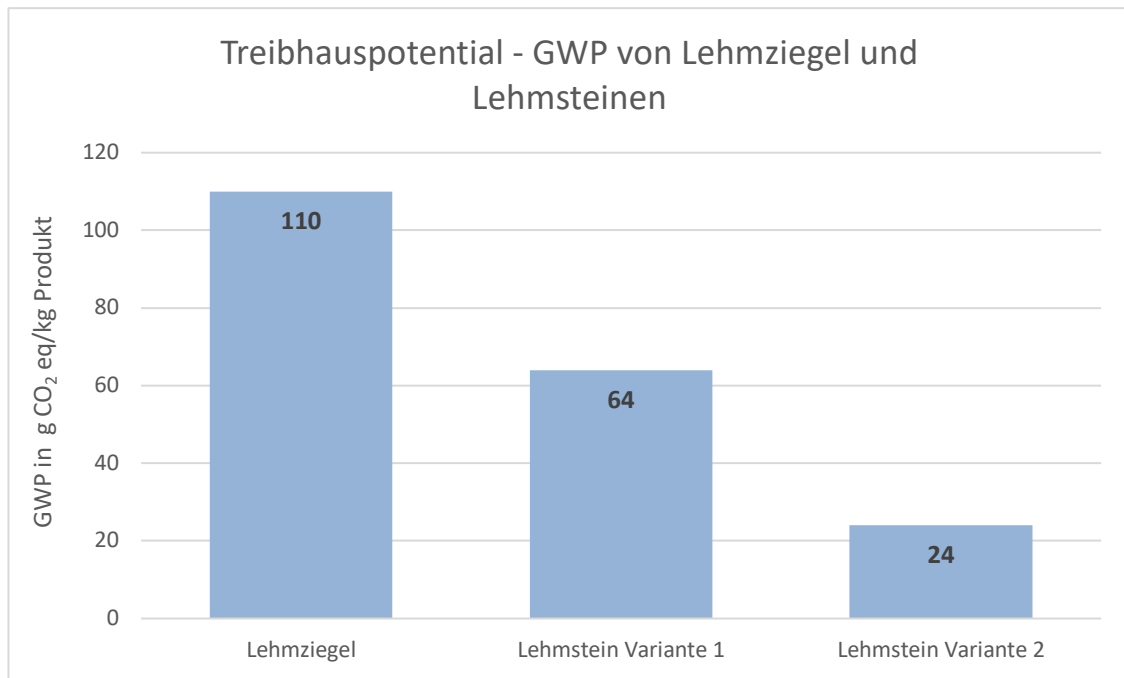


Abbildung 13: Treibhauspotential von Lehmziegel und Lehmsteinen [49]

3.2 Mechanische Energiezufuhr

Unter dem Begriff „**Mechanochemie**“ versteht man das Hervorrufen einer chemischen Reaktion beziehungsweise die Veränderung der chemischen Eigenschaften von Molekülen durch das Einwirken einer mechanischen Beanspruchung [51] [52]. Weiters bezieht sich der Begriff „**Tribochemie**“ [53] auf die chemische Veränderung durch mechanische Einwirkungen auf **Festkörper**. Streng genommen waren die ersten Entzündungsreaktionen, die der Mensch durch das Aneinanderreiben von Holzstücken hervorgerufen hat, eine Anwendung von Tribochemie [54]. Die Aufzeichnung des griechischen Naturforschers Theophrastos von Eresos ca. 315 v. Chr. gilt heute als die erste dokumentierte mechanochemische Reaktion: Beim Zerreiben von Zinnober mit Essig in einem Kupfermörser entsteht Quecksilber [54] [55].

Obwohl Mechanochemie schon lange angewendet wird, gilt erst der Amerikaner M. Carey Lea als Begründer. Er erforschte in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts unter anderem die Zersetzungsreaktionen von Silber- und Quecksilberhalogeniden [56]. Seit der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts findet vermehrt, vor allem im osteuropäischen Raum sowie in Japan, Forschung in diesem Fachbereich statt.

Dabei sind die Vorteile der mechanischen Aktivierung von chemischen Reaktionen nicht unerheblich:

- Vermeiden von energieaufwendigen Hochtemperatur-Prozessen
- Lösungsmittelfreie Durchführung von chemischen Reaktionen

Mechanochemie zählt daher auch zu den nachhaltigen Herstellungsprozessen die in der „Grünen Chemie“ [57] eingesetzt werden und eignet sich somit ideal für die Herstellung eines nachhaltigen, ressourcenschonenden Baustoffes aus Lehm. Abgesehen davon haben Untersuchungen gezeigt, dass durch den Einsatz von Mechanochemie auch Verbindungen ermöglicht werden, die mit der klassischen Synthese nur schwer oder gar nicht erreicht werden können [51] [55].

3.2.1 Mechanische Aktivierung von Kaolinit im Lehm

Wie bereits unter 2.5.3 erläutert, zählt Kaolinit zu den Zweischicht-Tonmineralen. Kaolinit kristallisiert in einem triklinen Kristallsystem [58]. Dieses System ist dadurch gekennzeichnet, dass alle Winkel von 90° abweichen und alle Achsen unterschiedlich lange sind [59].

Untersuchungen haben gezeigt, dass eine intensive mechanische Beanspruchung, wie das Mahlen mit einer Scheibenschwingmühle, zu einer Zerstörung der Gitterstruktur und zu einem Lösen der Bindungen führt. Durch das Brechen der Kaolinit-Kristalle wird die spezifische Oberfläche vergrößert und die Kationenaustauschkapazität steigt [60]. Materialien deren Moleküle kein regelmäßiges Muster bilden und dessen Struktur somit keiner Ordnung mehr folgt, nennt man amorph. Die anhaltende intensive mechanische Beanspruchung von Kaolinit führt nach und nach zu einer Amorphisierung des Materials [61].

3.2.2 Auswirkungen der mechanischen Aktivierung

Nach einer intensiven mechanischen Beanspruchung verändert sich der grundlegende Aufbau des Zweischichtminerals. Es kommt zum Bruch zwischen den Siliziumtetraedern und den Aluminiumoktaedern [61] und sowohl die thermischen [62] als auch die mechanischen Eigenschaften verändern sich.

Diese Diplomarbeit wurde im Zuge eines Forschungsprojektes der TU Wien verfasst, für welches mit Hilfe eines Rasterelektronenmikroskop (REM) Aufnahmen erstellt, um die Vorgänge des Mahlprozesses sichtbar zu machen. Dazu wurden die folgenden Auflösungsschritte aufgenommen ($k=1000$): 0,1k, 1k, 10k, 50k, 100k.

Abbildung 14 zeigt die Struktur der Feinanteile (< 0,25 mm) des Materials vor dem Mahlvorgang in einer tausendfachen Vergrößerung (1k). Man erkennt deutlich die einzelnen, unterschiedlich großen Sand-, Schluff- und Tonteilchen.

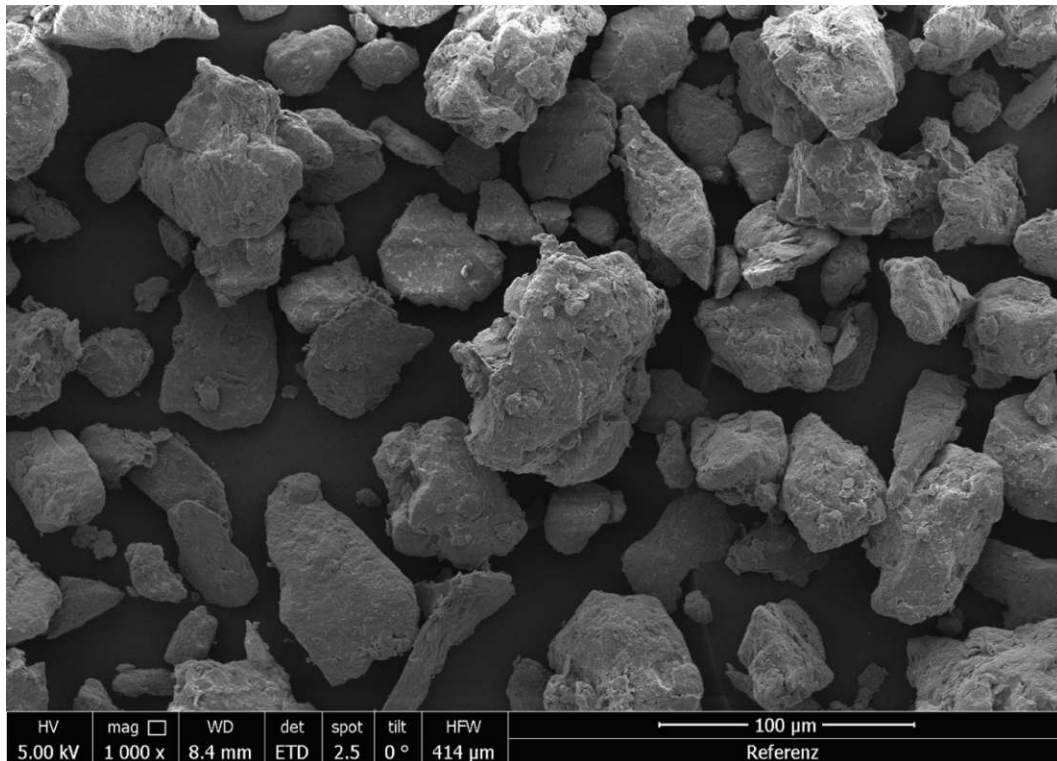


Abbildung 14: REM Aufnahme; Struktur der Feinanteile (<0,25 mm) bei tausendfacher Vergrößerung

Abbildung 15 zeigt die Veränderung der Materialstruktur nach einer Mahldauer von 30 beziehungsweise 60 Minuten. Bereits nach einer Mahldauer von 30 Minuten sind die größeren Gesteinskörner gut zerkleinert. Nach 60 Minuten sind die einzelnen Kornfraktionen kaum noch erkennbar.

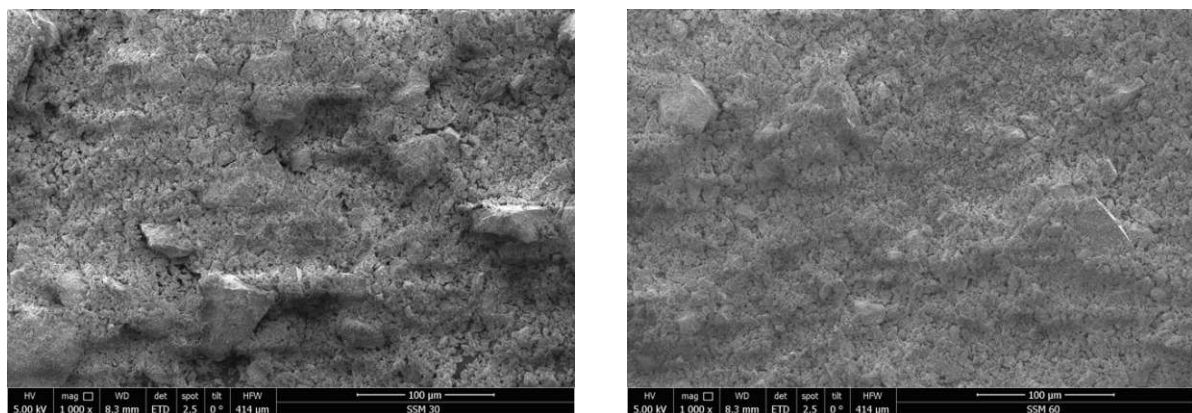


Abbildung 15: REM-Aufnahme (1k); Struktur der Feinanteile (<0,25 mm) nach 30 Minuten (links) und 60 Minuten (rechts) mahlen

Kaolinit hat die kristallchemische Zusammensetzung $\text{Al}_4[(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10}]$ [63]. Weiterreichend untersucht wurden in der Vergangenheit die Auswirkungen der mechanischen Aktivierung auf die Lösbarkeit des Aluminiumoxid-Anteils (Al_2O_3) von Kaolinit. Dabei wurde festgestellt, dass eine Verbesserung der Lösbarkeit um etwa 100% möglich ist und auch die Gewinnung von Aluminium aus siliziumreichen Tonen prinzipiell denkbar ist [64].

Dirk SCHUBERT hat im Zuge seiner Dissertation neue Werkstoffe aus Ton und Faserstoffen untersucht [61]. Er ist dabei der Frage nachgegangen, ob durch eine Aktivierung der Tonminerale eine **Verbesserung der Verbundqualität** erzielt werden kann, um so Werkstoffe mit höherer Festigkeit herzustellen. Dabei wurden mit dem Verfahren der trockenen Pressverdichtung mit hohem Pressdruck (bis zu 1000 bar) folgende Probekörper hergestellt:

- Probekörper aus reinem Ton
- Probekörper aus Ton und Faserstoff
- Probekörper aus einem Gemisch von Ton, Holz und Montanwachsreststoff RH60 beziehungsweise Weichbraunkohle

Bei allen drei Probekörpern ist eine Steigerung der Biegefestigkeit (Abbildung 16) nach der mechanischen Aktivierung der Tonminerale erkennbar. SCHUBERT erklärt dies mit einer erhöhten Kohäsion zwischen den Tonmineralen sowie starken Wechselwirkungen zwischen Ton und Faserstoff durch Schichtpaketverschiebungen und Gitterbrüchen in der Tonstruktur [61].

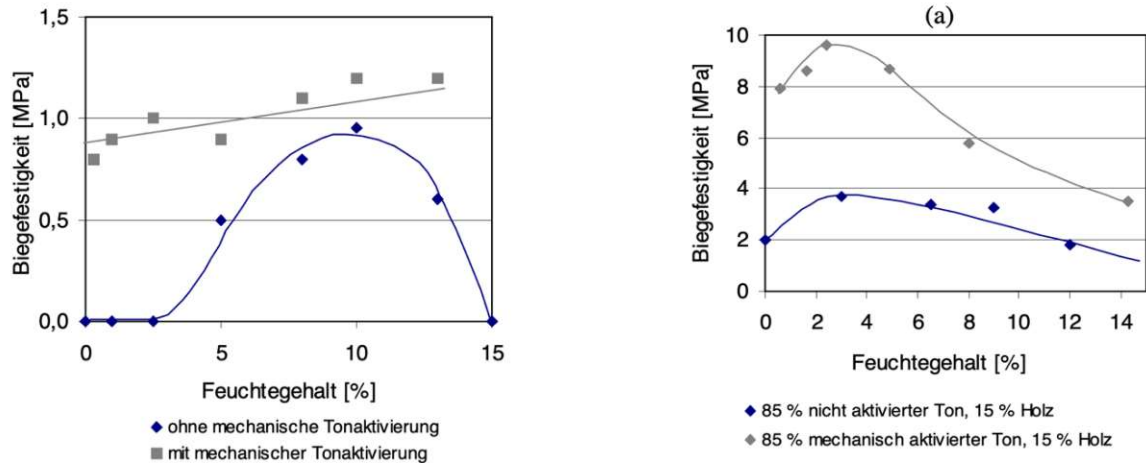


Abbildung 16: Vergleich der Biegefestigkeit der Formkörper aus nicht aktiviertem und mechanisch aktiviertem Ton. Reiner Ton (links) und Ton-Holzfaser Mischung (rechts) [66]

SCHUBERT hat weiters unterschiedliche Zerkleinerungsmaschinen untersucht, die geeignet sind, Tonminerale zu amorphisieren. Seiner Erkenntnis folgend, dass das Mahlen in einer Scheibenschwingmühle am intensivsten erfolgt, wurde das Material für die folgenden Versuche mit eben dieser Mühle aufbereitet.

Untersuchungen haben außerdem gezeigt, dass die spezifische Oberfläche der Kaolinit-Teilchen mit der Dauer des Mahlvorganges zunimmt, wobei das Maximum nach etwas mehr als 4 Stunden erreicht ist. Mit zunehmender Mahldauer sinkt der Wert der spezifischen Oberfläche wieder, was daran liegt, dass sich die feinsten Teilchen nach etwa 5 Stunden Mahldauer zu größeren Teilen agglomerieren, während bei kürzerer Mahldauer der Effekt der Kornzerkleinerung überwiegt [64].

3.3 Zusatzstoffe und Zusatzmittel

SCHROEDER gibt in seinem Buch Lehmbau einen Überblick über die verschiedenen Zusatzstoffe (Abbildung 17) und Zusatzmittel (Abbildung 18), die bei der Herstellung von Lehmbaustoffen verwendet werden können. Da das übergeordnete Ziel dieser Diplomarbeit die Herstellung eines **klimaneutralen**, möglichst **ressourcenschonenden** Baustoffes ist, wird die Autorin in Folge nur die natürlichen und nicht die synthetischen Zuschläge vergleichen.

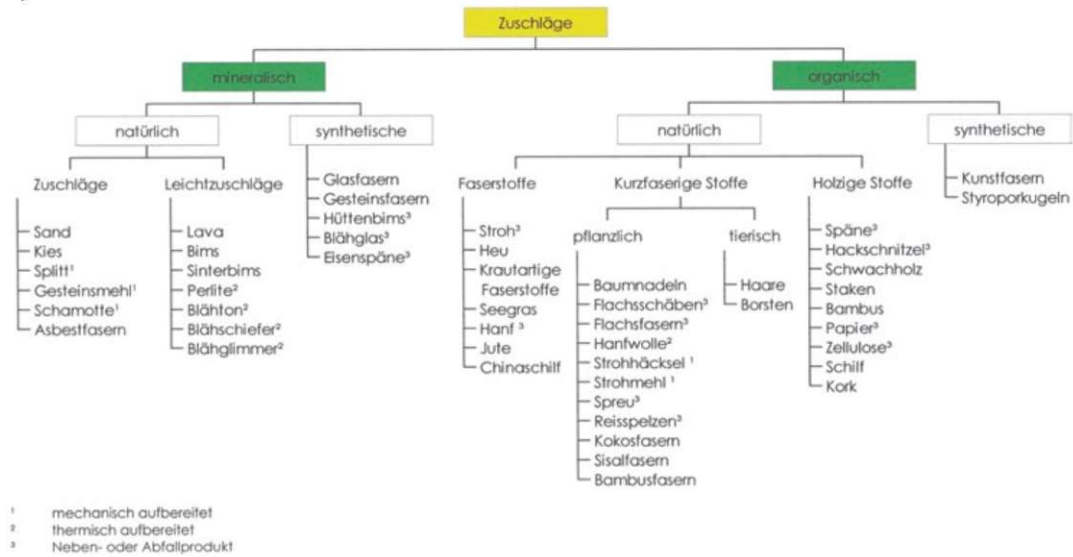


Abbildung 17: Mögliche Zusatzstoffe bei der Herstellung von Lehmbaustoffen [5]

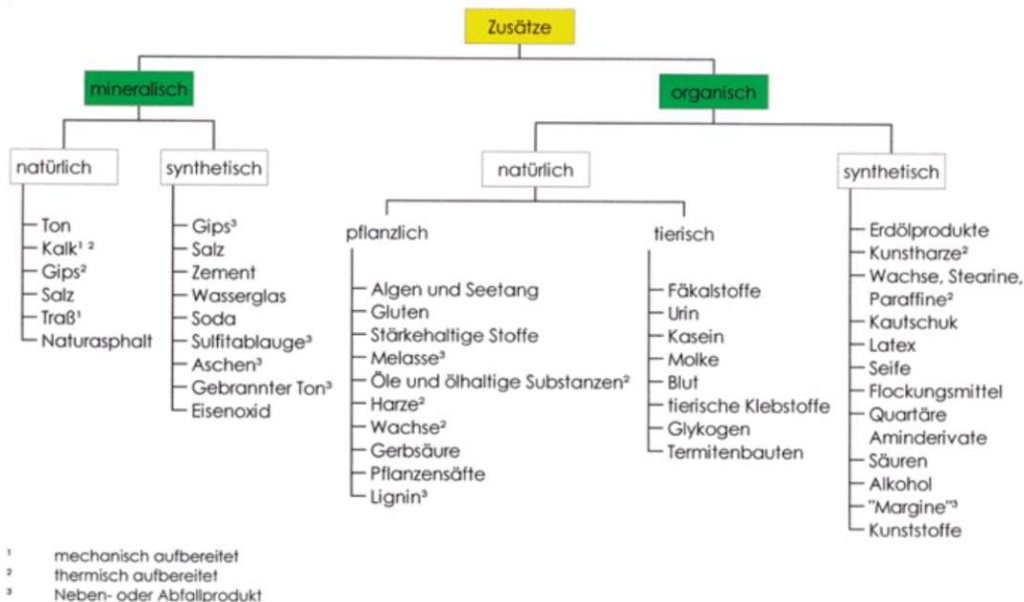


Abbildung 18: Mögliche Zusatzmittel bei der Herstellung von Lehmbaustoffen [5]

Mineralische Zuschläge und dabei insbesondere Leichtzuschläge werden Baustoffen wie Lehm oder auch Beton meist zur Verbesserung der wärmedämmenden Eigenschaften und nicht zur Verbesserung der Festigkeit zugefügt [65]. Da Lehmbaustoffe keine hohe Zugfestigkeit aufweisen, sind von den Zusatzstoffen vor allem Faserstoffe, die als Bewehrung wirken können, nützlich. Dabei ist jedoch zu beachten, dass ein zu hoher Anteil an Faserstoffen dazu führt, dass die Druckfestigkeit sinkt. Zusatzmittel werden, wie zu Beginn des Kapitels 3 erwähnt, vor allem verwendet, um Eigenschaften wie das Quellverhalten oder die Witterungsbeständigkeit zu beeinflussen. Wenngleich manche Zusatzmittel auch positiven Einfluss auf die

Festigkeitseigenschaften haben können [65], werden im Folgenden nur Zusatzstoffe betrachtet.

Exemplarisch werden daher die mutmaßlich besonders ökologischen Neben- und Abfallprodukte Stroh und Hanf sowie die Zusatzstoffe Jute und Holzfasern genauer betrachtet.

Stroh ist ein weit verbreiteter und lange bekannter Zusatzstoff im Lehmbau. Wie in Abschnitt 2.4.2 erläutert, wird Wellerlehm in der Regel mit Stroh ausgeführt. TROJAN hat im Zuge seiner Diplomarbeit nachgewiesen, dass kurze Strohfasern (0,5 bis 2 cm Länge), keinen positiven Einfluss auf die Druck- und Biegezugfestigkeit haben [65]. Mit längeren Strohfasern könnte ein besserer Verbund zwischen Zuschlag und Lehm hergestellt werden. Allerdings sind die längeren Fasern nicht für eine industrielle Herstellung geeignet, da sie sich im maschinellen Mischvorgang um das Mischwerkzeug wickeln.

Hanffasern sind besonders stabile Pflanzenfasern und äußerst reißfest, sie eignen sich daher gut als Bewehrung in Lehmbaustoffen. Sie sind jedoch kein Abfall- oder Nebenprodukt: für ihre Herstellung müssen die Stängel der Pflanzen gebrochen und gewalzt werden [66]. Bei der Herstellung von Hanffasern fallen allerdings auch Hanfschäbe an. Diese lassen sich gemeinsam mit Lehm zu Hanflehm vermischen, aus dem man massive Bauteile ebenso wie Dämmstoffe anfertigen kann [67] [68].

Aus Jute lassen sich besonders günstige sowie starke Naturfasern gewinnen. Die Jutefasern werden mit Hilfe des sogenannte „Rösten“ aus den Jutepflanzen der Gattung *Corchorus* gewonnen. Beim Wasserrösten werden die geernteten Jutestängel für mehrere Wochen in Wasser eingeweicht und anschließend werden die Fasern händisch gelöst [69]. Jute wird im Lehmbau zum Beispiel als Flächenbewehrung bei Lehmputzen eingesetzt. Untersuchungen mit Gipsputz und Jutefasern haben gezeigt, dass die mechanischen Eigenschaften durch den Einsatz der Naturfaser verbessert werden können [70].

Parallel zu dieser Arbeit wurde im gleichen Forschungsbereich eine Diplomarbeit verfasst, bei welcher die mechanischen Eigenschaften von Lehmmischungen mit und ohne Additiven untersucht wurden [71]. Dabei wurden dem Lehm Holzfasern mit einer

Länge zwischen wenigen Millimeter bis zu einem Zentimeter beigemischt. Nach der Prüfung der Probekörper wurden folgende Ergebnisse festgestellt:

- Reduktion der Biegezugfestigkeit um bis zu 35%
- Reduktion der Druckfestigkeit um bis zu 20%
- Erhöhung der Haftzugfestigkeit um bis zu 10%

Vom Autor wird vermutet, dass der Verbund aufgrund der zu geringen Faserlänge nicht ausreicht, um die Druck- und Zugkräfte zu übertragen. Diese vorläufigen Ergebnisse deuten darauf hin, dass sich Holzfasern ähnlich wie die zuvor erwähnten Strohfasern verhalten.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass bei der Verwendung von natürlichen Faserstoffen durchaus Potential für die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von Lehm besteht. Bisher wurde aber vor allem der Einsatz von Fasern als Flächenbewehrung und die damit einhergehende Verbesserung der Haftzugfestigkeit bei Lehmputzen untersucht. Um die Verbesserung der Druck- und Zugfestigkeit durch Faserzugabe mit jener durch thermische oder mechanische Behandlung zu vergleichen, benötigt es weiterführende Forschung.

4 MATERIAL UND METHODE

Im folgenden Kapitel wird zunächst das verwendete Material und seine Zusammensetzung näher beschrieben. Anschließend wird ein Überblick über die notwendigen Aufbereitungsschritte sowie die mechanische Aktivierung des Materials gegeben. Nach einer Reihe von Vorversuchen wurde schließlich die Vorgehensweise zur Herstellung der Probekörper festgelegt. Am Ende des Kapitels sind abschließend die normativen Grundlagen für die Prüfung der Probekörper zusammengefasst.

4.1 Material

Für die folgenden Versuche wurde Berglehm der Firma Andreas Zöchbauer GmbH verwendet. Das Material stammt aus Winzing im Bezirk St. Pölten in Niederösterreich.

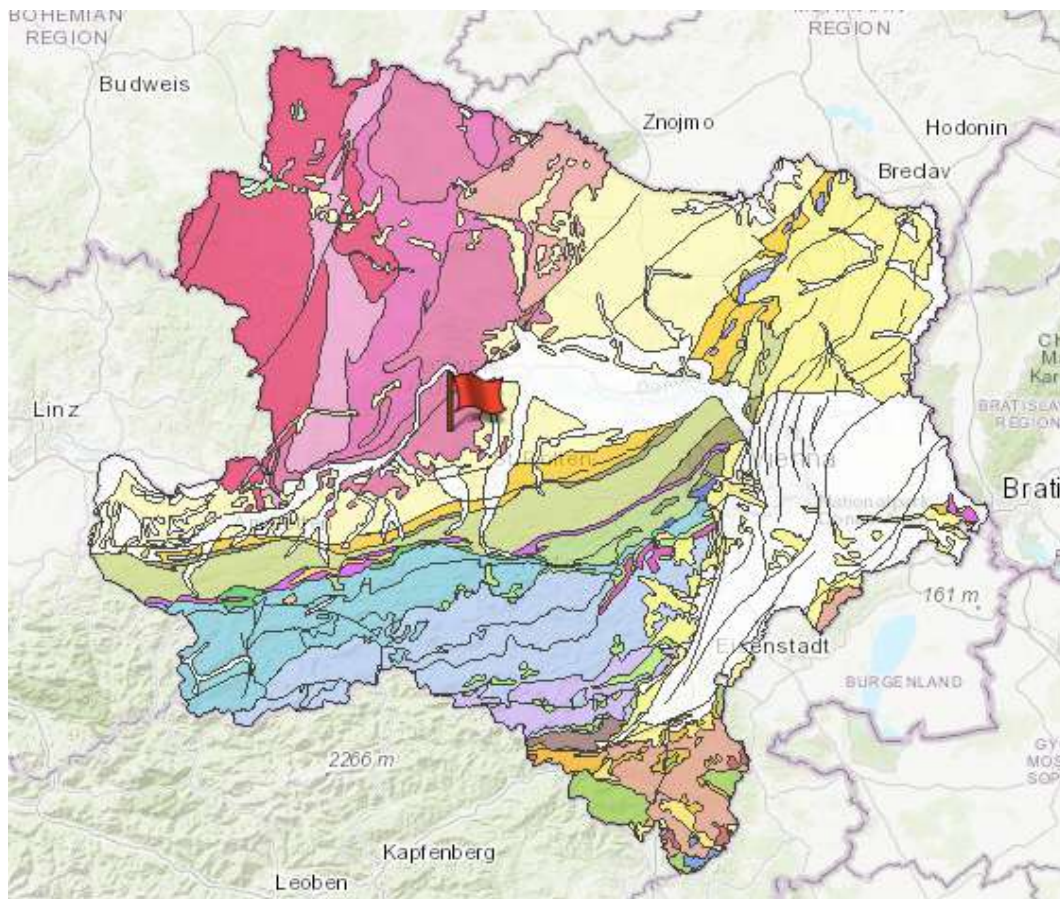


Abbildung 19: Geologische Karte von Niederösterreich, Markierung in Winzing, St. Pölten [72]

Der Ort Winzing befindet sich, wie man Abbildung 9 und Abbildung 19 entnehmen kann, im Gebiet der Böhmisches Masse. Die Böhmisches Masse besteht vor allem aus den kristallinen Gesteinen Granit und Gneis [73]. Man findet in diesem Gebiet daher unter anderem verwittertes Kristallin aber auch Kaolin und kaolinitische Tone [74].

Zur genaueren Bestimmung des Materials wurden an der TU Wien Röntgenfluoreszenzmessungen (XRF) und Röntgendiffraktometriemessungen (XRD) durchgeführt. Mithilfe von XRD lassen sich die Haupt- und Nebenphasen einer Probe identifizieren. Da sich mineralische Rohstoffe aus mehreren Mineralphasen zusammensetzen und man mit Hilfe von XRD nicht die anteilige Menge der einzelnen Phasen bestimmen kann, lassen sich jedoch nur qualitative Aussagen treffen. Vor allem bei Tonmineralen und ihrem oftmals schichtartigen Aufbau kann es außerdem dazu kommen, dass sich die einzelnen Minerale überlagern und eine genaue Bestimmung nicht möglich ist [75] [76]. Deshalb werden in der Regel zusätzliche Untersuchungen, wie zum Beispiel eine Röntgenfluoreszenzmessung oder eine Thermoanalyse vorgenommen [77].

Gemäß der Röntgendiffraktometriemessung ist im verwendeten Material Quarz die Hauptphase (siehe Tabelle 3). Mithilfe von XRF lässt sich zusätzlich die elementare Zusammensetzung des Materials bestimmen – in Tabelle 4 sind die zehn anteilmäßig größten Elemente dargestellt, die gemeinsam 99,7 Masseprozent ausmachen.

Tabelle 3: Qualitative Phasenzuordnung des Probematerials

Stöchiometrie	Mineralname
SiO_2	Quarz
Fe_3O_4	Magnetit
$(\text{K}, \text{Na}) (\text{Al}, \text{Si})_3\text{O}_{11}$	Mica
$\text{Na}(\text{Mn}_{2/3} \text{Na}_{1/3})\text{MnSi}_6\text{O}_{18}$	Na-Ringsilikat
$\text{NaTiSi}_2\text{O}_6$	Pyroxen

Tabelle 4: Die zehn anteilmäßig größten Elemente bezogen auf die Masse

Chemisches Element	Massenprozent	Chemisches Element	Massenprozent
O	47,370 %	Mg	1,274 %
Si	30,316 %	Ca	0,739 %
Al	11,390 %	Ti	0,616 %
Fe	4,231 %	S	0,311 %
K	3,160 %	Na	0,281 %

Eine vorhergehende Untersuchung des Institutes für Geotechnik der Technischen Universität Wien aus dem Jahre 2016 mittels XRD kommt ebenfalls zu dem Schluss, dass Quarz die Hauptphase des untersuchten Materials ist. Mit Hilfe einer ergänzenden simultanen Thermoanalyse wurden anschließend die Tonminerale bestimmt (siehe Tabelle 5). Dabei wurde, anders als bei den Untersuchungen mittels XRD und XRF, ausschließlich die Tonfraktion mit einer Korngröße unter 2 μm herangezogen.

Tabelle 5: Tonmineralogische Zusammensetzung der Tonfraktion <2 μm ; Angaben in Masse-%

IAG Lab. Nr.	Bezeichnung	Smektit	Vermikulit	Illit	Kaolinit	Chlorit
16321	S+L Berglehm „NW-LT“	31	20	12	37	nn

nn= nicht nachweisbar

Sieht man sich die REM-Aufnahmen (siehe Abbildung 20) in einem höheren Auflösungsschritt (50.000-fache Vergrößerung) an, erkennt man deutlich einen schichtartigen, blättrigen Aufbau [78]. Die Ergebnisse der Thermoanalyse und die Aufnahmen des Rasterelektronenmikroskopes stimmen somit anscheinend überein und bestätigen das Auftreten des, für die Aktivierung des Lehms wichtigen, Zweischicht-Tonminerals Kaolinit.

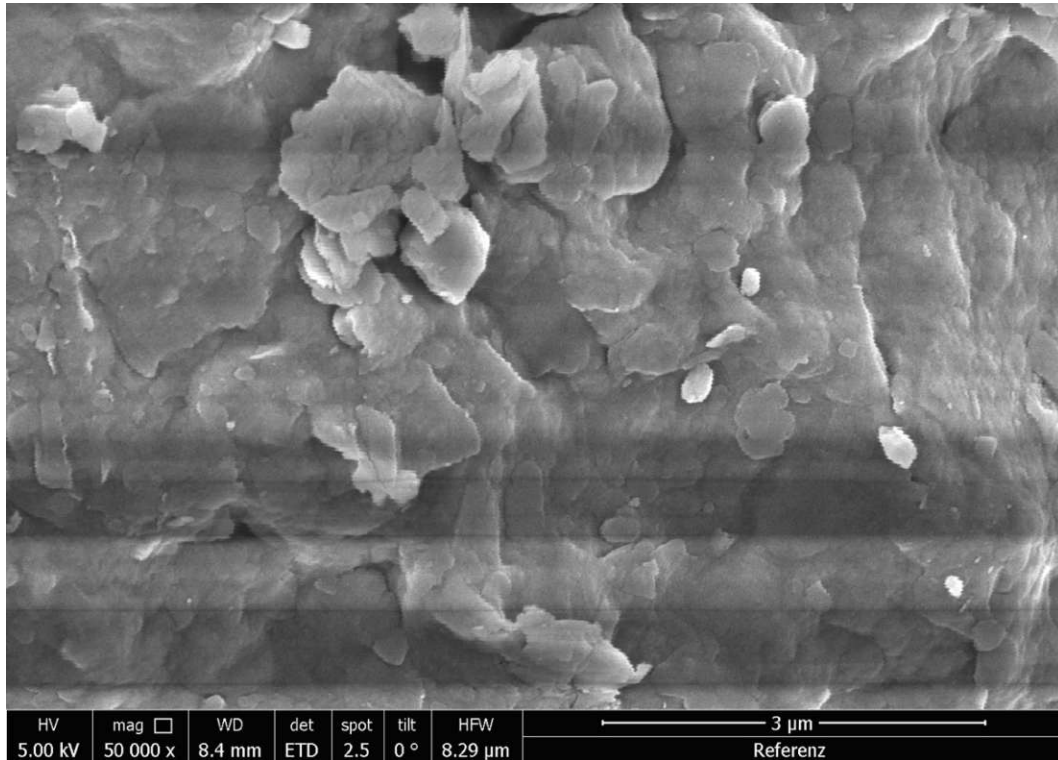


Abbildung 20: REM Aufnahme (50 k); Struktur der Feinanteile (<0,25 mm)

Zweischicht-Tonminerale haben im Durchschnitt eine Teilchengröße von 0,5 bis 4 µm. Im Vergleich zu Dreischicht-Tonmineralen deren mittlere Teilchengröße kleiner als 0,2 µm ist sind Zweischicht-Tonminerale daher relativ groß [78]. Abbildung 21 zeigt einen Vergleich eines Zweischicht-Tonminerals (Kaolinit) und eines Dreischicht-Tonminerals (Smektit).

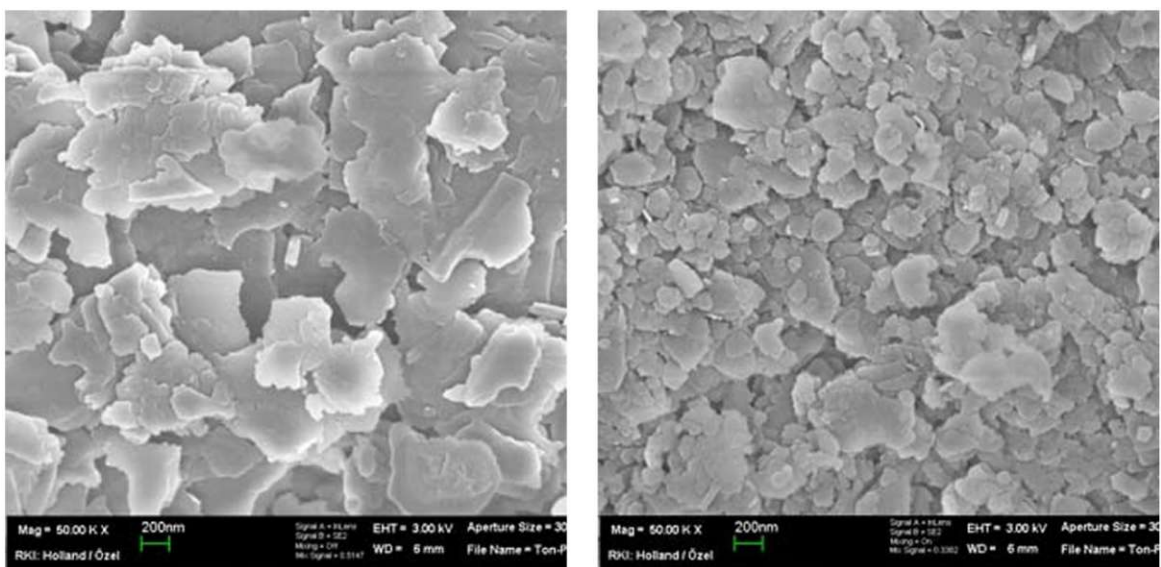


Abbildung 21: REM-Aufnahmen eines Zweischicht-Tonmineral (links) und eines Dreischicht-Tonmineral (rechts) [78]

4.1.1 Aufbereitung

Das gewonnene Rohmaterial aus der Lehmgrube wird vor der Anlieferung nicht aufbereitet und befindet sich je nach Lieferung in unterschiedlichen Zuständen. Meist kleben die einzelnen, feinen Kornfraktionen aneinander und bilden größere Brocken. Um das Material für die weiteren Versuche vorzubereiten, wird es daher zuerst mit einer mechanischen Brechanlage zerkleinert. Abbildung 22 zeigt das Material vor und nach dem Brechvorgang.



Abbildung 22: Rohmaterial vor und nach dem Brechvorgang

4.1.2 Korngrößenverteilung

Um einen groben Überblick über die im Material vorhandenen Korngrößen zu erhalten, wurde gemäß der Europäischen Norm EN 933-1 anhand einer Trockensiebung die Korngrößenverteilung bestimmt. Dafür wurde 2 kg Material in eine Vibrationssiebmaschine mit den Maschenweiten 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm, 0,125 mm und 0,063 mm eingefüllt und jeweils 10 Minuten gesiebt. Anschließend wurden die Rückstände auf den einzelnen Sieben gewogen. Da das Ausgangsmaterial sehr unterschiedlich sein kann, wurde dieser Versuch dreimal durchgeführt und aus den Siebrückständen auf den einzelnen Sieben wurde anschließend jeweils ein Mittelwert gebildet. Aus diesen gemittelten Siebrückständen lässt sich folgende Korngrößenverteilungslinie erstellen:

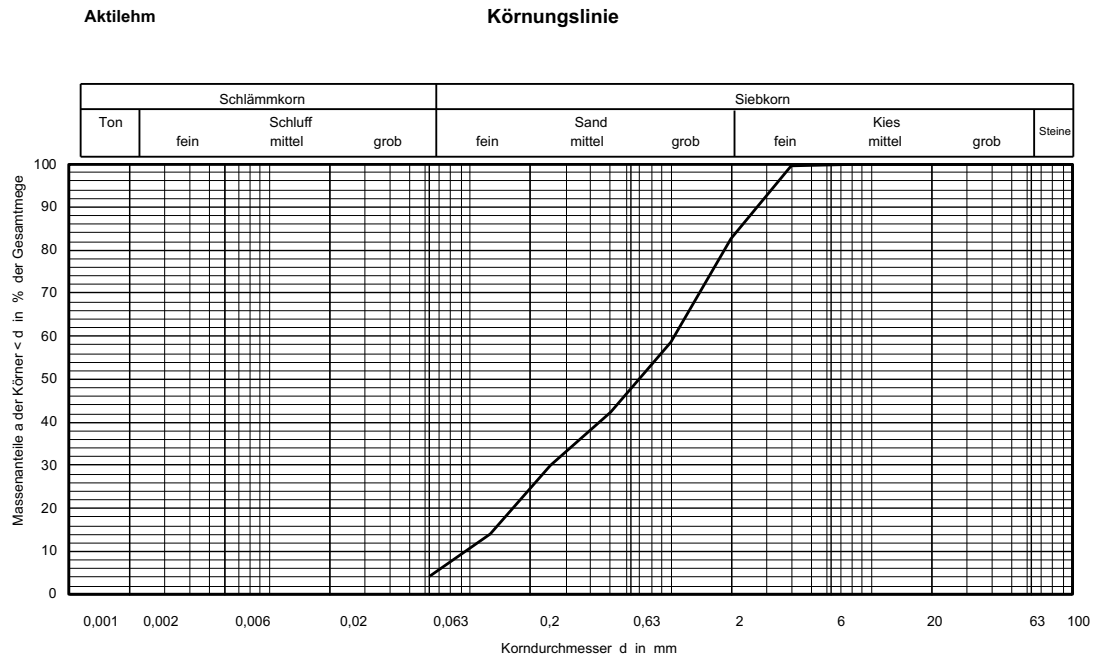


Abbildung 23: Korngrößenverteilungslinie

Anhand Abbildung 23 ist ersichtlich, dass das Material eine „gut gestufte“ oder „mäßig steil“ verlaufende Korngrößenverteilung hat [24]. Rund 80% der vorhandenen Gesteinskörnung ist der Fraktion Sand zuzuordnen und nur 4% den Fraktionen Schluff beziehungsweise Ton.

An dieser Stelle ist anzumerken, dass es prinzipiell möglich ist, dass die vorhandenen Schluff- und Tonanteile im Material an den größeren Gesteinen haften und damit das Ergebnis verfälschen. Normalerweise zieht man deshalb eine Nasssiebung vor, bei der die Feianteile vor der Siebanalyse aus dem Material gewaschen werden. Anschließend kann man mit einer Schlämmanalyse die Korngrößenverteilung der Feianteile bestimmen. Für die vorliegende Diplomarbeit war ein grober Überblick über die Korngrößenverteilung jedoch ausreichend, weshalb davon abgesehen wurde.

4.1.3 Mechanische Aktivierung

Zur mechanischen Aktivierung wurde das Material zuerst gebrochen und anschließend, wie in Abschnitt 4.1.2 beschrieben, gesiebt. Der Anteil des Rohmaterials mit einer Korngröße unter 0,25 mm wurde dann mit einer Scheibenschwingmühle gemahlen (siehe Abschnitt 4.1.4)

Eine solche Mühle besteht in der Regel aus einem Mahlstein und einem Mahlring, welche in ein Mahlgefäß eingesetzt werden. (Abbildung 24, rechts). Das Mahlgefäß

wird in eine horizontale Kreisschwingung versetzt, wodurch das Mahlgut durch Druck, Stoß und Reibung zerkleinert wird [79] [80].

In der bei diesem Projekt verwendeten Scheibenschwingmühle konnten pro Durchgang etwa 25 Gramm gemahlen werden. Während des Mahlvorganges wurde mit Hilfe einer Wärmebildkamera eine Temperatur von etwa 53°C gemessen (Abbildung 24, links). Die entstehende Wärme während des Mahlvorganges hat keinen Einfluss auf die Struktur des Materials. Eine Veränderung oder Zersetzung der Materialstruktur setzt bei dem Zweischicht-Tonmineral Kaolinit erst bei einer Temperatur über 500°C ein (siehe Abschnitt 3.1.). Diesen Vorgang nennt man Kalzinierung.

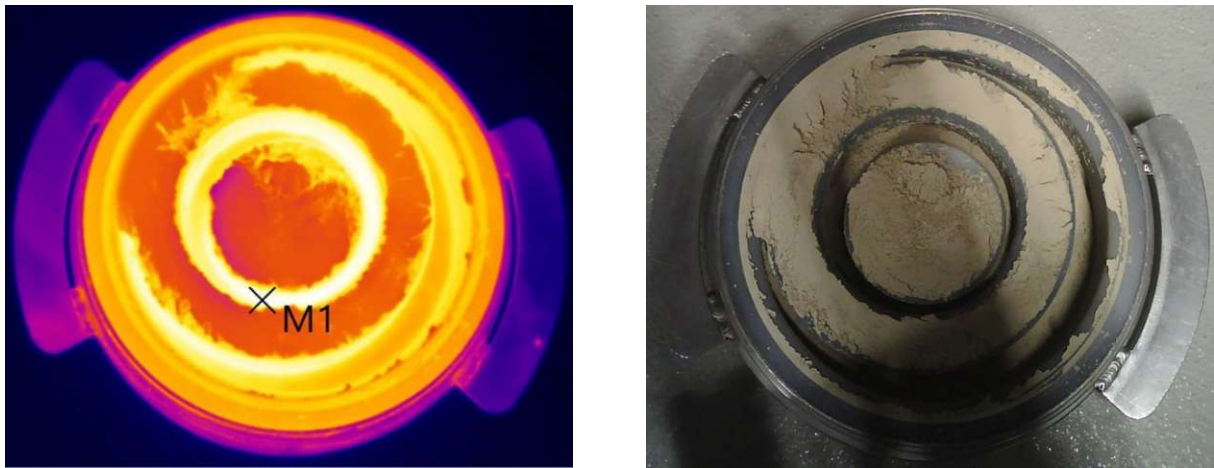


Abbildung 24: Scheibenschwingmühle, Wärmebild (links) und nach dem Mahlen (rechts)

Im Zuge dieser Diplomarbeit wurde das Material, um eine mechanische Aktivierung zu erreichen, entweder 30 oder 60 Minuten in der Scheibenschwingmühle gemahlen. Anschließend wurden aus dem aktivierten Material Probekörper hergestellt und deren mechanische Festigkeiten sowie das Schwindverhalten mit denen von nicht aktivierten Probekörpern verglichen

4.1.4 Scheibenschwingmühle

Zum Mahlen wurde im Zuge dieser Diplomarbeit eine Scheibenschwingmühle des Modelles „pulverisette 9“ Typ I der Firma Fritsch verwendet. Das Modell arbeitet dabei nach dem Schwingmahlprinzip, die Mahlgarnitur wird dabei auf einen schwingungsfähigen Aufbau aufgespannt und der Mahlstein und der Mahlring werden innerhalb dieser Garnitur mithilfe von Zentrifugalkräften beschleunigt. Dadurch wird das Mahlgut durch Schlag und Reibung zerkleinert [81]. Die Mahlgarnitur der Scheibenschwingmühle besteht aus Achat, ein Mineral, das zu der Obergruppe der

Quarze zählt und das eine Mohshärte von ungefähr 7 hat [82]. Die Mühle arbeitet beim Mahlen mit einer Drehzahl von 700 Umdrehungen pro Minute.

4.2 Vorversuche

Im Zuge der Probenherstellung wurden einige Vorversuche durchgeführt, wobei sowohl die Probekörpergröße, die Art der Materialeinbringung in die Prüfform sowie die zugegebene Wassermenge variiert wurden.

4.2.1 Silikon-Prismen

Für die Biegezug-Prüfung wurden viereckige Prismen mithilfe von Silikonformen (siehe Abbildung 25) hergestellt. Durch die Verwendung von Silikonformen wurde getestet ob bei der Herstellung der Probekörper ein Verzicht auf Schalöl oder ähnliches möglich ist.

Dem Rohmaterial wurde 50 bis 60 Ma% Wasser bezogen auf das Ausgangsgewicht hinzugefügt, anschließend wurde es mit Hilfe eines Labor-Rührers vermischt, bis eine homogene Masse entstanden ist. Die Masse wurde händisch mit einer Spachtel in die Formen gedrückt, ein Verpressen der Masse mit einer mechanischen Einrichtung war aufgrund der Nachgiebigkeit der Formen und der niedrigen Viskosität des Materials nicht möglich.

Durch die niedrige Viskosität war es außerdem nicht möglich, die Probekörper sofort auszuschalen, sie wurden daher zum Teil im Klimaschrank, zum Teil bei Innenraumlufte gelagert und konnten erst nach einigen Tagen ausgeschalt werden. Durch den hohen Wassergehalt war außerdem das Schwindverhalten stärker ausgeprägt.



Abbildung 25: Herstellung von prismenförmigen Probekörpern mit Silikonformen

4.2.2 Silikon-Würfel

Analog zu den prismenförmigen Probekörpern wurden für die Druckfestigkeitsprüfung würfelförmige Probekörper mit Silikonformen hergestellt (siehe Abbildung 26).

Dem Rohmaterial wurde 70 bis 85 Ma% Wasser, bezogen auf das Ausgangsgewicht, hinzugefügt. Anschließend wurde es mit Hilfe eines Labor-Rührers vermischt, bis eine homogene Masse entstanden ist. Die Masse wurde händisch mit einer Spachtel in die Formen gedrückt.



Abbildung 26: Herstellung von würfelförmigen Probekörpern mit Silikonformen

Auch bei diesem Vorversuch konnten die Probekörper erst nach einigen Tagen ausgeschalt werden. Bis zur vollständigen Trocknung wurde ein Teil im Klimaschrank und ein Teil bei Innenraumluft gelagert.

4.2.3 Stahl-Prismen

Da mit den Silikon-Formen keine gleichmäßige Probenherstellung möglich war, wurden anschließend, angelehnt an die europäische Norm EN 1015-11 (Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk), Probekörper in prismenförmigen Stahlformen (siehe Abbildung 27) mit den Abmessungen 16 x 4 x 4 cm hergestellt.



Abbildung 27: Herstellung von prismenförmigen Probekörpern in Stahlformen

Dazu wurden dem Grundmaterial unterschiedliche Mengen an Wasser, zwischen 10 und 20% bezogen auf das Ausgangsgewicht, beigefügt. Bei den vorangegangenen Vorversuchen hat sich eine höhere Wasserzugabe hinsichtlich der Verarbeitung als nicht ideal erwiesen. Feucht angerührte Probekörper lassen sich zwar leichter in die Formen füllen, eine optimale Verdichtung ist jedoch durch den Verzicht des Verpressens nicht gegeben (siehe Abschnitt 4.2.1). Mit steigender Wasserzugabe ist das Schwindverhalten beim Trocknen der Probekörper ausgeprägter und die Zunahme von festigkeitsmindernden Schwindrissen wahrscheinlich. Durch die Zugabe von 10 bis 20% Wasser ist es außerdem möglich die Probekörper sofort auszuschalen.

Anschließend wurde die Masse mit Hilfe eines Rührstabes (Abbildung 28) vermischt und händisch in die zuvor mit Schalöl benetzten Stahlformen eingebracht. Dabei wurden die Formen zuerst bis zur Oberkante mit dem Material gefüllt, danach wurde das Material mit einer hydraulischen Pressvorrichtung gepresst, anschließend wurde erneut Material bis zur Oberkante der Form eingebracht und erneut mit dem

gleichen Druck gepresst. Der Druck, der zum Pressen der Prüfkörper angewendet wird, hängt dabei vom verwendeten Wassergehalt ab. Prüfkörper, die mit einem geringeren Wassergehalt hergestellt werden, lassen sich mit einem höheren Druck verdichten, ohne dass das Material aus der Form austritt.

Die auf diese Weise hergestellten Probekörper wurden anschließend noch im feuchten Zustand ausgeschalt und bis zur Prüfung auf einem Gitter im Klimaschrank bei 23°C und 50% Luftfeuchtigkeit bis zur Massekonstanz getrocknet.

4.3 Fazit und Festlegung der Probekörperherstellung

Bei der Herstellung der Probekörper mit Hilfe von Silikonformen hat sich gezeigt, dass nur schwer konstante Probekörper hergestellt werden können. Aufgrund des hohen Wassergehaltes des Materials einerseits und der Nachgiebigkeit der Silikonformen andererseits war ein Verpressen nicht möglich. Durch den hohen Wassergehalt kam es zusätzlich zu einem starken Schwinden der Proben und damit einhergehend zu stärkerer Rissbildung.

Eine Möglichkeit zur Verdichtung wäre der Einbau in mehreren Lagen mit anschließendem, händischem Stampfen der einzelnen Lagen, ähnlich wie es auch bei Stampflehm gemacht wird. Diese Möglichkeit wurde hier nicht in Betracht gezogen, da die Verdichtungsenergie von der individuellen Kraft der Person abhängt, welche die Probekörper herstellt. Auf diese Art hergestellte Probekörper wären also nicht eindeutig reproduzierbar gewesen.

Deshalb wurde für die Herstellung der Probekörper das Einbringen in Stahlformen mit anschließendem Pressen mit Hilfe einer hydraulischen Pressvorrichtung, wie in Abschnitt 4.2.3 beschrieben, gewählt. Bei dieser Art der Probeherstellung war es durch die höhere eingesetzte Verdichtungsenergie möglich, trotz einer geringeren Wasserzugabe und der daraus resultierenden bröckeligen Konsistenz kompakte Probekörper herzustellen.

4.4 Probekörper

Nachdem das Material gebrochen, gesiebt und jener Anteil mit einer Korngröße kleiner 0,25 mm gemahlen und damit mechanisch aktiviert wurde, wurden zwei verschiedene Arten von Probekörpern hergestellt:

- Probekörper aus Material, das der gemittelten Grundzusammensetzung gemäß Korngrößenverteilungslinie (Abschnitt 4.1.2) entspricht, bei dem die Anteile unter 0,25 mm durch Mahlen aktiviert wurden
- Probekörper, welche ausschließlich aus jenen durch Mahlen aktivierten Material-Anteilen mit einer Korngröße unter 0,25 mm bestehen

Um eine Referenz zu erhalten, wurden diese beiden Arten von Probekörpern ebenso mit Material hergestellt, welches nicht durch Mahlen aktiviert wurde und somit einer Mahldauer von null Minuten entspricht.

Durch diese zwei Arten von Probekörpern soll der Einfluss der Aktivierung auf die Festigkeiten der Lehmbaustoffe bestimmt werden. Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und dem großen Aufwand, der für die Aktivierung der Feinanteile des Lehmestoffes notwendig ist, ist es außerdem wichtig zu wissen, ob die Aktivierung von kleinen Anteilen des Materials ausreichend ist oder ob ein funktionstüchtiger Lehmbaustoff nur durch Aktivierung des gesamten Materials erreicht werden kann.

4.4.1 Anzahl der Probekörper

Da für den Lehmestoffbau und die Herstellung von Lehmestoffen noch kaum europäische Normen verfügbar sind, orientiert sich die Probekörper Herstellung und deren anschließende Prüfung an der europäischen Norm EN 1015-11 (Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk). Um die Probekörper einer Biegezug- beziehungsweise Druckfestigkeitsprüfung zu unterziehen und später auswerten zu können, ist eine Mindestanzahl von drei Probekörpern mit denselben Mischungsverhältnissen vorgegeben.

Da der ideale Wassergehalt in Abhängigkeit von der Mahldauer nicht bekannt ist, wurden die Probekörper mit unterschiedlichen Zugaben von Wasser hergestellt. Konkret wurde dem Material entweder 10, 15 und 20 Ma% Wasser hinzugefügt. Das Ausgangsmaterial wurde im Vorfeld wie in den Abschnitten 4.1.1 und 4.1.2 beschrieben aufbereitet und bei Innenraumluft gelagert.

Somit ergeben sich aus zwei Arten von Probekörpern, drei unterschiedlichen Mahldauern (0 Minuten, 30 Minuten, 60 Minuten), drei verschiedenen Wassergehalten und drei Probekörpern pro Serie mindestens 54 Probekörper.

4.4.2 Probekörper entsprechend der ursprünglichen Zusammensetzung

Wie in Abschnitt 4.4 erläutert, wurde das Material gebrochen und anschließend gesiebt, um die einzelnen Kornfraktionen voneinander zu trennen. Anhand der Korngrößenverteilung (Abschnitt 4.1.2) ist es anschließend möglich, eine einheitliche Zusammensetzung des Materials zu bilden, die einer gemittelten Zusammensetzung des ursprünglichen Zustandes entspricht.

Um den Einfluss der Aktivierung zu untersuchen, wurden die Anteile des Materials, mit einer Korngröße unter 0,25 mm zuvor für 30 beziehungsweise 60 Minuten mit der Scheibenschwingmühle (Abschnitte 4.1.3 und 4.1.4) gemahlen.

Für die Herstellung der Probekörper wurde jeweils ein Kilogramm des Materials mithilfe der gemittelten Korngrößenverteilungslinie nachgebildet und anschließend mit 10, 15 beziehungsweise 20% Wasserzugabe angerührt. Dafür wurde, wie in den Vorversuchen, ein Rührstab (Abbildung 28) verwendet. Anschließend wurden, um eine bessere Durchmischung zu erreichen, händisch mit einer handelsüblichen Maurerkelle allfällige noch trockene Bestandteile unter die Masse gemischt.

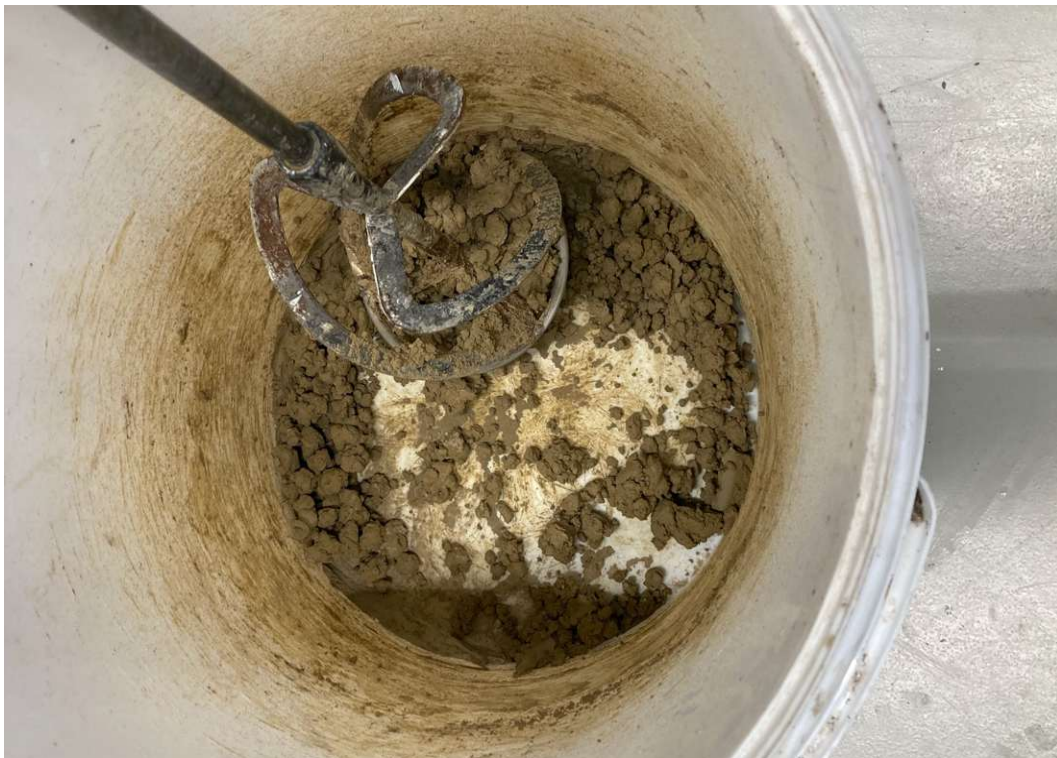


Abbildung 28: Herstellung der Lehm-Wasser-Mischung mithilfe eines Rührstabes

Danach wurden die zuvor mit Schalöl benetzten Stahlformen bis zur Oberkante mit dem Material gefüllt und dieses mit Hilfe einer hydraulischen Presse wie in Abschnitt 4.2.3 beschrieben, verpresst. Der angewandte Pressdruck war dabei vom

Wassergehalt der Lehm-Mischung abhängig, wobei weniger feucht angerührter Lehm mit einem höheren Druck verpressbar war als feuchter angerührter Lehm:

- Probekörper mit 10% Wasserzugabe wurden mit einem Druck von 150 bar gepresst
- Probekörper mit 15% Wasserzugabe wurden mit einem Druck von 100 bar gepresst
- Probekörper mit 20% Wasserzugabe wurden mit einem Druck von 50 bar gepresst

Die unterschiedlichen möglichen Druckeinwirkungen ergeben sich dabei vor allem aus der Tatsache, dass die feuchter angerührten Lehm-Mischungen bei höher aufgebrauchten Druckeinwirkungen aus der Stahlform ausgepresst wurden. Im Zuge der Probenherstellung wurde stets versucht die Probe mit dem größtmöglichen Druck, der während der Probenherstellung anhand von Beobachtungen festgelegt wurde, zu verpressen.

Durch diese Unterschiede in der Verdichtung sind die Probekörper schlechter vergleichbar. Ein Ziel der vorliegenden Arbeit ist es jedoch, die Probekörper auch hinsichtlich des optimalen Wassergehaltes zu untersuchen, weshalb stets versucht wurde, die Festigkeitseigenschaften der Probekörper für die jeweilige Materialkombination zu maximieren.

Gemäß EN 1015-11 müssen die Probekörper die Maße 160 x 40 x 40 mm haben. Um die volle Höhe der Stahlprismen zu nutzen, wurde nach dem ersten Pressvorgang erneut Material bis zur Oberkante in die Formen eingebracht und Druck aufgebracht.

Die Probekörper wurden noch im feuchten Zustand ausgeschalt und ihre Abmessungen notiert, danach wurden sie auf einem Gitter im Klimaschrank bei 23°C und 50% Luftfeuchtigkeit bis zur Massekonstanz getrocknet. Abbildung 29 zeigt die Referenz-Probekörper mit 10 beziehungsweise 20% Wasserzugabe und Abbildung 30 zeigt die Probekörper mit 30 Minuten aktivierten Material und 10 beziehungsweise 15% Wasserzugabe nach dem Ausschalen.



Abbildung 29: Referenz-Probekörper mit 10% (links) und 20% Wasserzugabe (rechts)



Abbildung 30: Probekörper (30 Minuten aktiviert) mit 10% (links) und 15% Wasserzugabe

4.4.2.1 Übersicht der Probekörper

Serie	Buchstabe	Material	Mahldauer in Minuten	Wasserzugabe in %	Anmerkung Probekörper Herstellung
5	A	Material entsprechend der ursprünglichen Zusammensetzung	0	10	Erste Lage mit 150 bar, zweite Lage mit 190 bar verpresst
	B				
	C				
6	A	Material entsprechend der ursprünglichen Zusammensetzung	0	15	Erste und zweite Lage mit 100 bar verpresst
	B				
	C				
7	A	Material entsprechend der ursprünglichen Zusammensetzung	0	20	Erste und zweite Lage mit 50 bar verpresst
	B				
	C				
11	A	Material entsprechend der ursprünglichen Zusammensetzung	30	10	Erste Lage mit 150 bar, zweite Lage mit 190 bar verpresst
	B				
	C				
12	A	Material entsprechend der ursprünglichen Zusammensetzung	30	15	Erste und zweite Lage mit 100 bar verpresst
	B				
	C				
13	A	Material entsprechend der ursprünglichen Zusammensetzung	30	20	Erste und zweite Lage mit 50 bar verpresst
	B				
	C				
8	A	Material entsprechend der ursprünglichen Zusammensetzung	60	10	Erste Lage mit 150 bar, zweite Lage mit 190 bar verpresst
	B				
	C				
9	A	Material entsprechend der ursprünglichen Zusammensetzung	60	15	Erste und zweite Lage mit 100 bar verpresst
	B				
	C				
10	A	Material entsprechend der ursprünglichen Zusammensetzung	60	20	Erste und zweite Lage mit 50 bar verpresst
	B				
	C				

Tabelle 6: Probekörper mit ursprünglicher Materialzusammensetzung

4.4.2.2 Erkenntnisse aus der ersten Probekörper-Herstellung

Durch den hohen Druck, der zum Verpressen aufgebracht wurde, ließen sich auch die weniger feucht angerührten Lehm-Mischungen mit lediglich 10% Wasserzugabe zu kompakten Probekörpern verarbeiten (siehe Abbildung 31). Nach dem Trocknen im Klimaschrank war zu erkennen, dass der geringe Wassergehalt auch dazu führt, dass die Probekörper kaum schwinden und somit nur wenige Schwindrisse erkennbar sind.



Abbildung 31: Probekörper mit 10% Wassergehalt aus nicht aktiviertem (links) bzw. aktiviertem (60 Minuten gemahlen, rechts) Material nach dem Trocknen.

Bei den Probekörpern, die mit 15% beziehungsweise 20% Wasserzugabe hergestellt wurden, hat sich der zweilagige Einbau des Materials als nicht ideal erwiesen. Bei einem Großteil der Probekörper hat sich an der Stelle der zweiten Lage ein durchgängiger Riss gebildet und in manchen Fällen löste sich die zweite Lage komplett von der ersten Lage ab (siehe Abbildung 32).

Generell ist mit steigendem Wassergehalt auch eine steigende Rissbildung an den Oberflächen der Probekörper erkennbar.



Abbildung 32: Probekörper mit 15% Wassergehalt aus nicht aktiviertem Material nach dem Trocknen

4.4.3 Probekörper aus den Materialanteilen mit einer Korngröße unter 0,25 mm

Bei der Herstellung der Probekörper wurden nur jene Materialanteile mit einer Korngröße unter 0,25 mm herangezogen. Die Herstellung der Probekörper erfolgte wie in Abschnitt 4.4.2 beschrieben. Auch hier wurde der angewandte Pressdruck anhand von Beobachtungen während der Probenherstellung festgelegt; bei der Herstellung der Probekörper (siehe Abbildung 33) mit einer Wasserzugabe von 10% wurde daher ein Druck von 200 bar angewandt. Die Probekörper mit 15 beziehungsweise 20% Wasserzugabe wurden analog wie im vorherigen Abschnitt beschrieben verpresst (siehe Tabelle 7).

An dieser Stelle ist anzumerken, dass die Probekörper der Serie 19 (vgl. Tabelle 7) fälschlicherweise mit 110 bar statt 50 bar verpresst wurden. Bei der zuvor erfolgten Erstellung der Probekörper mit der ursprünglichen Korngrößenverteilung (Abschnitt 4.4.2) war ein höherer Pressdruck als 50 bar bei einer Wasserzugabe von 20% zum Teil nicht möglich, da das Material während dem Pressvorgang aus der Form gedrückt wurde. Aus diesem Grund wurden bei der Erstellung der Probekörper aus den Feianteilen (Korngröße unter 0,25 mm) prinzipiell ähnliche Pressdrücke wie bei den Probekörpern aus Abschnitt 4.4.2 angewandt. Anhand dieses Fehlers beim Verpressen der Serie 19 ist jedoch ersichtlich, dass weitaus größere Pressdrücke denkbar gewesen wären. Die Probekörper sind jedoch nur schwer vergleichbar mit

den Referenzprobekörpern der Serie 16 und den Probekörpern der Serie 13 aus dem vorherigen Abschnitt.

Nachdem der Einbau des Materials in zwei Lagen bei den Probekörpern aus Abschnitt 4.4.2 teilweise dazu führte, dass sich die zweite Lage löste, wurde bei der Herstellung der Probekörper aus dem Material mit einer Korngröße unter 0,25 mm auf den zweilagigen Einbau verzichtet.

Die Probekörper wurden sofort, noch im feuchten Zustand, ausgeschalt und nachdem die Abmessungen notiert wurden, wurden sie auf einem Gitter im Klimaschrank bei 23°C und 50% Luftfeuchtigkeit bis zur Massekonstanz getrocknet.



Abbildung 33: Probekörper (30 Minuten aktiviert) mit 10% Wasserzugabe vor und nach dem Verpressen mit 200 bar

4.4.3.1 Übersicht der Probekörper

Serie	Buchstabe	Material	Mahldauer in Minuten	Wasserzugabe in %	Anmerkung Probekörper Herstellung
14	A	Nur jene Materialanteile mit einer Korngröße kleiner 0,25 mm	0	10	Einlagig eingebracht und mit 200 bar verpresst
	B				
	C				
15	A	Nur jene Materialanteile mit einer Korngröße kleiner 0,25 mm	0	15	Einlagig eingebracht und mit 100 bar verpresst
	B				
	C				
16	A	Nur jene Materialanteile mit einer Korngröße kleiner 0,25 mm	0	20	Einlagig eingebracht und mit 50 bar verpresst
	B				
	C				
17	A	Nur jene Materialanteile mit einer Korngröße kleiner 0,25 mm	30	10	Einlagig eingebracht und mit 200 bar verpresst
	B				
	C				
18	A	Nur jene Materialanteile mit einer Korngröße kleiner 0,25 mm	30	15	Einlagig eingebracht und mit 100 bar verpresst
	B				
	C				
19	A	Nur jene Materialanteile mit einer Korngröße kleiner 0,25 mm	30	20	Einlagig eingebracht und mit 110 bar verpresst
	B				
	C				
20	A	Nur jene Materialanteile mit einer Korngröße kleiner 0,25 mm	60	10	Einlagig eingebracht und mit 200 bar verpresst
	B				
	C				
21	A	Nur jene Materialanteile mit einer Korngröße kleiner 0,25 mm	60	15	Einlagig eingebracht und mit 100 bar verpresst
	B				
	C				
	D				
22	A	Nur jene Materialanteile mit einer Korngröße kleiner 0,25 mm	60	20	Einlagig eingebracht und mit 50 bar verpresst
	B				
	C				
	D				

Tabelle 7: Probekörper aus den Materialanteilen mit Korngröße < 0,25 mm

4.4.4 Probekörper mit Bewehrung

Um den Einfluss der mechanischen Aktivierung zu überprüfen und die Ergebnisse der Festigkeitsprüfung in Kontext setzen zu können, wurden auch einige Probekörper mit Bewehrung hergestellt. Das Material wurde dabei im Vorfeld wie in Abschnitt 4.1.1 aufbereitet, aber nicht durch Mahlen mechanisch aktiviert. Danach wurden Probekörper mit der ursprünglichen Korngrößenverteilung und zwei verschiedenen Arten von Bewehrung hergestellt:

- 1 Masse-% Holzfasern, die während des Mischvorganges dem Material beigegeben wurden
- Jutegewebe, das auf die Ober- und Unterseite des Materials aufgebracht wurde.

Eine Schicht Jutegewebe wurde dabei unten in die Stahlformen eingelegt, das lose Lehmmaterial eingebracht und die zweite Schicht Jutegewebe oben aufgelegt. Danach wurden die Probekörper verpresst. Diese Herangehensweise wurde gewählt, um garantieren zu können, dass das Gewebe sich immer an der gleichen Stelle im Prüfkörper befindet (siehe Abbildung 35).

Eine Übersicht der hergestellten Probekörper mit Bewehrung ist in der nachfolgenden Tabelle 8 ersichtlich.

Tabelle 8: Ergänzende Probekörper mit Bewehrung

Serie	Buchstabe	Material	Wasserzugabe in %	Anmerkung Probekörper Herstellung	Bewehrung
23	A	Ursprüngliche Korngrößenverteilung	10	Einlagig, mit 200 bar verpresst	Holzfasern
	B				
	C				
24	A	Ursprüngliche Korngrößenverteilung	15	Einlagig, mit 100 bar verpresst	Holzfasern
	B				
	C				
25	A	Ursprüngliche Korngrößenverteilung	20	Einlagig, mit 50 bar verpresst	Holzfasern
	B				
	C				
26	A	Ursprüngliche Korngrößenverteilung	10	Einlagig, mit 200 bar verpresst	Jutegewebe
	B				
	C				
27	A	Ursprüngliche Korngrößenverteilung	15	Einlagig, mit 100 bar verpresst	Jutegewebe
	B				
	C				
28	A	Ursprüngliche Korngrößenverteilung	20	Einlagig, einlagig mit 50 bar verpresst	Jutegewebe
	B				
	C				

4.5 Normative Grundlagen

Im folgenden Abschnitt werden die normativen Grundlagen für die Prüfung der Probekörper auf ihre Biegezug- und Druckfestigkeit erläutert.

4.5.1 Biegezugfestigkeit

Wie in den Abschnitten 4.2 und 4.4 erläutert, orientiert sich die Herstellung und Prüfung der Probekörper an der DIN 1015-11. Dazu müssen mindestens drei Probekörper zur Verfügung stehen. Die Biegezugfestigkeit wird dabei mit einem Drei-Punkt-Biegeversuch bestimmt: der Probekörper liegt auf zwei Auflagern und wird mittig mit einem Prüfstempel belastet.

Die Höchstlast, die zum Bruch der Probe führt, wird aufgezeichnet und mithilfe der folgenden Formel die Biegezugfestigkeit bestimmt:

$$f = 1,5 \cdot \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2} \quad (4.1)$$

mit

- f Biegezugfestigkeit, in Newton pro Quadratmillimeter
- F die auf den Prüfkörper aufgebrachte Höchstlast, in Newton
- l Abstand zwischen den Achsen der Auflagerrollen, in Millimeter
- b die Breite des Prüfkörpers, in Millimeter
- d die Höhe des Prüfkörpers, in Millimeter

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle angemerkt, dass die aktuell gültige Norm für Lehmbauplatten DIN 18948 für die Biegezugfestigkeit einen Mindestwert von 0,8 N/mm² fordert. Die Prüfung soll dabei nach DIN EN 310 – *Holzwerkstoffe, Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit* erfolgen. DIN EN 310 sieht wie DIN 1015-11 im wesentlichen einen Drei-Punkt-Biegeversuch vor, jedoch unterscheiden sich die Maße der Probekörper und Prüfeinrichtung. Da die Prüfkörper angelehnt an DIN 1015-11 erstellt wurden, wurde auch die Prüfung an diese Norm angelehnt.

4.5.2 Druckfestigkeit

Gemäß DIN 1015-11 werden die drei Probekörper für die Druckprüfung in zwei Hälften gebrochen, um sechs halbe Probekörper zur Verfügung zu haben. Die im Zuge des Drei-Punkt-Biegeversuches entstandenen Probekörper-Hälften wurden daher im Anschluss direkt für den Lastplattendruckversuch herangezogen. Die Höchstlast wird aufgezeichnet und mithilfe der folgenden Formel wird die Druckfestigkeit bestimmt:

$$\sigma = \frac{F}{b \cdot l} \quad (4.2)$$

mit

- σ Druckfestigkeit, in Newton pro Quadratmillimeter
- F die auf den Prüfkörper aufgebraachte Höchstlast, in Newton
- b Breite der Lasteintragungsplatte, in Millimeter
- l Länge der Lasteintragungsplatte, in Millimeter

In der Mechanik ist die Druckfestigkeit als Normal-Spannung, als Kraft pro gedachte Schnittfläche definiert. Nach DIN 1015-11 wird die Kraft auf die Fläche der Lasteintragungsplatten bezogen, die 40 mm lang und 40 mm breit ist.

Wie in Abschnitt 4.4 beschrieben, wurden die Probekörper mit einem Pressdruck von bis zu 200 bar verpresst, wodurch die volle Höhe der Stahlprismen nicht ausgenutzt wurde. Zusätzlich kommt es durch das Schwinden im Zuge der Trocknung zu weiteren Querschnittsverkürzungen. Um diesen Umstand zu berücksichtigen, wurde in Formel 4.2 nicht die Breite der Lasteintragungsplatte mit 40 mm angesetzt, sondern die tatsächliche Breite des jeweiligen Prüfkörpers.

In der aktuell gültigen DIN 18948 werden keine Mindestwerte für die Druckfestigkeit von Lehmplatten angegeben, die aktuell gültige Norm für Lehmputzmörtel fordert mindestens 1,0 beziehungsweise 1,5 N/mm² je nach Festigkeitsklasse. Nach DIN 18946 – Lehmmauermörtel muss die Druckfestigkeit von Lehmmauermörtel für tragendes Mauerwerk je nach Festigkeitsklasse mindestens 2-4 N/mm² erreichen. Lehmsteine nach DIN 18945 müssen, sofern sie tragend eingesetzt werden, mindestens eine Druckfestigkeit von 3,8 N/mm² im Mittel vorweisen.

4.6 Festigkeitsprüfung der Probekörper

Nachdem die Probekörper im Klimaschrank getrocknet wurden und Massekonstanz erreicht hatten, wurden sie mit Hilfe einer Universalprüfmaschine der Firma Zwick/Roell auf ihre Druck- und Biegezugfestigkeit (siehe Abbildung 34 und Abbildung 35) geprüft. Anhand der drei Probekörper pro Serie wird ein arithmetischer Mittelwert gebildet, welcher für die weiteren Vergleiche herangezogen wird.

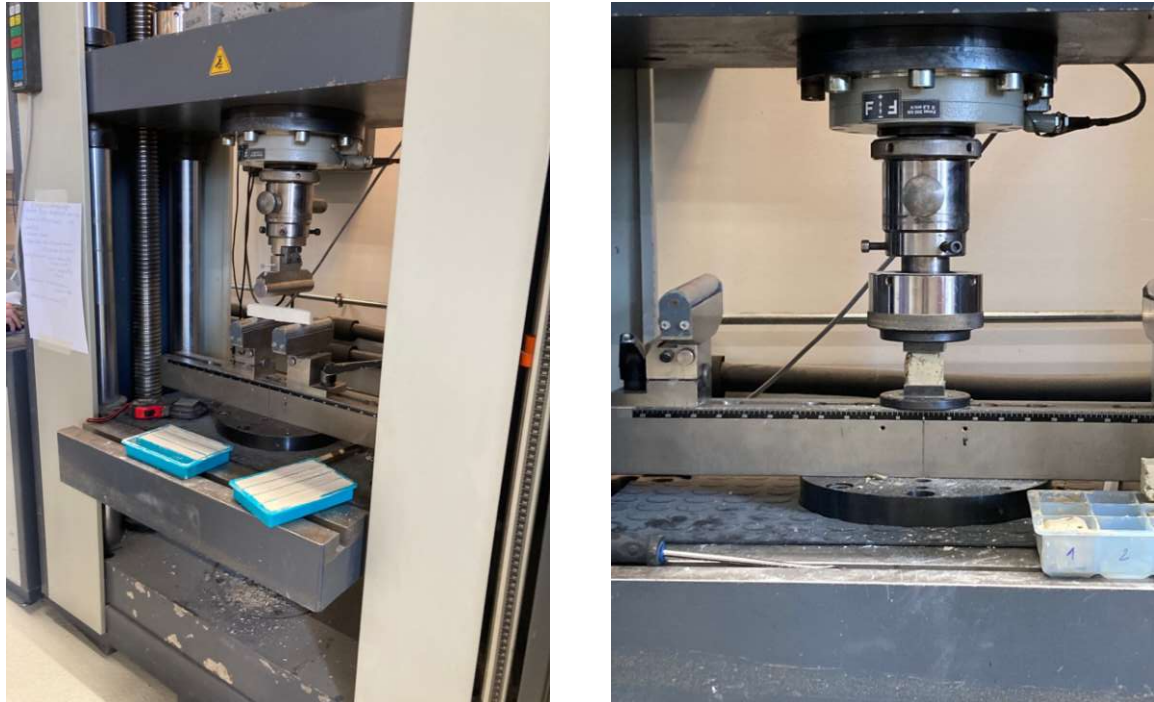


Abbildung 34: Biegezug- und Druckfestigkeitsprüfung

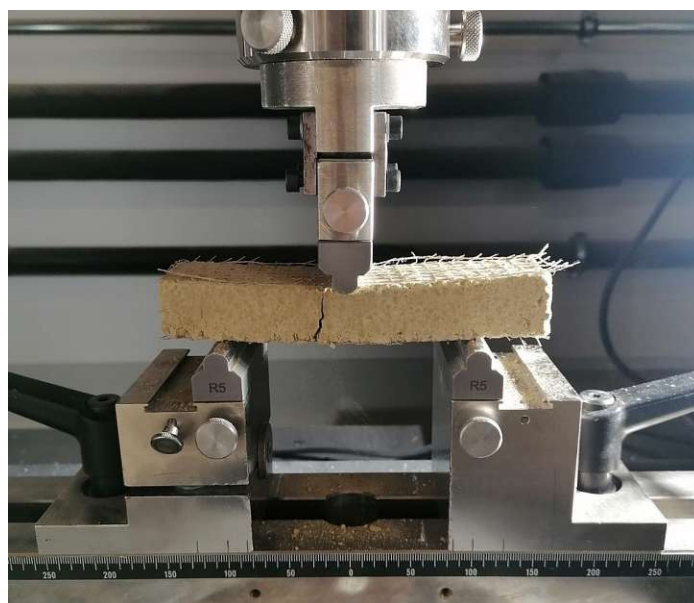


Abbildung 35: Biegezugprüfung der Probekörper mit Jutegewebe

4.7 Schwindverhalten der Probekörper

Wie in Abschnitt 2.8 bereits erläutert, kann es im Zuge des Schwindvorganges von Lehmbaustoffen zur Bildung von Rissen kommen. Diese Risse können die Festigkeitseigenschaften negativ beeinflussen. Falls die Aktivierung der Tonminerale zu einer Verstärkung der Rissbildung führt, würde dies die Herstellung von Lehmbaustoffen erschweren. Um einen möglichen negativen oder positiven Einfluss der Aktivierung der Tonanteile auf das Schwindverhalten und die Rissbildung zu beurteilen, wurden die Abmessungen der Probekörper nach der Herstellung notiert. Danach wurden die Probekörper im Klimaschrank bei 23°C und 50% Luftfeuchtigkeit bis zur Festigkeitsprüfung gelagert. Die Längsabmessungen der Probekörper mit ursprünglicher Korngrößenverteilung wurden erneut in einem Abstand von 2 bis 10 Tagen notiert. Die für die Festigkeitsprüfung relevanten Abmessungen (Höhe und Breite des Querschnittes) wurden am Tag der Herstellung und am Tag der Prüfung für alle Probekörper notiert.

Aus diesen Aufzeichnungen und der folgenden Formel [5] wurde das Schwindmaß der einzelnen Probekörper bestimmt:

$$\text{Schwindmaß} = \frac{L_f - L_t}{L_f} * 100\% \quad (4.3)$$

mit

L_f Länge, im feuchten Zustand gemessen

L_t Länge, im trockenen Zustand gemessen

5 ERGEBNISSE UND CONCLUSIO

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Festigkeitsprüfung und deren Auswertung sowie Beobachtungen des Schwindverhaltens behandelt.

5.1.1 Ergebnisse der Prüfung

In Tabelle 9 und Tabelle 10 ist der arithmetische Mittelwert der Druck- sowie Biegezugfestigkeit je Serie dargestellt. Wie in den Abschnitten 4.5.1 und 4.5.2 beschrieben, wird der arithmetische Mittelwert der Biegezugfestigkeit aus drei Proben gebildet, der arithmetische Mittelwert der Druckfestigkeit aus sechs.

Um den Einfluss der Aktivierung besser vergleichen zu können, wurden die Ergebnisse nach dem Wassergehalt geordnet, sodass immer die drei Serien mit gleichem Material und unterschiedlicher Mahldauer untereinanderstehen. Eine genaue Beschreibung der Materialzusammensetzung der jeweiligen Serie ist in Tabelle 6, Tabelle 7 und Tabelle 8 ersichtlich.

Tabelle 9: Ergebnisse der Festigkeitsprüfung; Proben mit ursprünglicher Korngrößenverteilung

Serie	Mahldauer in Minuten	Wasser- zugabe in %	Druck- festigkeit ¹⁾ in N/mm ²	Standard- abweichung in N/mm ²	Biegezug- festigkeit ²⁾ in N/mm ²	Standard- abweichung in N/mm ²
5	0	10	9,10	0,38	1,62	0,35
11	30	10	7,60	0,70	1,01	0,11
8	60	10	8,30	0,49	1,43	0,18
6	0	15	6,78	0,97	0,95	0,23
12	30	15	8,92	1,61	1,16	0,38
9	60	15	9,32	1,19	0,98	0,34
7	0	20	4,47	0,45	0,79	0,07
13	30	20	7,12	1,10	1,02	0,32
10	60	20	7,81	0,79	1,01	0,24

1) arithmetisches Mittel aus $n = 6$

2) arithmetisches Mittel aus $n = 3$

Tabelle 10: Ergebnisse der Festigkeitsprüfung; Proben aus Feinanteilen

Serie	Mahldauer in Minuten	Wasser- zugabe in %	Druck- festigkeit¹⁾ in N/mm²	Standard- abweichung in N/mm²	Biegezug- festigkeit ²⁾ in N/mm²	Standard- abweichung in N/mm²
14	0	10	10,25	0,77	1,63	0,14
17	30	10	8,09	0,97	0,67	0,12
20	60	10	6,47	0,84	0,59	0,22
15	0	15	6,72	0,46	1,20	0,33
18	30	15	7,99	0,70	1,04	0,34
21 ³⁾	60	15	4,67	0,71	0,70	0,05
16	0	20	4,46	0,23	0,76	0,15
19	30	20	12,94	0,69	2,11	0,34
22 ³⁾	60	20	3,62	0,88	0,45	0,05

1) arithmetisches Mittel aus n = 6

2) arithmetisches Mittel aus n = 3

3) arithmetisches Mittel aus n = 4

Tabelle 11: Ergebnisse der Festigkeitsprüfung; Proben mit Bewehrung

Serie	Mahldauer in Minuten	Wasser- zugabe in %	Druck- festigkeit¹⁾ in N/mm²	Standard- abweichung in N/mm²	Biegezug- festigkeit ²⁾ in N/mm²	Standard- abweichung in N/mm²
23	0	10	9,61	1,69	1,24	0,13
24	0	15	9,03	1,12	1,11	0,06
25	0	20	7,40	0,68	0,67	0,13
26	0	10	9,73	0,92	1,22	0,30
27	0	15	8,98	0,68	1,63	0,35
28	0	20	7,70	0,71	1,29	0,22

1) arithmetisches Mittel aus n = 6

2) arithmetisches Mittel aus n = 3

5.1.2 Auswertung der Ergebnisse

Anhand der Ergebnisse in Tabelle 9 und Tabelle 10 ist deutlich erkennbar, dass die Druck- und Biegezugfestigkeiten der Probekörper ohne mechanische Aktivierung mit steigendem Wassergehalt schlechter werden. Dies gilt sowohl für die Probekörper (Serie 5, 6 und 7) mit der ursprünglichen Korngrößenverteilung als auch für jene Probekörper die ausschließlich aus den Feinanteilen (Korngröße <0,25 mm) hergestellt wurden (Serie 14, 15 und 16).

Sowohl bei den Probekörpern mit ursprünglicher Korngrößenverteilung (Serie 5, 11 und 8) als auch bei jenen aus den Feinanteilen (Serie 14, 17 und 20) und einer **Wasserzugabe von 10%** sind keine Verbesserungen hinsichtlich der Festigkeitswerte erkennbar. Durch die mechanische Aktivierung der Tonminerale kommt es zu einer Vergrößerung der spezifischen Oberfläche, wodurch die Tonminerale wiederum mehr Wasser aufnehmen können. Es ist demzufolge möglich, dass durch die Aktivierung eine größere Wasserzugabe nötig ist, um ein vergleichbares Materialverhalten des Lehms während der Herstellung der Proben zu erhalten.

Ein deutlicher positiver Einfluss der Aktivierung ist anhand der Druckfestigkeit der Probekörper mit der ursprünglichen Korngrößenverteilung und einer **Wasserzugabe von 15 und 20%** erkennbar.

Tabelle 12: Vergleich der Druckfestigkeiten bei 15% Wasserzugabe – urspr. Korngrößenverteilung

Probekörper mit ursprünglicher Korngrößenverteilung und 15% Wasserzugabe (Serie 6, 12 und 9)					
Mahldauer in Minuten	Druckfestigkeit N/mm ²	Mahldauer in Minuten	Druckfestigkeit N/mm ²	Mahldauer in Minuten	Druckfestigkeit N/mm ²
0	6,78	30	8,92	60	9,32



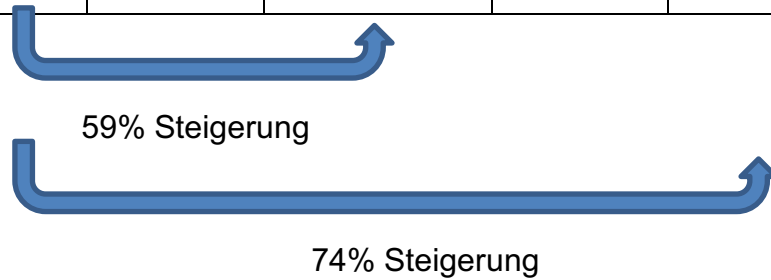
31% Steigerung



37% Steigerung

Tabelle 13: Vergleich der Druckfestigkeiten bei 20% Wasserzugabe - urspr. Korngrößenverteilung

Probekörper mit ursprünglicher Korngrößenverteilung und 20% Wasserzugabe (Serie 7, 13 und 10)					
Mahldauer in Minuten	Druckfestigkeit N/mm ²	Mahldauer in Minuten	Druckfestigkeit N/mm ²	Mahldauer in Minuten	Druckfestigkeit N/mm ²
0	4,47	30	7,12	60	7,81



Die Vergleiche in Tabelle 12 und Tabelle 13 zeigen, dass vor allem durch das Mahlen in der Scheibenschwingmühle für 30 Minuten ein signifikanter Anstieg der Festigkeitswerte erreichbar ist. Bei einer Mahldauer von 60 Minuten ist ein weiterer Anstieg messbar, jedoch nicht im selben Ausmaß. Die Ergebnisse aus der Druckfestigkeitsprüfung bestätigen die Verbesserung der Verbundqualität durch Aktivierung der Tonminerale, die SCHUBERT [61] für Ton und Faserstoffe nachgewiesen hat (siehe Abschnitt 3.2.2).

In Bezug auf die Biegezugfestigkeit der Probekörper mit ursprünglicher Korngrößenverteilung lässt sich nur festhalten, dass die Werte mit Aktivierung geringfügig höher sind als ohne.

Vergleicht man die Ergebnisse aus Tabelle 9 mit jenen aus Tabelle 11, erkennt man, dass durch den Einsatz von Holzfasern und Jutegewebe zum Teil eine Verbesserung der Druck- und Biegezugfestigkeit erreicht werden konnte. Die beigefügten Fasern beziehungsweise das außen aufgebraachte Jutegewebe (siehe Abschnitt 4.4.4) wirken dabei als Bewehrung. Die Bewehrung ermöglicht eine bessere Abtragung der Kräfte, vor allem der Zug- beziehungsweise Biegezugkräfte. Betrachtet man nur jeweils die Probekörper

- ohne Aktivierung
- mit Aktivierung

- sowie mit Bewehrung

mit gleicher Wasserzugabe, so erkennt man, dass die Festigkeiten der Probekörper mit mechanischer Aktivierung in diesem Vergleich durchaus gut abschneiden (siehe Tabelle 14, Tabelle 15 und Tabelle 16). Bei den Versuchsreihen mit einer **Wasserzugabe von 15% und 20%** erzielten die Probekörper mit einer Aktivierung von 60 Minuten die höchsten Werte der Druckfestigkeit. Bei einer **Wasserzugabe von 10%** erzielten die Probekörper mit 60 Minuten Aktivierung höhere Werte für die Biegezugfestigkeit als die Probekörper mit Faserzugabe. Bei einer Wasserzugabe von 15% und 20% Wasser wurden die höchsten Werte der Biegezugfestigkeit allerdings bei den Probekörpern mit Jutegewebe erzielt.

Tabelle 14: Vergleich aller Festigkeiten mit 10% Wasserzugabe

Vergleich der Druck- und Biegezugfestigkeit der Probekörper: 1) nicht aktiviert, 2) aktiviert, 3) mit Bewehrung mit 10% Wasserzugabe				
Serie	Mahldauer in Minuten	Bewehrung	Druckfestigkeit N/mm ²	Biegezugfestigkeit N/mm ²
5	0	keine	9,10	1,62
11	30	keine	7,60	1,01
8	60	keine	8,30	1,43
23	0	Holzfasern	9,61	1,24
26	0	Jutegewebe	9,73	1,22

Tabelle 15: Vergleich aller Festigkeiten mit 15% Wasserzugabe

Vergleich der Druck- und Biegezugfestigkeit der Probekörper: 1) nicht aktiviert, 2) aktiviert, 3) mit Bewehrung mit 15% Wasserzugabe				
Serie	Mahldauer in Minuten	Bewehrung	Druckfestigkeit N/mm ²	Biegezugfestigkeit N/mm ²
6	0	keine	6,78	0,95
12	30	keine	8,92	1,16
9	60	keine	9,32	0,98
24	0	Holzfasern	9,03	1,11
27	0	Jutegewebe	8,98	1,63

Tabelle 16: Vergleich aller Festigkeiten mit 20% Wasserzugabe

Vergleich der Druck- und Biegezugfestigkeit der Probekörper: 1) nicht aktiviert, 2) aktiviert, 3) mit Bewehrung mit 20% Wasserzugabe				
Serie	Mahldauer in Minuten	Bewehrung	Druckfestigkeit N/mm ²	Biegezugfestigkeit N/mm ²
7	0	keine	4,47	0,79
13	30	keine	7,12	1,02
10	60	keine	7,81	1,01
25	0	Holzfasern	7,40	0,67
28	0	Jutegewebe	7,70	1,29

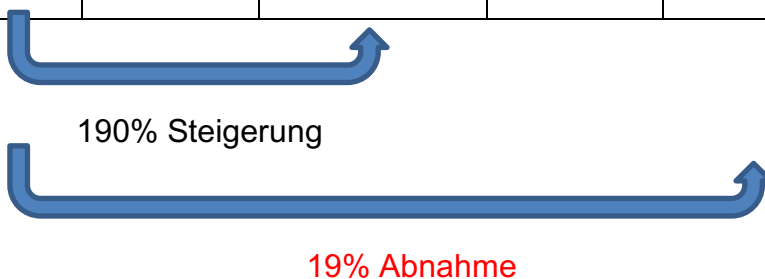
Bei den Probekörpern aus **Feinanteilen** bewirkt die Aktivierung keinen deutlichen oder sogar einen negativen Effekt. Bei einer **Wasserzugabe von 10%** (Serie 14, 17 und 20) kommt es zu einer Reduzierung der Druckfestigkeit um rund 37%, bei einer **Wasserzugabe von 15%** (Serie 15, 18 und 21) beträgt die Reduktion 30%. Auch die Biegezugfestigkeit nimmt mit steigender Mahldauer ab. Ein Grund für dieses Materialverhalten könnte sein, dass durch den fortlaufenden Mahlvorgang auch die

übrigen größeren Körner verkleinert werden und die letzten natürlichen Bindungen im Material gelöst werden.

Die Probekörper mit einer **Wasserzugabe von 20%** (Serien 16, 19 und 22) sind aufgrund des bei der Serie 19 fälschlicherweise angewandten Pressdruckes (siehe Abschnitt 4.4.3) von 110 bar nicht vergleichbar. An dieser Stelle sei jedoch angemerkt, dass die Probekörper der Serie 19 (Mahldauer 30 Minuten, 20% Wasserzugabe) die höchsten im Zuge dieser Diplomarbeit erzielten Festigkeitswerte vorweisen konnten. Sowohl die Druck- als auch die Biegefestigkeit ist deutlich höher als bei anderen Probekörpern.

Tabelle 17: Vergleich der Druckfestigkeiten bei 20% Wasserzugabe - Feinanteile

Probekörper aus Feinanteilen (< 0,25 mm) und 20% Wasserzugabe (Serie 16, 19 und 22)					
Mahldauer in Minuten	Druckfestigkeit N/mm ²	Mahldauer in Minuten	Druckfestigkeit N/mm ²	Mahldauer in Minuten	Druckfestigkeit N/mm ²
0	4,46	30	12,94	60	3,62



Die Ergebnisse in Tabelle 17 zeigen aber auch, dass es bei einer Mahldauer von 60 Minuten zu einer Abnahme der Druckfestigkeit um 19% im Vergleich zu den nicht aktivierten Probekörpern kommt. Auch die Biegezugfestigkeit fällt deutlich schlechter aus als bei anderen vergleichbaren Probekörpern.

Dieses Ergebnis erweckt den Eindruck, dass das Potential des untersuchten Materials bei einer Mahldauer von 30 Minuten und einer Wasserzugabe von 20% vollständig ausgeschöpft ist und hier ein Maximum vorliegt. Aufgrund des Ausführungsfehlers hinsichtlich des Pressdruckes in dieser Vergleichsserie lässt sich allerdings nicht mit Sicherheit sagen, ob das Maximum wirklich im Bereich dieser Mahldauer und Wasserzugabe auftritt. Für eine eindeutige Bestimmung des

Maximums und der idealen Mahldauer und Wasserzugabe wäre eine weitere Versuchsreihe mit größerem Probekörper-Umfang und breiterer Variation der Eingangsgrößen notwendig.

Die in den Normen geforderte Biegezugfestigkeit von $0,8 \text{ N/mm}^2$ (siehe Abschnitt 4.5.1) wird bei den Probekörpern aus Tabelle 9 nur von den Probekörpern der Serie 7 mit einer Wasserzugabe von 20% und einer Mahldauer von 0 Minuten nicht erfüllt. Bei den Probekörpern aus Tabelle 10 wird sie von fünf Probekörpern nicht erfüllt. Die in den Normen geforderte Druckfestigkeit $3,8 \text{ N/mm}^2$ für tragend eingesetzte Lehmsteine (siehe Abschnitt 4.5.2) wird von allen Probekörpern mit ursprünglicher Korngrößenverteilung (Tabelle 9) erfüllt. Bei den Probekörpern aus Feinanteilen erreichen nur die Probekörper der Serie 22 mit einer Wasserzugabe von 20% und einer Mahldauer von 60 Minuten den geforderten Wert nicht.

Ganz allgemein ist die Druckfestigkeit bei den Probekörpern aus Feinanteilen in der Regel geringer als bei den Probekörpern mit der ursprünglichen Korngrößenverteilung. Ein Grund hierfür ist, dass die Feinanteile im Lehm vor allem als Bindemittel zwischen den größeren Sandkörnern wirken, während die Sandkörner die eigentlichen Lasten abtragen.

5.2 Schwindverhalten der Probekörper

Da während dem Trocknen einige Probekörper mit ursprünglicher Korngrößenverteilung gebrochen sind (siehe auch Abschnitt 4.4.2 – Erkenntnisse aus der ersten Probekörper-Herstellung) konnten die Höhenabmessungen für den folgenden Vergleich des Schwindverhaltens zum Teil nicht ausgewertet werden. Im Weiteren werden daher nur folgende Abmessung für die Beurteilung des Schwindverhaltens herangezogen (siehe auch Abschnitt 4.7):

- die Breite aller Probekörper
- Die Länge der Probekörper mit ursprünglicher Korngrößenverteilung.

In den folgenden Tabellen (Tabelle 18 und Tabelle 19) ist das durchschnittliche Schwindmaß der Probekörper hinsichtlich Breite und Länge dargestellt:

Tabelle 18: Ermitteltes Schwindverhalten der Probekörper - Breite

Serie	Mahldauer in Minuten	Wassergehalt in %	Schwindmaß¹⁾ der Breitenabmessung in %	Standardabweichung in %
5	0	10	1,70	0,73
11	30	10	1,09	0,05
8	60	10	1,17	0,52
6	0	15	4,13	1,01
12	30	15	3,87	1,03
9	60	15	3,56	0,42
7	0	20	7,38	0,40
13	30	20	5,73	0,34
10	60	20	5,75	0,54
14	0	10	1,40	0,68
17	30	10	0,98	0,07
20	60	10	3,13	2,04
15	0	15	4,83	0,41
18	30	15	4,44	0,58
21 ²⁾	60	15	6,04	1,47
16	0	20	4,86	0,41
19	30	20	8,29	2,17
22 ²⁾	60	20	5,23	1,31

1) arithmetisches Mittel aus $n = 3$

2) arithmetisches Mittel aus $n = 4$

Tabelle 19: Ermittelttes Schwindverhalten der Probekörper - Länge

Serie	Mahldauer in Minuten	Wassergehalt in %	Schwindmaß ¹⁾ der Länge %	Standardabweichung in %
5	0	10	3,33	0,36
11	30	10	1,56	0,31
8	60	10	3,08	0,38
6	0	15	4,27	0,24
12	30	15	4,60	0,44
9	60	15	4,10	0,47
7	0	20	7,71	0,36
13	30	20	7,29	0,36
10	60	20	5,85	0,44

1) arithmetisches Mittel aus $n = 3$

Die Ergebnisse zeigen, dass mit einer größeren Wasserzugabe das Schwindverhalten deutlicher hervortritt. Dies gilt jedoch sowohl für jene Probekörper mit aktivierten Anteilen als auch jene ohne. Ein deutlicher Einfluss durch die Aktivierung der Tonminerale lässt sich nicht ablesen. Anhand Abbildung 36 ist beispielsweise eine Reduktion des Schwindmaßes der Breite bei einer Wasserzugabe von 20% und eine Mahldauer von 60 Minuten erkennbar. Dieses Ergebnis lässt sich mithilfe der Längsabmessungen nicht bestätigen (Abbildung 37). Hier ist stattdessen eine Reduktion des Schwindmaßes bei einer Wasserzugabe von 10% und einer Mahldauer von 30 Minuten auffallend. Trotzdem scheint die Aktivierung der Tonminerale einen positiven Einfluss auf das Schwindverhalten zu haben.

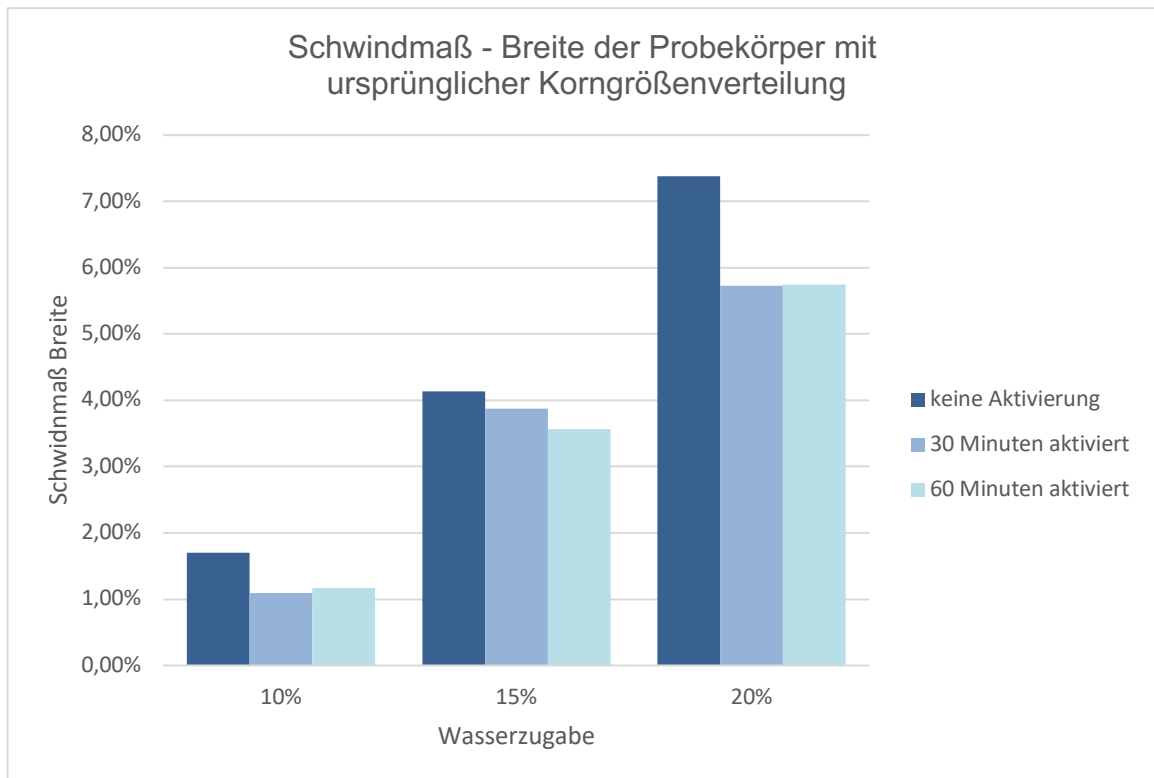


Abbildung 36: Vergleich des Schwindmaßes der Breite mit 10, 15 und 20% Wasserzugabe

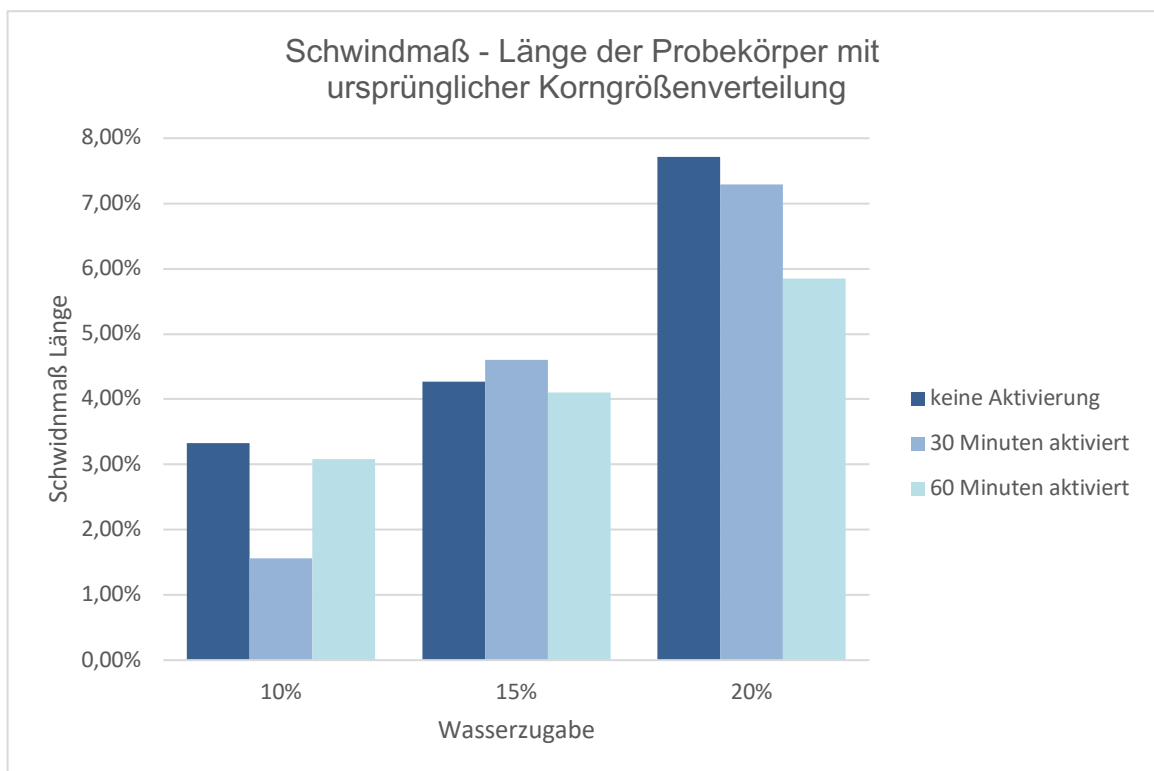


Abbildung 37: Vergleich des Schwindmaßes der Länge mit 10, 15 und 20% Wasserzugabe

Anders sieht dies bei jenen Probekörpern aus, die nur aus aktivierten Tonmineralen hergestellt wurden (siehe auch Tabelle 7). Abbildung 38 zeigt, dass das Schwindmaß bei jenen Probekörpern ohne Aktivierung zum Teil niedriger ausfällt als bei jenen mit Aktivierung. Besonders deutlich ist der Unterschied bei einem Wassergehalt von 10% und 20%. Tendenziell scheint die Aktivierung bei dieser Versuchsreihe einen negativen Einfluss auf das Schwindverhalten zu haben.

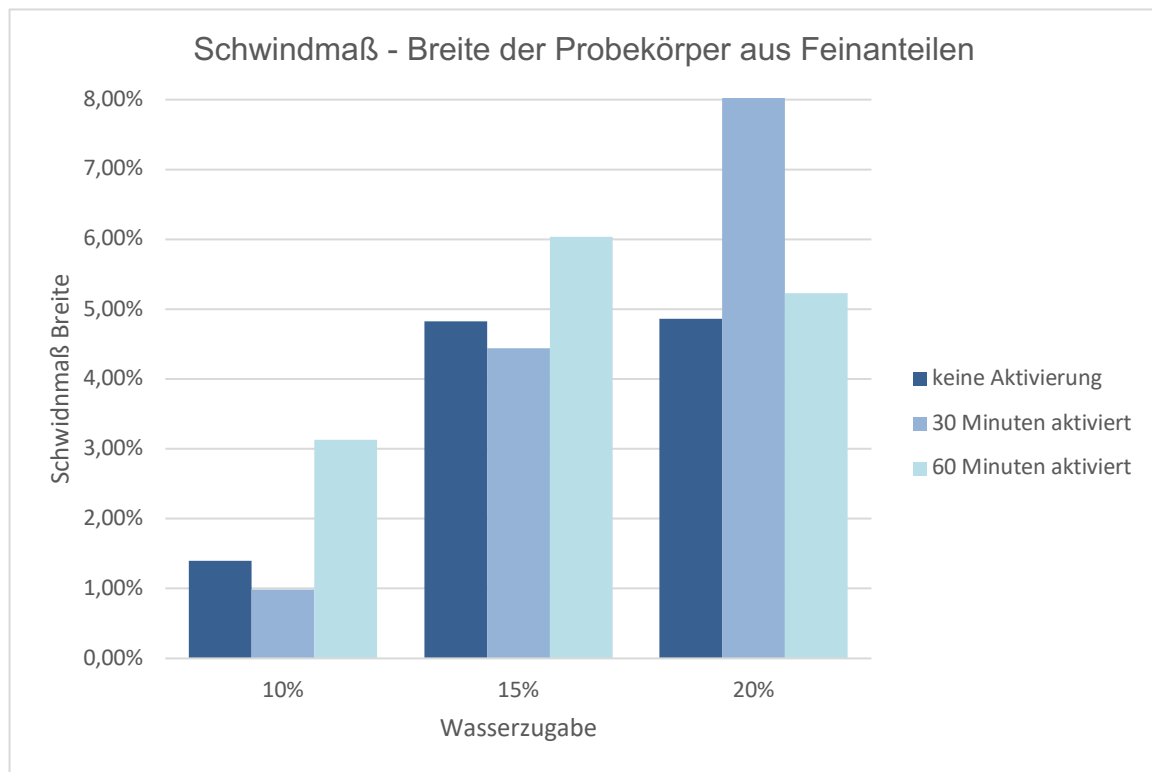


Abbildung 38: Vergleich des Schwindmaßes der Breite mit 10, 15 und 20% Wasserzugabe

Anhand der im Zuge dieser Diplomarbeit hergestellten Probekörper lässt sich daher weder ein deutlicher positiver noch negativer Einfluss der Aktivierung auf das Schwindverhalten ablesen. Die durchgeführten Versuche reichen allerdings nicht aus, um den Einfluss der Aktivierung auf das Schwindverhalten eindeutig zu bewerten.

5.3 Conclusio und Aussicht

Die grundlegende Frage dieser Diplomarbeit, ob durch mechanische Aktivierung der Tonminerale eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften erreicht werden kann, ist prinzipiell zu bejahen. Anhand der durchgeführten Versuche ist eine Verbesserung der Druckfestigkeit bei jenen Probekörpern, die aus der ursprünglichen Korngrößenverteilung und einer Zugabe von 15% Wasser (Steigerung der Festigkeit um 37% bei 60 Minuten Mahldauer) beziehungsweise 20% Wasser (Steigerung der Festigkeit um 74% bei 60 Minuten Mahldauer) hergestellt wurden, erkennbar. Bei der Biegezugfestigkeit lässt sich keine signifikante Verbesserung der Festigkeit feststellen. Gerade bei Lehm sind die erzielbaren Festigkeitswerte jedoch stark von der Herkunft und der Zusammensetzung des Materials sowie vom Herstellungsprozess bzw. der Wasserzugabe während der Versuchsausführung abhängig. Das verwendete Material wurde nicht vorsortiert oder klassifiziert. Somit könnten selbst Probekörper aus dem vermeintlich gleichen Material aus der gleichen Lehmgrube unterschiedliche Festigkeitswerte erzielen. Es ist somit möglich, dass bei weiteren Versuchsausführung auch hinsichtlich der Biegezugfestigkeit Verbesserungen nachweisbar sind. Um die in der Diplomarbeit festgestellten Auswirkungen auf die ermittelten Festigkeitswerte zu verifizieren bzw. auch auf Material anderer Lehmabbaustätten umzulegen, wären umfangreiche Prüfungen durchzuführen.

Die Ergebnisse der Festigkeitsprüfung zeigen, dass die mit mechanischer Aktivierung erreichten Biegezugfestigkeiten ähnlich gut ausfallen, wie jene Festigkeiten, die von Probekörpern erzielt wurden, denen eine Bewehrung aus Holzfaser oder Jutegewebe zur Steigerung der Biegezugfestigkeit hinzugefügt wurden. Sowohl Probekörper aus mechanisch aktiviertem Lehm als auch Probekörper mit beigefügten Naturfasern eignen sich für die Entwicklung von klimafreundlichen und ressourcenschonenden Lehmbaustoffen. Im Zuge dieser Arbeit wurden beide Möglichkeiten miteinander verglichen. Der Fokus der Arbeit lag auf der Steigerung der Festigkeit durch Aktivierung. Um den Einfluss auf die Verbundqualität von Lehm und Fasern zu untersuchen sind umfangreichere Untersuchungen nötig. Eine interessante weiterführende Forschungsfrage wäre, ob durch die Verbesserung der Verbundqualität durch die mechanische Aktivierung und die zusätzliche Beigabe von Naturfasern eine weitere Festigkeitssteigerung erreicht werden kann.

Durch die mechanische Aktivierung wird jedenfalls die Materialstruktur verändert und eine chemische Reaktion ausgelöst. In der Keramik-Herstellung wird diese chemische Reaktion bislang durch das Erhitzen des Materials auf hohe Temperaturen erreicht. Auch die mögliche Kombination von mechanischer und thermischer Energie bei der Erstellung von Lehmziegeln und anderen gesinterten Lehmprodukten wäre eine interessante anknüpfende Forschungsfrage.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] „Website der EU-Kommission,“ [Online]. Available: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_de. [Zugriff am 12 Oktober 2021].
- [2] „Website des Österreichischen Umweltbundesamtes,“ [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.at/klima/treibhausgase>. [Zugriff am 2021 Oktober 12].
- [3] „Website der Europäischen Kommission,“ [Online]. Available: https://ec.europa.eu/info/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-feb-17_de. [Zugriff am 2021 Oktober 12].
- [4] WWF, „Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie,“ [Online]. Available: https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_Klimaschutz_in_der_Beton-_und_Zementindustrie_WEB.pdf. [Zugriff am 9 Mai 2023].
- [5] H. Schroeder, *Lehmbau - Mit Lehm ökologischen planen und bauen*, Weimar: Springer Verlag, 2018.
- [6] „Netzwerk Lehm,“ [Online]. Available: <http://netzwerkehm.at/lehm/geschichte/>. [Zugriff am 14 Oktober 2021].
- [7] „UNESCO,“ [Online]. Available: <https://whc.unesco.org/en/list/116/>. [Zugriff am 10 April 2023].
- [8] H. Cotter, „A Tribute to Islam, Earthen but Transcendent,“ *The New York Times*, pp. Section C, Page 1 , 19 April 2012.
- [9] „Aline Gsell,“ [Online]. Available: <https://www.aline-gsell.com/die-grosse-moschee-von-djenne/>. [Zugriff am 12 Oktober 2021].
- [10] „Netzwerk Lehm,“ [Online]. Available: <http://netzwerkehm.at/lehmbauten/>. [Zugriff am 20 Jänner 2023].
- [11] „Netzwerk Lehm,“ [Online]. Available: <http://netzwerkehm.at/projekte/>. [Zugriff am 20 Jänner 2023].
- [12] M. Rauch, „Lehm Ton Erde,“ [Online]. Available: <https://www.lehmtonerde.at/de/projekte/projekt.php?pID=7>. [Zugriff am 20 Jänner 2023].
- [13] „Dachverband Lehm,“ [Online]. Available: <https://www.dachverband-lehm.de/verband>. [Zugriff am 21 Jänner 2023].
- [14] F. Volhard und U. Röhlen, *Lehmbauregeln*, Bd. 3. Auflage, Springer Vieweg Verlag, 2009.
- [15] E. Schneyder, „ubm magazin,“ [Online]. Available: <https://www.ubm-development.com/magazin/lust-auf-lehmbau-kehrt-zurueck/>. [Zugriff am 20 Jänner 2023].
- [16] „Lehm Ton Erde,“ [Online]. Available: <https://www.lehmtonerde.at/de/projekte/projekt.php?pID=97>. [Zugriff am 20 Jänner 2023].
- [17] „WASP,“ [Online]. Available: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-tecla/>. [Zugriff am 23 Jänner 2023].
- [18] H. Fischer, T. Salonen, M. Mitterböck und A. Korjenic, „Untersuchung der hygrothermischen Eigenschaften eines ökologischen Bodenaufbaus aus Lehm,“ *Bauphysik*, Bd. Vol. 42, Nr. Issue 3, pp. 116-123, 2020.
- [19] G. Minke, *Handbuch Lehmbau*, Bd. 10. Auflage, Rastede: Ökobuch Verlag GmbH, 2022.

- [20] „Dachverband Lehm,“ [Online]. Available: <https://www.dachverband-lehm.de/lehmbau/lehmbaustoffe>. [Zugriff am 23 Jänner 2023].
- [21] DIN 18948:2018-12: Lehmplatten – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung.
- [22] F. Scheffer und P. Schachtschabel, Lehrbuch der Bodenkunde, Bd. 17. Auflage, Berlin: Springer Verlag GmbH, 2018.
- [23] R. Vinx, Gesteinsbestimmung im Gelände, Hamburg: Springer Spektrum, 2015.
- [24] D. Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. ADAM, Studienunterlagen zur Vorlesung Grundbau und Bodenmechanik; Bodenkenngößen und Bodenklassifizierung, 2019, pp. 16-18.
- [25] H. Brandl, Studienblätter zur Vorlesung Grundbau und Bodenmechanik, Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Wien, 2006.
- [26] „Bodenkunde Online - Studienunterlagen der Humboldt Universität Berlin,“ [Online]. Available: https://www.bodenkunde-projekte.hu-berlin.de/boku_online/pcboku10.agrar.hu-berlin.de/cocoon/boku/sco_2_substrate_31b529.html?section=AN1001E. [Zugriff am 12 Oktober 2021].
- [27] AGES, „ASOC – Österreichische Karte des organischen Bodenkohlenstoffs - Endbericht zum Forschungsprojekt Nr. 101255,“ Wien, 2018.
- [28] „AEIOU,“ [Online]. Available: <http://www.aeiou.at/aeiou.encyclop.data.image.g/g263496a.jpg>. [Zugriff am 12 Oktober 2021].
- [29] E. Bölskey und A. Rischaneck, „(Öko-)Technologische Leitprinzipien der Lehmarchitektur – 2. Teil,“ *bm Baumagazin*, Nr. 1, pp. 26 - 29, 2010.
- [30] P. D.-I. R. Katzenbach, Studienunterlagen Geotechnik, TU Darmstadt, 2011.
- [31] D. L. e.V., Lehmbauregeln, Bd. 2. Auflage, D. L. e.V., Hrsg., Weimar: Vieweg Verlag, 2002.
- [32] F. Aschauer und W. Wu, „Website der Universität für Bodenkultur Wien,“ [Online]. Available: https://boku.ac.at/fileadmin/data/H03000/H87000/department/kongress_mai07/beitr_aege/Geotechnische_Probleme_beim_Lehmbau.pdf. [Zugriff am 12 Oktober 2021].
- [33] U. Dr. rer. nat. Müller, C. Dr.-Ing. Ziegert, C. Kaiser und U. Röhlen, „Eigenschaften industrieller Lehmbauprodukte für den Mauerwerksbau und Verhalten von Lehmsteinmauerwerk,“ *Mauerwerk 1/2012*, pp. 17-28, 10 Februar 2012.
- [34] „Lehm Ton Erde,“ [Online]. Available: <https://www.lehmtonerde.at/de/lehm/lehm.php?aID=43>. [Zugriff am 21 Jänner 2023].
- [35] J. Spiegel, M. Hofmann, T. Schoch und O. Kornadt, „Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit der Baustoffe auf das thermische Verhalten von Gebäuden,“ *Bauphysik*, Bd. 43, Nr. Heft 4, pp. 231-242, 2021.
- [36] C. Riccabona und T. Bednar, Baukonstruktionslehre 4, Bauphysik, Wien: Manz Verlag, 2010.
- [37] U. Röhlen, „Funktionale Aspekte von Lehmstoffen bei der Innendämmung,“ 20 März 2020. [Online]. Available: <https://www.lehmbau-praxis.de/blog/funktionale-aspekte-von-lehmbaustoffen-bei-der-innendaemmung>. [Zugriff am 10 Mai 2023].
- [38] D. Röhm, „Bauen mit Lehm,“ [Online]. Available: <http://www.dieter-roehm.de/lehm.htm>. [Zugriff am 13 Oktober 2021].
- [39] „Claytec,“ [Online]. Available: https://www.claytec.de/Broschueren/Fachwerk-Broschuere/FO_Fachwerk-web.pdf. [Zugriff am 5 März 2023].
- [40] R. Benedix, Bauchemie - Einführung in die Chemie für Bauingenieure und Architekten, Bd. 7. Auflage, Leipzig: Springer Vieweg, 2020.
- [41] H. Salmang, H. Scholze und R. Telle, Keramik, Bde. %1 von %2Band 1: Strukturen, Thermochemie, Sinterkinetik, Gefüge und Untersuchungsmethoden, Berlin: De Gruyter, 2022.

- [42] F. H. Becker, „Dissertation: Brenntechnologie für Geschirr unter besonderer Berücksichtigung des Glattbrands von Porzellan Flachware im Schnellbrandofen,“ Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2016.
- [43] „Keramost - Sicherheitsdatenblatt Metakaolin,“ [Online]. Available: <https://www.keramost.cz/dokumenty/sdb-metakaolin-de.pdf>. [Zugriff am 14 März 2023].
- [44] E. Hornbogen, G. Eggeler und E. Werner, „Keramische Werkstoffe,“ in *Werkstoffe*, Berlin, Heidelberg, Springer Vieweg, 2019, pp. 291-318.
- [45] „Saint-Gobain Performance Ceramics & Refractories,“ [Online]. Available: <https://www.ceramicsrefractories.saint-gobain.com/de/materials/mullite>. [Zugriff am 14 März 2023].
- [46] A. G. S. v. R. Tobias Hübner, „Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz - Deutschland,“ 27 August 2019. [Online]. Available: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a-branchensteckbrief-keramik.pdf?__blob=publicationFile&v=4. [Zugriff am 11 April 2023].
- [47] A. G. S. v. R. E. R. Tobias Hübner, „Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz - Deutschland,“ 27 August 2019. [Online]. Available: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a-branchensteckbrief-zement.pdf?__blob=publicationFile&v=4. [Zugriff am 12 April 2023].
- [48] A. Kolbitsch, Wände, Wien: Ambra, 2005..
- [49] Kanzlei Dr. Bruck - Ingenieurkonsuleng für technische Physik, „Netzwerk Lehm,“ Dezember 2004. [Online]. Available: http://netzwerklehm.at/wp-content/uploads/2020/12/a03_endberichtokobilanzlehmziegel.pdf. [Zugriff am 14 Mai 2023].
- [50] Deutsches Bundesminisiterium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, „Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen,“ 2013. [Online]. Available: https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/unterrichtsgebaeude/neubau/v_2013/NB_UN2013_111.pdf. [Zugriff am 14 Mai 2023].
- [51] C. Bolm und J. G. Hernández, „Mechanochemie gasförmiger Reaktanten,“ *Angewandte Chemie*, Nr. 131, pp. 3320-3335, 2019.
- [52] S. Zechel und M. D. Hager, „Faszination Chemie - Informationsplattform der GDCh,“ [Online]. Available: <https://faszinationchemie.de/makromolekulare-chemie/news/mechanochemie-bis-die-kette-bricht/>. [Zugriff am 5 März 2023].
- [53] „Spektrum.de,“ [Online]. Available: <https://www.spektrum.de/lexikon/chemie/tribochemie/9427>. [Zugriff am 5 März 2023].
- [54] A. Michalchuk, E. Boldyreva, A. Belenguer, F. Emmerling und V. Boldyrev, „Tribochemistry, Mechanical Alloying, Mechanochemistry: What is in a Name?,“ *Front. Chem.*, Nr. 9:685789, 2021.
- [55] L. Borchardt und S. Grätz, „Reaktoren für spezielle technisch-chemische Prozesse: Tribochemische Reaktoren,“ in *Handbuch Chemische Reaktoren*, Berlin, Heidelberg, Springer Spektrum, 2018.
- [56] S. Kipp, V. Šepelák und K. Becker, „Mechanochemie: Chemie mit dem Hammer,“ *Chemie in unserer Zeit*, Nr. 39, pp. 384-392, 2005.
- [57] Umweltbundesamt GmbH, „Umweltbundesamt,“ [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.at/angebot/leistungen/gruene-chemie>. [Zugriff am 5 März 2023].
- [58] D. Forschungsgemeinschaft, „Kaolinit,“ in *MAK Value Documentation in German language*, Wiley-VCH, 2012.

- [59] W. Borchard-Ott, *Kristallographie*, Berlin: Springer Verlag, 2013, p. 126.
- [60] H. Takahashi, „Effect of Dry Grinding on Kaolin Minerals,“ *Clays Clay Miner*, pp. 279-291, 1 Februar 1957.
- [61] D. Schubert, „Dissertation - Neue Werkstoffe aus Ton, Faserstoffen und Bindemitteln durch Preß- und Aufbauagglomeration,“ Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg, 2003.
- [62] H. Huhn und A. Müller, „Veränderung des thermischen Verhaltens von Kaolinit durch mechanische Aktivierung,“ *Journal of Thermal Analysis, Volume 19*, pp. 485-491, 1980.
- [63] „Chemie.de,“ [Online]. Available: <https://www.chemie.de/lexikon/Kaolinit.html>. [Zugriff am 5 März 2023].
- [64] R. Schrader, H.-J. Kutzer und B. Hoffmann, „Über die mechanische Aktivierung von Kaolinit,“ *Tonindustrie-Zeitung*, Nr. 94, pp. 410-416, 1970.
- [65] M. Trojan, „DA: Auswirkungen durch Beimischen von Zusatzstoffen auf die Druckfestigkeit von Lehmabaustoffen.“
- [66] Hanfdaemung.at, [Online]. Available: <https://www.hanfdaemung.at/herstellung>. [Zugriff am 16 März 2023].
- [67] „Hanfingenieur,“ [Online]. Available: <https://www.hanfingenieur.de/know-how/hanfalk/>. [Zugriff am 16 März 2023].
- [68] „Klimaforum Bau,“ [Online]. Available: <https://klimaforum-bau.de/2022/02/fachworkshop-oekologische-baumaterialien-hanf-lehm-stroh/>. [Zugriff am 16 März 2023].
- [69] T. Sanyal, *ute Geotextiles and their Applications in Civil Engineering*, Kolkata: Springer Nature, 2017.
- [70] J. S. Alcaraz, I. M. Belda, E. J. Sanchis und J. M. Gadea Borrell, „Mechanical properties of plaster reinforced with yute fabrics,“ *Composites Part B: Engineering*, Nr. 178, 2019.
- [71] P. Ender, „Masterarbeit: Mechanische Untersuchung von Lehm mit Additiven und natürlichen Rohstoffen als Armierung,“ Technische Universität Wien, 2022.
- [72] „AEIOU,“ [Online]. Available: <http://www.aeiou.at/aeiou.encycloped.data.image.g/g263496a.jpg>. [Zugriff am 12 Oktober 2021].
- [73] „Geologie von Österreich,“ [Online]. Available: <https://www.geologie.ac.at/rocky-austria/landschaften/boehmische-masse>. [Zugriff am 14 Oktober 2021].
- [74] „Rohstoff – Landschaft – Mensch am Beispiel „Lehm“ - Berichte der Geologischen Bundesanstalt,“ Geologische Bundesanstalt, Wien, 2009.
- [75] Dr. Krakow Rohstoff GmbH, [Online]. Available: <https://www.dr-krakow-labor.de/geo-ceramic-labor/tonmineralogie/>. [Zugriff am 5 März 2023].
- [76] Malvern Panalytical GmbH, [Online]. Available: <https://www.malvernpanalytical.com/de/products/measurement-type/phase-identification>. [Zugriff am 5 März 2023].
- [77] „Spektrum.de,“ [Online]. Available: <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/thermoanalyse/16561>. [Zugriff am 5 März 2023].
- [78] C. Z. U. Röhlen, *Lehmbau-Praxis, Planung und Ausführung*, Beuth Verlag, 2020.
- [79] „Siebtechnik Tema,“ [Online]. Available: https://gisgba.geologie.ac.at/gbaviewer/?url=https://gisgba.geologie.ac.at/arcgis/rest/services/KM200/AT_GBA_KM200_NIED_GE/MapServer. [Zugriff am 13 Oktober 2021].

- [80] „RETSCH - Produkt Katalog,“ [Online]. Available: http://www.abmbv.nl/files/retsch_mortar_and_disc_mills_de.pdf. [Zugriff am 13 Oktober 2021].
- [81] *Bedingungsanleitung Laborschwingmühle pulverisette 9*, Firma Fritsch.
- [82] „Steine und Minerale,“ [Online]. Available: <https://www.steine-und-minerale.de/atlas.php?f=2&l=A&name=Achat>. [Zugriff am 3 November 2021].

Anhang A – Versuche zur Bestimmung der gemittelten Korngrößenverteilung

	Versuche, Gewicht in Gramm			
Siebgröße in mm	1	2	3	Durchschnitt
größer als 4	4,5	6,5	6,5	5,83
größer als 2	314,5	360,5	347	340,67
größer als 1	467	497,5	486,5	483,67
größer als 0,5	331,5	320,5	319	323,67
größer als 0,25	251,5	228,5	250	243,33
größer als 0,125	327,5	316	323	322,17
größer als 0,063	215,5	181	191	195,83
kleiner 0,063	87,5	87,5	80	85,00
Summe	1999,5	1998	2003	2000,17