

Diploma Thesis

Mechanical testing of clay with additives and natural materials as reinforcement

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

Diplomarbeit

Mechanische Untersuchung von Lehm mit Additiven und natürlichen Rohstoffen als Armierung

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Philipp Ender, BSc

Matr.Nr.: 01026765

unter der Anleitung von

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 2022



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Danksagung

Ich möchte mich herzlich bei Frau Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Azra Korjenic und Herrn Univ. Ass. Dipl. Ing. Erich Streit bedanken, die es ermöglicht haben, ein mir am Herzen liegendes Thema in ihrem Forschungsbereich Ökologische Bautechnologien bearbeiten zu dürfen.

Vielen Dank für die jederzeitige Betreuung an Univ. Ass. Dipl. Ing. Erich Streit, der mir mit Rat und Tat zur Seite gestanden ist und immer ein Ohr für neue Versuche und Ideen offen hatte.

Für die fesselnde Zeit im Labor während der Grundlagenforschung für unsere zwei Diplomarbeiten gilt ein großer Dank meinem Freund und Studienkollegen Tobias Müller. Die vielen und mitunter hitzigen Diskussionen haben mich angespornt.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern für die großzügige Unterstützung während der Studienzeit bis zum Lektorat dieser Arbeit und auch außerhalb derer, ohne die es für mich nicht möglich gewesen wäre, den Weg bis hierher zu gehen.

Herzlichen Dank an meine liebe Freundin Sandra, die nicht nur das Lektorat für diese Arbeit übernahm, sondern mir in allen Lebenslagen eine große Stütze ist.

Danke allen Menschen, die mich durch die spannende Zeit des Bauingenieurwesen-Studiums begleitet haben, den zahlreichen Kommilitonen, mit denen sich auch über den fachlichen Austausch hinaus langjährige Freundschaften entwickelt haben.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kurzfassung

Die vorliegende Diplomarbeit untersucht mechanische Eigenschaften von Lehm und Lehm mit Additiven und natürlichen Rohstoffen, welche als Armierung dienen. Untersuchte Eigenschaften sind die Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit und Haftzugfestigkeit im Hinblick auf die Verwendung der Materialien in Trockenbaustoffen wie Lehmplatten. Ziel der Arbeit ist es, durch Grundlagenforschung eine Basis zu schaffen, um ein Produkt entwickeln zu können, welches komplett ohne Abfall und für die Umwelt bedenkliche Stoffe auskommt. Das daraus entwickelte Bauprodukt soll ebenfalls ressourcenarm herzustellen sowie möglichst weltweit leicht zugänglich und leistbar sein.

Es sind Lehmprobekörper hergestellt worden, die bei Normklima bis zur Massenkonstanz getrocknet und danach beprobt worden sind. Im Rahmen von Vorversuchen lag der Fokus bei der Herstellung auf zwei verschiedenen Verdichtungsarten. Dabei wurde die dynamische Verdichtung mit dem Proctorverdichtungsgerät mit der statischen Verdichtung mittels hydraulischem Druckstempel verglichen. Es zeigte sich, dass bei annähernd gleicher Verdichtung die dynamisch verdichteten Prüfkörper eine um etwa 20% höhere Biegezugfestigkeit als die statisch verdichteten Probekörper aufwiesen. Die Druckfestigkeit lässt sich durch eine dynamische Verdichtung um etwa 40% erhöhen. Es wurde darüber hinaus festgestellt, dass orthogonal zur Verdichtungsrichtung belastete Probekörper im Mittel eine 38% höhere Druckfestigkeit aufweisen als parallel zur Verdichtungsrichtung belastete Probekörper.

Eine Literaturrecherche und mechanische Überlegungen führten zur Auswahl folgender Additive bzw. natürlicher Rohstoffe: Flachsgewebe, Filz, Kasein, Kalk gelöscht und Holzfasern. Die Additive Kasein, Kalk gelöscht und Holzfasern wurden dem Lehm in verschiedenen Konzentrationen beigemischt. Durch das Flachsgewebe kann die Biegezugfestigkeit um etwa 4,5% gegenüber dem Referenzprobekörper aus reinem Lehm gesteigert werden. Eine Armierung von Lehmproben mit Filzfaserplatten führte bei einer einzelnen Probe zu einer Steigerung der Biegezugfestigkeit auf 240% der Biegezugfestigkeit des unbewehrten Lehmes. Bei allen anderen Proben lag die Biegezugfestigkeit jedoch unter jener der Referenzprobekörper. Die Additive Kasein und Löschkalk bewirkten eine signifikante Verringerung sowohl der Biegezug- als auch der Druck- und Haftzugfestigkeiten. Die Beimischung von Holzfasern in verschiedenen Massenanteilen erhöhte die Haftzugfestigkeit um 11%. Allerdings verringerte sich die Druckfestigkeit um bis zu 20% und die Biegezugfestigkeit um bis zu 35%.

Für die zukünftige Forschung ist der Verbund zwischen den Komponenten Flachs-Lehm bzw. Filz-Lehm zu verbessern. Holzfasern bieten das Potential, die Haftzugfestigkeit von Lehmplatten zu erhöhen. Kasein ist ohne Natriumhydrogencarbonat oder Calciumhydroxid nicht in der Lage, die Druckfestigkeit von Lehmplatten zu verbessern und die Weiterverfolgung von Lehm mit Löschkalkzusätzen wird nicht empfohlen.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abstract

This diploma thesis does research of the mechanical properties of clay with and without additives and natural raw materials that serve as reinforcement. The properties investigated are the flexural strength, compressive strength and adhesive tensile strength with regard to the use of the resources in dry construction materials such as clay panels. The aim of the work is to create a basis through research in order to be able to develop a product that is completely free of waste and substances that are harmful to the environment. The building product developed from this should also be produced using few resources and be accessible and affordable worldwide as easily as possible.

Clay test specimens were produced, dried to constant mass at a standard climate and then sampled. In the course of preliminary tests, the focus was on two different types of compaction during production. Dynamic compaction using the Proctor compactor was compared with static compaction using a hydraulic pressure ram. It was shown that with approximately the same compaction, the dynamically compacted test specimens had a flexural tensile strength that was about 20% higher than the statically compacted test specimens. The compressive strength can be increased by about 40% by dynamic compaction. It was also found that specimens loaded orthogonally to the direction of compaction had an average 38% higher compressive strength than specimens loaded parallel to the direction of compaction.

Literature research and mechanical considerations led to the selection of the additives or natural materials: flax fabric, felt, casein, slaked lime and wood fibres. Casein, slaked lime and wood fibres were added to the clay in different concentrations. The flax fabric can increase the flexural strength by about 4.5% compared to the reference specimen made of pure clay. Reinforcement of clay specimens with felt fibre mats resulted in an increase of the flexural tensile strength to 240% for a single specimen compared to the unreinforced clay. In all other samples, however, the flexural strength was below that of the reference specimens. The additives casein and slaked lime caused a significant reduction in all strengths. Added wood fibres in various mass proportions increased the adhesive tensile strength by 11%. However, the compressive strength decreased by up to 20% and the flexural tensile strength by up to 35%.

For future research, it is recommended to improve the bond between the flax-loam or felt-loam components. Wood fibres offer the potential to increase the adhesive tensile strength of clay panels. Casein is not able to improve the mechanical strengths of clay panels without sodium hydrogen carbonate or calcium hydroxide and the pursuit of clay with slaked lime additives is not recommended.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Grundlagen	10
1.1	Lehm	11
1.1.1	Zusammensetzung und Sieblinie	11
1.2	Ton als Bindemittel	14
1.3	Technische Eigenschaften von Lehm	15
1.3.1	Festigkeitseigenschaften in Abhängigkeit der Konditionierung	15
1.3.2	Kraftübertragung im Lehm mit und ohne Additiven/Fasern	16
1.3.3	Bruchverhalten	18
1.4	Einfluss von Lehmbaustoffen auf die Gesundheit des Menschen	19
1.4.1	Luftfeuchte und Schimmel	19
1.4.2	Strahlenbelastung	21
2	Lehm als (Trocken-)Baustoff	23
2.1	Baustoff Lehm - Tradition und Zukunft	23
2.2	Definition und Verwendung von Lehmplatten	24
2.2.1	Ausgangsstoffe und Herstellung	25
2.2.2	Anforderungen an die Lehmplatte nach DIN 18948:2018-12	25
2.3	Die ökologische Stärke der Lehmplatte im Trockenbau	27
3	Additive	28
3.1	Materialauswahl - erwartete Auswirkungen auf mechanische Eigenschaften	28
3.1.1	Filz	28
3.1.2	Holzfasern	29
3.1.3	Flachsgewebe	30
3.1.4	Kasein	31
3.1.5	Kalk gelöscht	31
3.2	Ökologie der Additive	32
4	Methode	34
4.1	Probekörperherstellung	34
4.1.1	Mischungsverhältnisse	34
4.1.2	Kugelfalltest	39
4.1.3	Verdichtung	41
4.1.4	Konditionierung und Lagerung	45
4.2	Rohdichte	46
4.3	Mechanische Eigenschaften: normative Grundlagen	46
4.4	Biegezugfestigkeitsprüfung	47
4.4.1	Anforderungen an Probekörper und Vorbereitung für die Prüfung	47
4.4.2	Bestimmung der Biegezugfestigkeit	47
4.5	Druckfestigkeitsprüfung	49
4.5.1	Anforderungen an Probekörper und Vorbereitung für die Prüfung	49
4.5.2	Bestimmung der Druckfestigkeit	49

4.6	Haftzugfestigkeitsprüfung	50
4.6.1	Anforderungen an Probekörper und Vorbereitung für die Prüfung	50
4.6.2	Bestimmung der Haftzugfestigkeit	51
5	Ergebnisauswertung und Conclusio	54
5.1	Rohdichte	54
5.2	Vorversuche statische und dynamische Verdichtung	55
5.2.1	Biegezugfestigkeit Referenzprobekörper	55
5.2.2	Druckfestigkeit Referenzprobekörper	56
5.2.3	Vergleich statische Verdichtung mit dynamischer Verdichtung	59
5.3	Versuche	59
5.3.1	Referenzprobekörper	59
5.3.2	Lehm mit Flachsgewebe	63
5.3.3	Lehm mit Filz	66
5.3.4	Lehm mit Kasein	69
5.3.5	Lehm mit Kalk gelöscht	73
5.3.6	Lehm mit Holzfasern	77
5.3.7	Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse	82
5.4	Conclusio	83
A	Datenblätter	87

1 Einleitung und Grundlagen

Das Bauen von Behausungen und Gebäuden ist nahezu seit Beginn der Menschheitsgeschichte ein zentrales Element, primär zum Überleben der Menschen selbst, da sie Schutz vor rauem Wetter bieten. Sekundär steigert ein Dach über dem Kopf das Wohlbefinden des Menschen enorm. Angefangen von primitiven Bauten vor Jahrtausenden, bis hin zum modernen Passivhaus oder Smart-Home, wurden mannigfaltige technische Errungenschaften wie die gezielte Entwicklung von Baustoffen insbesondere Stahl oder Stahlbeton gemacht. Dies beeinflusste die Art des Bauens, aber auch den Umgang mit alten sowie neuen Baustoffen gravierend. Dabei zählt Bauen mit Lehm bereits seit langer Zeit zu den anerkannten Bauweisen, die sich bewährt haben. Zum heutigen Zeitpunkt lebt etwa ein Drittel der Menschheit in Lehmhäusern, davon die Mehrzahl in Entwicklungsländern [1]. Mit dem rasenden technologischen Fortschritt ist die Lehmbauweise oft aus dem Fokus der Menschen geraten, da sie im Vergleich zur heute üblichen Massivbauweise mit Stahlbeton zurzeit weniger ökonomisch (hinsichtlich des großen Zeitaufwandes, der für die lageweise Verdichtung der Stampflehmsschichten benötigt wird, was viel Personal über eine lange Zeit bindet) und somit auch weniger profitabel ist. Bedingt durch die Verarbeitung des Naturmaterials Lehm ist es zurzeit nicht möglich, mit den hochoptimierten, zeitlich eng getakteten Abläufen der Bauindustrie mitzuhalten.

Mit dem aktuell viel diskutierten Klimawandel, der mittlerweile oft bereits als Klimakrise tituliert wird, ist es dringend notwendig, ökologische Bautechnologien, die mit lokal gewonnenen Grundmaterialien auskommen, wissenschaftlich zu erforschen und deren Einsatz zu forcieren, dass Bauen *besser*, im Sinne von umweltfreundlicher, nachhaltiger und qualitativ hochwertiger wird.

Aus diesem Grund dient die vorliegende Arbeit dazu, Grundlagenforschung für das Bauen mit dem Naturmaterial bzw. Naturbaustoff Lehm zu leisten und grundlegende mechanische Eigenschaften von gestampften Lehmprobekörpern zu erheben. Im Speziellen werden die für den trockenen Ausbau von Gebäuden relevante Festigkeiten ermittelt, welche in Bezug auf Lehmplatten wichtig sind. Notwendig machen dies einerseits die fehlende Datenlage und die für diese Arbeit erstmals verwendeten natürlichen Rohstoffe in Kombination mit Lehm. Es soll der Weg ebnet werden für weiterführende Forschungen, die das Potential dieses Materials aufzeigen können.

In dieser Diplomarbeit werden drei wesentliche mechanische Eigenschaften von Lehm mit und ohne Additiven untersucht, namentlich die:

- Biegezugfestigkeit
- Druckfestigkeit
- Haftzugfestigkeit

des Lehmes, respektive die genannten Festigkeiten des Verbundes zwischen Additiven und dem Lehm selbst.

Parallel zu dieser Arbeit wird eine weitere Diplomarbeit verfasst, welche die essentiellen bauphysikalischen Eigenschaften derselben Lehmmischungen mit und ohne Additive untersucht, nämlich den Wasserdampfdiffusionswiderstand, die Sorptionseigenschaften und die Wärmeleitfähigkeit. Um eine kollektive Basis zu schaffen, werden die Wahl der Materialien und der Probekörperzusammensetzungen durch beide Autoren getroffen und die Prüfkörper gemeinsam hergestellt. Daher finden sich inhaltliche Überschneidungen in Teilen der Arbeiten. Der Autor der die bauphysikalischen Eigenschaften behandelnden Diplomarbeit ist Tobias Müller.

1.1 Lehm

Schröder¹ schreibt:

Lehme sind Teil des unter dem Einfluss von Witterung, Flora und Fauna umgebildeten obersten Bereiches der festen Erdkruste und deshalb nahezu überall verfügbar.

Das Bodenprofil lässt sich im Wesentlichen in drei Horizonte unterteilen. Der oberste Horizont besteht aus ausgelaugtem, humusreichem Boden. Darunter liegt der Unterboden mit bestimmten, ausgefallten Stoffen und wiederum unter dem Unterboden liegt das unverwitterte Ursprungsgestein. Für die Verwendung als Baulehm ist nur der humusfreie Unterboden geeignet (ohne organische Anteile) [2]. In Abbildung 1.1 ist ein vereinfachtes Bodennormalprofil zu sehen.

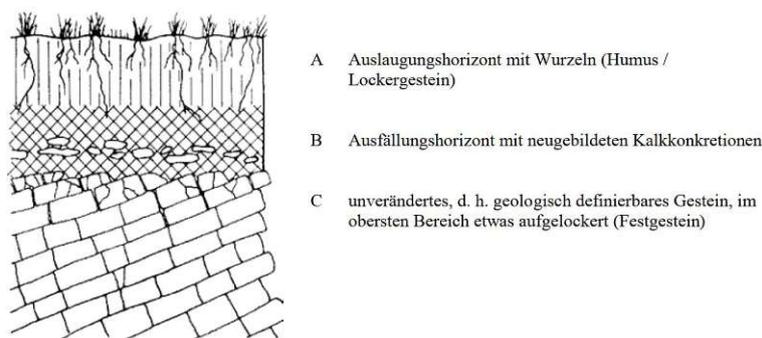


Abb. 1.1: Vereinfachter Bodenaufbau im Normalprofil, [2]

1.1.1 Zusammensetzung und Sieblinie

Bei mineralischen Böden kann zwischen Grobkorn und Feinstkorn unterschieden werden. Das Grobkorn setzt sich aus Kies, Sand und Schluff zusammen, während Ton das Feinstkorn bildet. Diese Haupterdarten liegen im Boden mit unterschiedlicher Verteilung gemischt vor. Lehm ist ein Vertreter der gemischtkörnigen Böden [2]. Kies, Sand und Schluff bilden Füllstoffe und Ton das Bindemittel, das den Lehm zusammenhält [3]. Diese Unterscheidung wird nach der Größe der einzelnen Körner vorgenommen. Das Kieskorn hat einen Durchmesser von 2,0 mm–63 mm, das Sandkorn 0,063 mm–2,0 mm, Schluff liegt zwischen 0,002 mm–0,063 mm und die kleinste Fraktion verfügt über Durchmesser <0,002 mm [4].

Um das Verhältnis der Bestandteile Kies, Sand, Schluff und Ton zueinander quantifizieren zu können, wird die Sieblinie herangezogen. Dafür wird der prozentuelle Anteil des Kornes (des Korndurchmessers) bezogen auf die Gesamtmasse angegeben und die Korngröße auf einer logarithmischen Skala aufgetragen [3]. Anhand der Kornverteilungslinie kann der Tonanteil

¹[2, S.62]

abgelesen und dadurch die Bindekraft des Lehmest abgeschätzt werden. Bei einem Lehm mit hohem Tonanteil spricht man von fettem Lehm, ein Lehm mit niedrigem Tonanteil wird als mager bezeichnet. Diese Unterscheidung führt zum Begriff *Bindigkeit* und ist wichtig, denn der Tonanteil und somit die Bindekraft ist ein entscheidender Faktor, was die Festigkeit und das Schwindmaß des Lehmest bei Wasserverlust betrifft. Generell gilt, dass ein fetter Lehm gegenüber einem magerem Lehm über eine höhere Festigkeit im trockenen Zustand verfügt. Allerdings geht dies damit einher, dass der fette Lehm während des Austrocknens mehr schwindet und mehr bzw. größere Risse bildet als ein magerer Lehm. Das kann im konstruktiven Ingenieurbau zu Problemen führen, wenn dies nicht in der Planung mit berücksichtigt wird. Auf der folgenden Seite in Abbildung 1.2 aus dem Handbuch Lehmestbau von Minke [1] sind verschiedene Sieblinien von fettem bis magerem Lehm dargestellt.

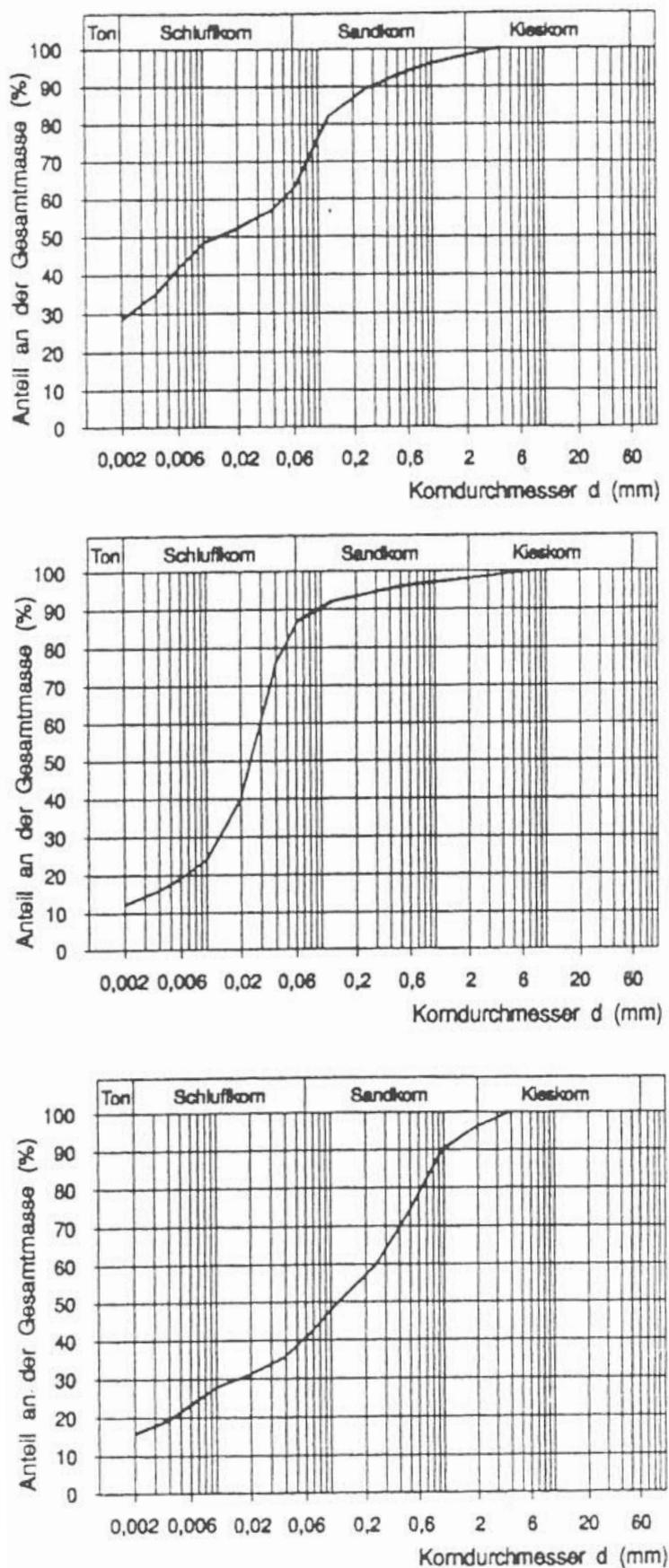


Abb. 1.2: Kornverteilung Lehm v.o.n.u.: tonig, schluffig, stark sandig, [1]

1.2 Ton als Bindemittel

Wie oben beschrieben, fungiert der Ton im Lehm als Bindemittel, welcher Kies, Sand und Schluff bindet. Ton ist ein Verwitterungsprodukt aus Feldspat und anderen Mineralien. Feldspat besteht aus Aluminiumoxid, einem zweiten Metalloxid (Bor- oder Siliziumoxid) und Kieselsäure. Lösen sich durch Verwitterung die leichter löslichen Kaliumverbindungen heraus, so entsteht kieselsaure Tonerde, welche in der Mineralogie als Kaolinit bezeichnet wird [1]. Das Zweischichttonmineral Kaolinit ist aus 20 bis 100 Mineralschichten aus jeweils einer Oktaeder- und einer Tetraederschicht aufgebaut. Das Kaolinit-Tonmineral verfügt über eine mittlere Größe von ca. $0,5\ \mu\text{m}$ - $4\ \mu\text{m}$ und einer spezifischen Oberfläche von etwa $10\ \text{m}^2/\text{g}$. Im Gegensatz dazu ist beim Dreischichttonmineral eine Oktaederschicht von zwei Tetraederschichten umschlossen. Es kann zwischen quellfähigen und nicht quellfähigen Dreischichttonmineralen unterschieden werden. Alle Dreischichttonminerale haben ca. $0,2\ \mu\text{m}$ Durchmesser und eine spezifische Oberfläche von $1000\ \text{m}^2/\text{g}$ [5].

Die Stabilität der Mineralstruktur ist ein entscheidender Faktor, was die Plastizität und das Schwinden und Quellen betrifft. Die instabilen Kristallgitter der Dreischichttonminerale haben zur Folge, dass die Plastizität und die Schwind- und Quellneigung erhöht wird. Die Form und Art der Berührung der Tonmineraloktettblättchen haben große Auswirkungen auf die Verarbeitbarkeit der Baulehme, die Trocknung und die mechanischen Eigenschaften der fertigen Bauprodukte. Unterschieden wird zwischen punktförmiger, linienförmiger und flächiger Berührung, wie in Abbildung 1.3 dargestellt. Dabei ist die flächige Form der Berührung der Kristallblättchen untereinander die stabilste. Die punktförmige, offene Struktur kann Wasser schnell verdunsten lassen, wodurch die Formänderung beim Schwinden so stark reduziert ist, dass diese für bautechnische Zwecke nicht mehr relevant ist. Die Quellfähigkeit der Tonminerale kommt durch die Kationen-Austauschkapazität zustande: Je nach Art der Kationenbelegung variiert die Plastizität der Lehme und Tone stark. Dies hat mit der Fähigkeit, zusätzlich Wasser binden zu können, zu tun. Dabei ist die Ersetzbarkeit bestimmter Ionen durch gewisse Ionen leichter als mit anderen Ionen (Hofmeisterreihe). Die Eigenschaft, solche Ionen zu tauschen wird Kationen-Austauschkapazität genannt. Kaolinite - also Zweischichttonminerale verfügen über eine niedrige, Dreischichttonminerale wie Montmorillonite über eine hohe Kationen-Austauschkapazität [2]. Die quellfähigsten Tonminerale sind in der Lage, bei Wasserzufuhr ihr ursprüngliches Volumen um etwa 500-700% zu vervielfachen.

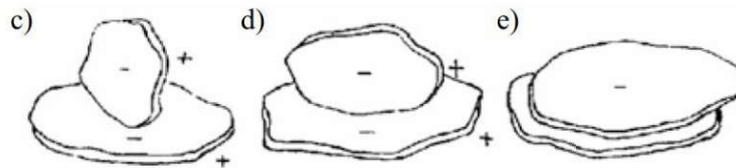


Abb. 1.3: Formen der Berührung der Kristallplättchen: c) punktförmig, d) linienförmig, e) flächig [2]

Die bindigen Eigenschaften der Lockergesteine, welche Tonminerale enthalten, beruhen auf physikalischen Kräften, genauer Oberflächenkräften mit Wechselwirkungsmechanismen zwischen fester und flüssiger Phase des Wassers. Diese elektrischen Oberflächenkräfte bewirken eine Anordnung von Wassermolekülen in Form zusammenhängender Wasserfilmen um die Festteilchen. Direkt an der Oberfläche der festen Anteile verhält sich das angelagerte Wasser infolge der extrem hohen Oberflächenspannungen wie ein fester Körper (Sorptionswasser). Umso größer der Abstand wird, desto viskoser wird das Wasser (Solvationswasser). Ab einem Abstand von

etwa $0,5\ \mu\text{m}$ wird das Wasser wieder *flüssig*. Neben diesem flüssigen Wasser befindet sich in den feinen Porenräumen Wasserdampf. Die Oberflächenkräfte sowie die Dicke der Wasserhüllen hängen unter anderem von der spezifischen Oberfläche der Teilchen ab. Denn je kleiner diese sind, desto stärker ist die Bindekraft. Umso instabiler die Kristallstruktur der Partikel, desto dicker die Wasserhüllen, sofern ausreichend Wasser verfügbar ist. Wird die Wasserhülle dicker, dann wird das Kornskelett instabiler und die Verarbeitbarkeit verbessert sich durch das leichtere Aneinander vorbeigleiten der Teilchen. Durch Wasserstoffbrückenbindungen haften die Teilchen aneinander (genauer die kleineren an den größeren Teilchen). Hier gilt, dass die Bindung stärker wird, je dünner die Filmwasserschicht ist. Wenn das Korngemisch austrocknet und sich somit das Porenwasser verringert, verkleinert sich auch der Abstand zwischen den Körnern. Dadurch kann das Kornskelett eine Haftfestigkeit erlangen, was in der Bodenmechanik als *Kohäsion* bezeichnet wird [2].

1.3 Technische Eigenschaften von Lehm

In diesem Kapitel werden wesentliche, technische Eigenschaften des Lehmes beschrieben. Es sind dies die Festigkeitseigenschaften in Abhängigkeit der Konditionierung, die Kraftübertragung im Lehm mit und ohne Additive oder Fasern und das Bruchverhalten von Lehmkörpern.

1.3.1 Festigkeitseigenschaften in Abhängigkeit der Konditionierung

Untersuchungen zum Materialverhalten von Stampflehm von Dierks und Ziegert [6] zeigten, dass die Austrocknungsbedingungen einen Einfluss auf die Festigkeit von Stampflehm haben. Es wurden variierende Festigkeiten bei verschiedenen Austrocknungsgeschwindigkeiten, gekoppelt an die dabei herrschenden Temperaturen, festgestellt. Es ist im Interesse aller Beteiligten, dass die Trocknung von Prüfkörpern und später des Baustoffes möglichst rasch geschieht. In der bereits zurückgezogenen DIN 18952 von 1956 wurde festgehalten, dass Probekörper ab dem 6. Trocknungstag mit einer Temperatur von 60°C getrocknet werden dürfen, wodurch sich die Trocknung gegenüber jener bei Raumtemperatur beschleunigt. Proben, welche bei $23 \pm 2^\circ\text{C}/50 \pm 5\%$ getrocknet werden, weisen eine höhere Ausgleichsfeuchte auf, als bei 60°C getrocknete Proben. Der Unterschied des Feuchtegehaltes ist optisch und haptisch nicht erkennbar. Alle Probekörper erscheinen trocken. Bei den mit ab dem 6. Tag bei 60°C bis zur Massenkonstanz konditionierten Proben werden in der Baupraxis nicht erreichbare, hohe Festigkeiten gemessen, die am Bauwerk nicht zu erreichen sind. Wenn nun die beschleunigt (unter erhöhter Temperatur) getrockneten Probekörper nach der Trocknung unter raumklimatischen Bedingungen genug Zeit haben die Ausgleichsfeuchte anzupassen, stellen sich ähnliche Festigkeitswerte wie bei den langsam getrockneten Proben ein. Dieser Zeitraum kann jedoch bis zu neun Wochen betragen, was in Summe einer noch längeren Trocknungszeit als jener der unbeschleunigten Austrocknung entspricht. Voraussetzung für die vergleichbaren Festigkeitswerte ist, dass keine irreversiblen Veränderungen in der Mineralstruktur geschehen. Nach Dierks und Ziegert kann eine Trocknung ab 50°C bereits irreversible Veränderungen an bestimmten quellfähigen Schichtsilikaten verursachen. Daher wird eine künstliche Trocknung über 40°C von Dierks und Ziegert nicht empfohlen [6]. Aus Sicht des Autors kann eine schnellere Trocknung in Erwägung gezogen werden, wenn für die gewünschte Materialzusammensetzung Festigkeitsprüfungen von unter verschiedenen Bedingungen getrockneten Proben angeordnet werden. In Abbildung 1.4 ist aus dem oben beschriebenen Sachverhalt dargestellt, wie sich die Trocknungsparameter relative Luftfeuchte und Temperatur auf die Druckfestigkeit auswirken. Dabei wurde die Trocknung unter den Klimabedingungen eines Prüflabors, im Trockenschrank bei 30°C und im Trockenschrank bei 60°C verglichen.

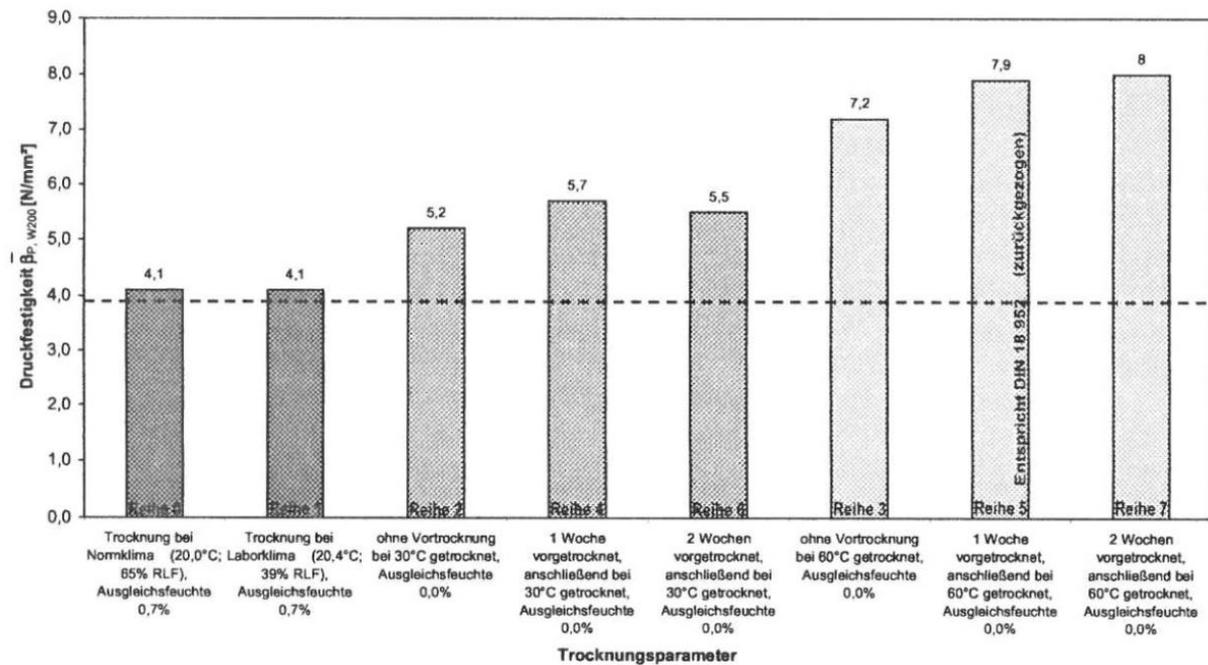


Abb. 1.4: Festigkeiten Stampflehm nach verschiedenen Konditionierungsbedingungen (Temp., rel. Luftfeuchte), [6]

1.3.2 Kraftübertragung im Lehm mit und ohne Additiven/Fasern

Ausgehend von der in Kap. 1.2 beschriebenen Kohäsion wachsen die Anziehungskräfte in den Porenwickeln (kleinste mit Wasser- und Feinsteilchen gefüllte Räume zwischen den Mineralkörnern), wodurch sich im gesamten Korngefüge eine stabile Festigkeitsmatrix, die mit der des Betones vergleichbar ist, ausbildet. Dadurch wird eine Lastübertragung von Korn zu Korn über Druck ermöglicht, was die Belastbarkeit von Bauteilen aus Lehm auf Druck gewährleistet. Dies ist in Abbildung 1.5 sichtbar. Es ist zu erwähnen, dass die Festigkeit des einzelnen Grobkornes jedoch immer größer ist, als die Festigkeit des Haftverbundes (der Kohäsion). Brüche erfolgen daher immer entlang der Oberflächen der Grobkörner bzw. der Poren. Da der Haftverbund physikalisch und nicht auch chemisch, wie etwa bei Beton, zustande gekommen ist, ist dieser unter Einwirkung von Wasser auch reversibel [2].

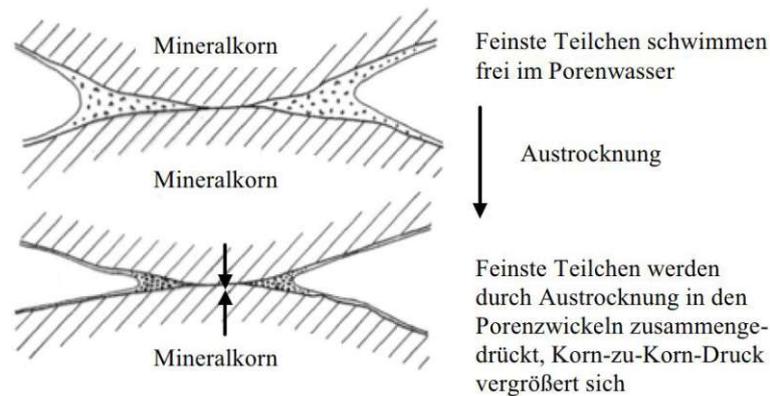


Abb. 1.5: Lastübertragung im Lehm durch *Korn-zu-Korn*-Druck, [2]

Werden nun Fasern als Zusätze verwendet, liegt der Kraftübertragung zwischen Lehm und Fasern (Holz, Filz, Flachs) nach Schubert [7] folgender Mechanismus zu Grunde:

Die Kraftübertragung erfolgt in jede Einzelfaser über Schubspannungen in der Grenzfläche Faser/Lehmmatrix. Die Dehnungsverhältnisse in der Matrix, die Schubspannung in der Grenzfläche und die Zugspannung in der Faser sind nach Schubert für eine elastische Matrix in untenstehender Abbildung 1.6 dargestellt. Die Dehnung der Fasern ist aufgrund des höheren E-Moduls gegenüber des Lehmes geringer. Dies verursacht eine Verschiebung zwischen Matrix und Faseroberfläche, die zum Faserende hin größer wird und somit Schubspannungen in der Grenzschicht hervorruft. Umso elastischer sich die Matrix verhält, also umso niedriger der E-Modul der Matrix ist, desto höher sind die Schubspannungsspitzen am Faserende. Wird nun eine Kraft in die Faser eingeleitet, baut sich vom Faserende ausgehend eine Zugspannung auf, die zur Mitte der Faser hin konstant wird (Voraussetzung dafür ist eine hinreichend lange Faser) [7].

Die volle Mitwirkung der Faser auf Zug und somit ihre Beanspruchung bis zur Bruchfestigkeit kann erreicht werden, wenn ein kompletter Schubverbund zwischen Faser und Matrix herrscht, was aber in der Praxis nahezu nicht erreicht werden kann, vgl. Kap 5.

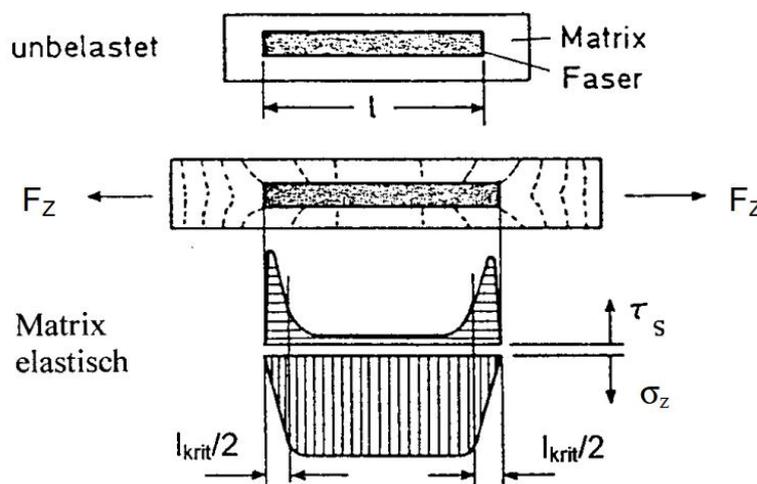


Abb. 1.6: Lastübertragung Lehmmatrix-Faser, [7]

Die oben angesprochene hinreichende Faserlänge, die vonnöten ist, um die auf den Verbundwerkstoff wirkenden Kräfte vollständig auf die Faser übertragen zu können, wird als kritische Faserlänge l_{krit} bezeichnet [7]:

$$l_{krit} = \frac{d}{2} \cdot \frac{\sigma_{Z,F}}{\tau_{S,FM}} \quad (1.1)$$

mit

l_{krit} ... kritische Faserlänge

d ... Faserdurchmesser

$\sigma_{Z,F}$... Zugfestigkeit der Faser

$\tau_{S,FM}$... Schubfestigkeit der Grenzfläche Faser/Matrix

Schubert schreibt, dass der berechnete Wert der kritischen Faserlänge oft bis zu zwei Größenordnungen zu niedrig ist, da meist weder eine optimale Haftung zwischen Matrix und Faser noch ideal visko-elastisches Verhalten der Matrix gegeben sind. Bei einer reinen Lehmmatrix kann ohnehin nur elastisches Materialverhalten zugrunde gelegt werden und daher muss von einer

wesentlich größeren notwendigen Faserlänge ausgegangen werden. Andernfalls kommt es nicht zum vollen Spannungsaufbau in der Faser (siehe Abbildung oben). Wenn die kritische Faserlänge nicht erreicht wird, bewirken hohe Schubspannungen an den Faserenden das Ablösen der Matrix von den Faserenden und damit den Übergang zum reibungsbehafteten Gleiten in der Grenzfläche [7]. Dadurch kann nicht die volle Biegetragfähigkeit des Verbundwerkstoffes erreicht werden (siehe Kap. 5.4).

Am Faserende tritt durch Kerbwirkung eine Kerbspannungskonzentration auf. Diese Kerbwirkung überwiegt, solange der kritische Fasergehalt unterschritten ist. Durch die zu niedrige Faserkonzentration in der Lehm-matrix werden die einzelnen Fasern lokal zu stark beansprucht, was zu einem Abreißen der Faserenden führt. Oberhalb des kritischen Fasergehaltes nimmt die Festigkeit des Verbundwerkstoffes mit steigendem Faseranteil zu. Der Fasergehalt kann jedoch nicht beliebig erhöht werden, da ab einem bestimmten Gehalt keine vollständige Einlagerung der Fasern in der Matrix ohne gegenseitige Beeinflussung der Fasern mehr möglich ist.

Einleuchtend ist auch der Einfluss der Faserrichtung in Bezug auf die äußere Beanspruchung. Bei unidirektionaler Verstärkung mit Endlosfasern ist das anisotropische Verhalten am deutlichsten ausgeprägt. Im Gegensatz dazu weisen kurzfaserverstärkte Materialien einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Richtungsabhängigkeit auf [7]. Denn wenn die Fasern homogen in der Matrix verteilt sind und der Fasergehalt und die Faserlängen ausreichend hoch sind, können für jede beliebige Lastwirkungsrichtung stets genügend Fasern in der Matrix für eine Übertragung der Zugkräfte aktiviert werden.

1.3.3 Bruchverhalten

In der Dissertation von Schubert wurde das Bruchverhalten in faserverstärkten Stoffen bei Zug- und Biegebeanspruchung untersucht. Die Entstehung von Rissen und das Weiterreißen ist demnach auf folgende Mechanismen zurückzuführen [7]:

- herstellungsbedingte Mikrorisse und Mikrohöhlräume
- die Dehnungsvergrößerung der weichen Matrix zwischen den steifen Fasern bei Beanspruchung senkrecht zum Faserverlauf
- die nicht optimale Haftung zwischen Faser und Matrix
- die Querkontraktionsbehinderung der Matrix
- die Kerbwirkung der eingelagerten Fasern auf die Matrix

Bei parallel zur Beanspruchungsrichtung orientierten Fasern kommt es bei nicht vollständiger Phasenhaftung zum Herausziehen der Fasern, zur Lochbildung und kaum zu Faserbrüchen mit einer sehr ungleichmäßig ausgebildeten Bruchfläche. Bei sehr festem bzw. (theoretisch erreichbarem) vollständigem Verbund zwischen Matrix und Verstärkungsfasern über der kritischen Länge kommt es durch die hohen lokalen Spannungen im Faserrand zur teilweisen Ablösung der Faser von der Matrix, was ein Gleiten der Faser in der Matrix aufgrund der bestehenden Dehnungsunterschiede zur Folge hat. Wird die Zugbeanspruchung erhöht, bricht die Faser in oder nahe der Rissebene und wird bei weiterer Rissaufweitung aus der Matrix herausgezogen (pull out). Bei kurzfaserverstärkten Verbundwerkstoffen werden die Fasern oft aus der Matrix ausgezogen ohne selbst zu brechen, während bei langfaserigen Materialien die Fasern öfter brechen. Bei senkrechter oder schräger Orientierung der Fasern zur Belastungsrichtung erfolgen Grenzflächentrennungen und Lochbildungen an und zwischen den Fasern, sofern die Haftung der Fasern an der Matrix gering oder nicht vorhanden ist. Bei guter Grenzflächenhaftung breitet sich

der Riss entlang der Grenzschicht oder in der Matrix aus und verläuft relativ glatt. Schräg liegende Fasern werden aus der Matrix gelöst oder brechen [7]. Die verschiedenen Schädigungsarten sind in Abbildung 1.7 zu sehen. Für eine optimale Verbundwirkung ist eine homogene Verteilung von Fasern mit einer hohen Schlankheit und einer ausreichenden Menge (überkritischer Bereich) erforderlich. Die höchstmögliche Schlankheit von Fasern mit guter Haftung in der Matrix, sowie die kritische Fasermenge sind empirisch durch Versuche zu ermitteln.

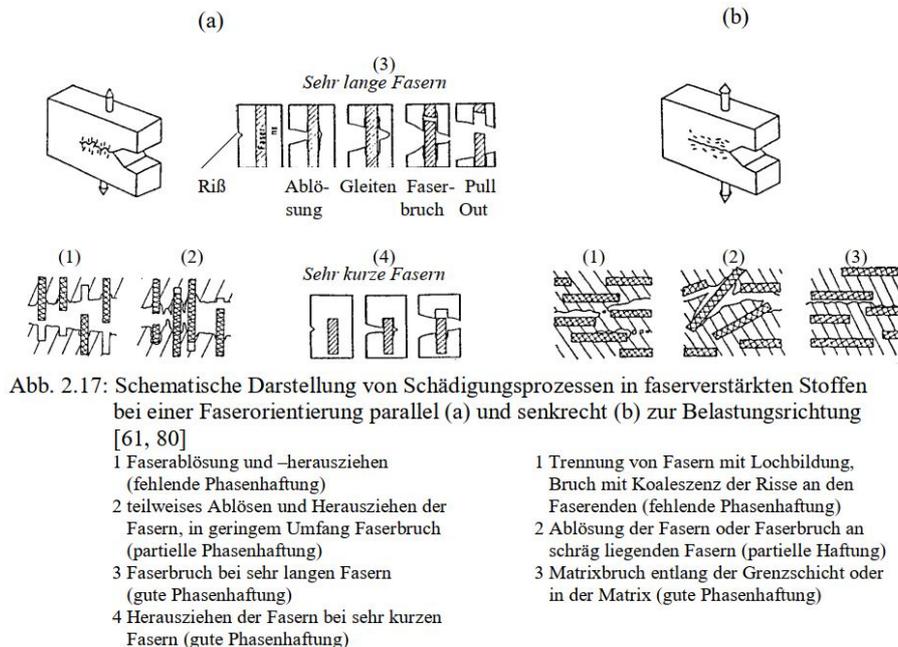


Abb. 2.17: Schematische Darstellung von Schädigungsprozessen in faserverstärkten Stoffen bei einer Faserorientierung parallel (a) und senkrecht (b) zur Belastungsrichtung [61, 80]

Abb. 1.7: Schädigungen in faserverstärkten Stoffen, [7]

1.4 Einfluss von Lehmbaustoffen auf die Gesundheit des Menschen

Bei Baumaterialien, die für Bauwerke verwendet werden mit denen der Mensch in Berührung kommt, gilt es insbesondere die Inhaltsstoffe derart auszuwählen, dass sie keinen negativen Einfluss auf die Gesundheit des Menschen haben. Da der Lehm teils wandbildende Elemente darstellt, welche die innerste Schicht der Gebäudehülle bilden, ist dies besonders kritisch. Insbesondere dann, wenn die zahlreichen Studien beachtet werden die besagen, dass sich der Mensch mehr als 90% der Zeit in Gebäuden aufhält (vgl. [8]). Prinzipiell besteht der Lehm - sofern er nicht verunreinigt ist - komplett aus natürlichen Materialien, die in ihrer unbehandelten Form weder umweltschädlich noch toxisch für den Menschen sind. Bei der Verarbeitung werden außerdem nur Wasser und natürliche Additive verwendet, durch welche ebenfalls keine gesundheitlichen Beeinträchtigungen zu erwarten sind - im besten Fall hat die feuchtepuffernde Wirkung positive Auswirkungen auf das Raumklima und somit die Gesundheit.

1.4.1 Luftfeuchte und Schimmel

Durch die offenporige Beschaffenheit von Lehm ist eine weitverbreitete Angst der Menschen, dass in den Lehmbaustoffen rasch Schimmel entsteht. Diese Angst kann jedoch schnell genommen werden, wenn man sich vor Augen hält, wie Lehm mit Feuchtigkeit interagiert: Lehm ist in der Lage, einen Teil des in der Luft enthaltenen Wasserdampfes in seine freien Porenräume

einzulagern und diesen bei sinkender Luftfeuchtigkeit vollständig wieder abzugeben. Er verfügt über die Eigenschaft, dies im Vergleich zu anderen mineralischen Baustoffen sehr schnell und in großer Menge tun zu können. Untersuchungen von Minke haben ergeben, dass durch diese Pufferwirkung bei ausreichend viel Lehmwandfläche (Lehmsteine, Lehmstränge und Leichtlehm) die Luftfeuchtigkeit in einem Wohnhaus über einen Zeitraum von fünf Jahren bei durchschnittlich $50 \pm 5\%$ lag [1]. Insbesondere durch die Geschwindigkeit der Wasserdampfaufnahme durch den Lehm, können so schlagartig auftretende, hohe Wasserdampfkonzentrationsspitzen, die etwa durch Feuchteintrag beim Kochen oder Duschen entstehen, abgefangen werden. Minke hat dies untersucht: In einem Bad, bei dem alle Wände aus lehmgefüllten Baumwollschläuchen bestehen, steigt die relative Luftfeuchtigkeit selbst bei langem Duschen nicht über 70% [1]. Ebenfalls von Minke am Forschungslabor für Experimentelles Bauen an der Universität Kassel (FEB) durchgeführte Untersuchungen zeigen, dass etwa bei schlagartigem Anstieg der Raumluftfeuchte von 50% auf 80% die erste 1,5 cm starke Schicht einer Lehmsteinwand in 48 Stunden ca. 300 Gramm Wasser je 1 m^2 Wandfläche aufnimmt, während andere gebräuchliche Baustoffe viel weniger aufnehmen. Wird der Tonanteil im Lehm reduziert, verringert sich die Aufnahme von Wasser in der Wandfläche. Dargestellt ist dies in untenstehender Grafik (Abbildung 1.8) aus dem Handbuch Lehmbau von Minke [1].

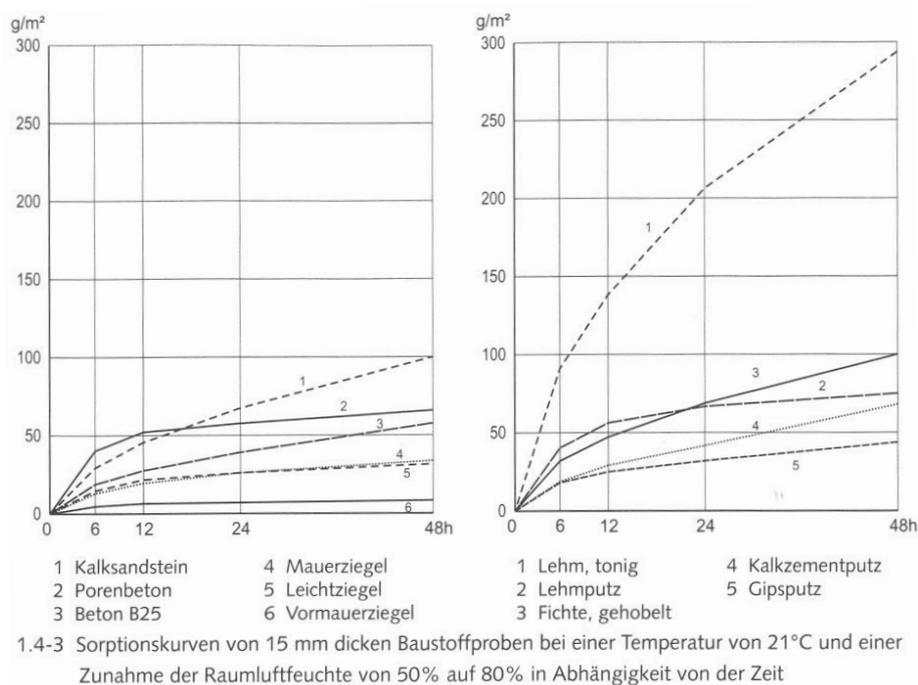


Abb. 1.8: Sorptionskurven verschiedener Baustoffe, [1]

Wenn in einem Raum mit hoher Luftfeuchtigkeit Kondenswasser ausfällt, kann sich auf Bauteiloberflächen Schimmel bilden, was jedoch kein lehmspezifisches Problem darstellt, sondern generell bei allen Baustoffen der Fall sein kann [2]. Prinzipiell hat aber auch hier der Lehm einen Vorteil gegenüber anderen Baustoffen, denn dieser ist an der Oberfläche aufgrund der schnellen Feuchteabgabe weniger schimmelfähig als andere nicht basische Bauteiloberflächen [9]. Dennoch ist bei jedem verwendeten Baustoff ausreichendes Lüften jedenfalls unentbehrlich für ein gesundes Raumklima.

1.4.2 Strahlenbelastung

Wenn von Strahlenbelastung gesprochen wird, ist generell zu unterscheiden zwischen:

- Radioaktivität
- Hochfrequente elektromagnetische Strahlung

Radioaktivität Der Mensch ist - sowie alle Lebewesen auf der Erde - einer natürlichen Exposition durch ionisierende Strahlung ausgesetzt. Hier wird unterschieden zwischen kosmischer, terrestrischer und inkorporierter Strahlung, sowie aus der vom Menschen veränderten natürlichen Strahlenexposition in Form von Baustoffen und der Inhalation von dem radioaktiven Gas Radon und der von seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten ausgehenden α -Strahlung [1], [2]. Die vom Menschen ausgehende Belastung findet sich im Bereich der medizinischen Diagnostik und Therapie, sowie die Folgen von Unfällen in Atomkraftwerken (Tschernobyl, Fukushima). Aus letztem Grund herrscht in der Bevölkerung immer wieder Unsicherheit bezüglich der radioaktiven Strahlenbelastung, die durch den Baustoff Lehm ausgeht. Untersuchungen von Minke bezüglich β und γ -Strahlung ergaben bei den untersuchten Lehmen keine höheren Werte als bei den geprüften Betonen und gebrannten Ziegeln. Teilweise zeigte sich sogar eine höhere Strahlenbelastung bei Ziegeln [1]. Oben erwähnte Strahlenbelastung durch die von den Zerfallsprodukten von Radongas ausgehende α -Strahlung wird bereits von der Haut zurückgehalten, kann jedoch inhaliert werden und Lungenschädigungen bis hin zu Krebs verursachen. Daher wird die Exhalationsrate von Radon als wichtige Größe genannt. Untersuchungen der OECD in Deutschland haben ergeben, dass sich bei reinem Lehm von allen natürlichen mineralischen Baustoffen die geringste Radonbelastung einstellt [10]. Bei Untersuchungen im Jahr 1993 stellte Halder aufgrund der Auswertung von 6.000 Wohnungen fest, dass die Radonabgaben verschiedener Baustoffe (ausgenommen Phosphorit) zu geringen Innenraumkonzentrationen führt. Außerdem kommt die Radonbelastung in Innenräumen vor allem aus dem Erdreich [1].

Hochfrequente elektromagnetische Strahlung Die hochfrequente elektromagnetische Strahlung, die von gepulsten Frequenzen ausgeht, hat physiologische Auswirkungen auf den menschlichen Körper, nämlich thermische und nichtthermische Auswirkungen. Bei den thermischen Wirkungen erhöht sich die kinetische Energie der Moleküle beim Eintritt der Strahlung in den menschlichen Körper, was eine lokale Temperaturerhöhung nach sich zieht. Nicht thermische Wirkungen sind noch nicht ausreichend erforscht, da der Nutzungszeitraum für Langzeitstudien noch zu kurz ist. Es wird von Verhaltensänderungen, neurologischen Effekten, Erhöhung des Krebsrisikos, Schlafstörungen, Einfluss auf den Hormonhaushalt und den Stoffwechsel, Stressreaktionen, Effekte auf die DNA usw. ausgegangen [2]. Es kann gesagt werden, dass die hochfrequente Strahlung von Baustoffen und Bauteilen umso besser abgeschirmt wird, desto dicker das Bauteil ist. Dieses Erkenntnis wurde durch Untersuchungen zur Abschirmung hochfrequenter Strahlung durch Baustoffe, durchgeführt am Institut für HF-, Mikrowellen- und Radartechnik der Universität der Bundeswehr München (Prof. Peter Pauli und Dr.-Ing. Dietrich Moldan), gewonnen. Zusammengefasst schneiden Lehmstoffe im Vergleich zu anderen mineralischen Baustoffen sehr gut ab [1], [2]. In der vorliegenden Arbeit soll an dieser Stelle jedoch nicht weiter auf das Thema eingegangen werden, da die dünnen Lehmplatten einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Abschirmung der Strahlung im Bauwerk haben. Ein Ansatz um einen gewünschten Grad an Abschirmung gegen HF-Strahlung zu erreichen, wäre beispielsweise ein Systemaufbau einer Trockenlehmplatte mit einer Armierung aus einem feinmaschigen metallischen Gitter, welches nach oben genannter Untersuchung bei einer Maschenweite von 1x1mm über den gesamten Frequenzbereich von 2.5 GHz bis 5 GHz eine Dämpfung von 30 dB, was 99,9% entspricht, bewirkt.

Da zukünftig mit den neuen Mobilfunkgenerationen noch höher getaktete Frequenzbänder bedient werden, wird die Abschirmwirkung voraussichtlich noch besser, als dies bisher ohnehin schon der Fall ist.

2 Lehm als (Trocken-)Baustoff

2.1 Baustoff Lehm - Tradition und Zukunft

Seit Jahrtausenden (etwa seit 8.000 Jahren) sind Lehmbauten bekannt. Interessant ist, dass Lehmbauten sowohl für Wohnzwecke, aber auch für Befestigungsanlagen und Kultbauten verwendet wurden. Um nur einen kurzen Abriss der historischen Bedeutung von Lehm im Bauwesen zu geben, sind ein paar Beispiele aufgeführt: Die vor etwa 4.000 Jahren errichtete Chinesische Mauer bestand ursprünglich fast ausschließlich aus Stampflehm. In trockenen Klimazonen, wo es naturgemäß kein Holz zur Verwendung im Bau gibt, wurden über die Jahrhunderte Techniken entwickelt, mit denen ungebrannte Lehmsteine zur Gewölbeausbildung verwendet wurden, ganz ohne Holzträger [1]. Auch im Alten Ägypten wurde bereits mit Lehmsteinen gearbeitet. Hier wurde zuallererst der Gewölbebau mit luftgetrockneten Lehmsteinen verwirklicht [2].

In Deutschland ist Lehm bereits vor vielen tausend Jahren als Füllmaterial von Palisaden- und Flechtwerkwänden verwendet worden. Etwa im 9. oder 10. Jahrhundert n.Chr. ist ein Steinfundamenthaus mit Lehmstampfwänden oder Wellerwänden in Weimar (Deutschland) errichtet worden [1].

In den letzten Jahrhunderten ist in großen Teilen unserer Welt das Wissen um vielfältige alte Lehmbautechniken verloren gegangen. Durch die Globalisierung und die günstigen Herstellungskosten wird immer häufiger selbst in den ärmsten Entwicklungsländern Beton eingesetzt. Wer Lehm verwendet, wird oft als Mensch in Armut gesehen. Daher wird vor allem in urbanen Gebieten mit Beton oder Ziegeln gebaut, sofern dies leistbar ist. Lehm als Baustoff hat nichtsdestotrotz in ländlicheren Regionen der Entwicklungsländer bis heute überdauert [2].

Nach der Ölkrise von 1973 wurde den Menschen bewusst, dass die Energieressourcen der Erde endlich sind. Der Energieverbrauch kann daher nicht ungebremst und parallel zum Wirtschaftswachstum verlaufen. Eine starke Zunahme der CO₂-Konzentration ist anthropogen und Mitverursacher des Treibhauseffektes resultierend in einer globalen Erwärmung der Atmosphäre. Der Meeresspiegel ist im 20. Jh. um 17 cm gestiegen, mit einer gleichzeitigen Versauerung des Meereswassers mit verheerenden Auswirkungen auf Lebewesen im Meer [2]. Aus diesem Grund gilt es auch in der Baubranche den Fokus auf nachhaltige Baustoffe und nachhaltiges Bauen, im Sinne der Ökologie (als auch der Ökonomie) zu lenken, ohne dass der Nutzerkomfort und die (technische) Qualität darunter leiden. Dem Baustoff Lehm kommt hier besondere Bedeutung zu, da dieser in seinem gesamten Lebenszyklus geringe Umweltbelastungen und - wie in Kap. 1.4 beschrieben - keine negativen Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen hat.

Eine wichtige Kennzahl für den Energieaufwand, von der Gewinnung der Rohstoffe bis zur Herstellung des Baustoffes, ist der Primärenergieinhalt (PEI). Dieser soll so gering wie möglich gehalten werden. Zu beachten ist auch der Transportenergieaufwand des hergestellten Baustoffes bis zum Einbauort.

In Abbildung 2.1 ist gut ersichtlich, dass natürliche Baustoffe einen geringen und industrialisierte, stark verarbeitete Baustoffe einen hohen PEI-Wert aufweisen. Die Werte für Grünlinge aus Lehm und Lehmputz sind deshalb so hoch, da von einer industriellen Produktion mit künstlicher

Trocknung ausgegangen wurde. Natürlich getrocknete Grünlinge benötigen einen Bruchteil des PEI. Die Einsparung von Primärenergieinhalt bedeutet automatisch auch eine Einsparung von CO₂.

Baustoff	Dichte t/m ³	PEI		Quelle
		kWh/t	kWh/m ³	
adobes	1,7	3-6	5-10	6
Leichtlehm- ausfachung	0,8	14	11	1
Stampflehm	2,2	20	44	2
Lehmputz (in- dustriell hergest.)	1,7	139	236	1
Grünlinge künstl. getrocknet	1,2	290	349	2
Hochlochziegel, porosiert	0,75	722	541	1
Vollziegel	1,8	750	1350	1
Betonfertigteile			800	3
Armierungsstahl	7,8	3.611	28.166	1
Aluminium- platten		72.500	195.000	3
Kalksandstein	1,8	313	564	2
Steinwolle			169	4
Blähton	0,35	857	300	7
Kantholz (techn. getrocknet)		1.306	588	1
Dreischichtholz- platte	0,43	1.691	727	2
OSB-Platte	0,62	2.058	1.276	2
Sperrholz	0,49	2.681	1.314	2
Strohballen (HD- Kleinballen)	0,11	64	7	5
Quellen: 1: Waltjen 1999; 2: Hegger et al. 2005; 3: Baier 1982; 4: Eyerer, Reinhardt 2000; 5: Krick 2008; 6: Minke 1986; 7: Marmé, Seeberger 1982				

Abb. 2.1: Primärenergieinhalte von Baustoffen bzw. Bauteilen [1]

2.2 Definition und Verwendung von Lehmplatten

Die Lehmbau Regeln des Dachverbandes Lehm e.V. geben Begriffe, Baustoffe und Bauteildefinitionen an. Nach den Lehmbaueregeln sind Lehmplatten plattenförmige Baustoffe. Für Lehmplatten mit einer Rohdichte unter 1200 kg/m² kann der Begriff Leichtlehmplatte verwendet werden [11].

Zur Verwendung von Lehmplatten schreibt der Dachverband, dass sie gemauert oder trocken miteinander verbunden werden und für nichttragende Wände, Ausfachungen von Balkendecken oder Dachschrägen, sowie Deckenauflagen einzusetzen sind. Mit nichttragender Wand ist gemeint, dass sie für die Lastabtragung im Gebäude nicht herangezogen werden dürfen. Zusätzlich können dünne Lehmplatten als Bekleidungen und im Trockenbau eingesetzt werden oder als Putzträgerplatten Verwendung finden. Es wird ebenfalls umrissen, wie die Zusammensetzung und

Herstellung der Lehmplatten erfolgen kann. Im Wesentlichen können alle geeigneten Verfahren zur Verarbeitung von ungeformten Lehmstoffen angewendet werden, auch eine örtliche Herstellung ist möglich. Eine Einarbeitung von Bewehrung wie etwa Holzstäbe, Bambus oder Schilfrohr wird erwähnt. Die Baustoffbezeichnung soll mit Lehmplatte oder Leichtlehmplatte auch über die Kurzbezeichnung *LP* erfolgen [11].

Die 2018 erschienene neue Norm DIN 18948:2018-12 erweitert den Einsatzbereich auf Spritzwasserbereiche in häuslichen Küchen und Bädern, sofern ein Feuchteschutz durch Abdichtungen sicher gewährleistet ist. Die Eignung der Lehmplatten für Räume mit dauerhaft stark erhöhter Luftfeuchte ist nicht gegeben. Die Lehmplattennorm unterscheidet zwei Typen von Lehmplatten, die jeweils herstellerseitig zu deklarieren sind, nämlich:

- Typ A: Lehmplatten für Beplankungen und
- Typ B: Lehmplatten für Bekleidungen

Eine statisch tragende Funktion wird insofern ausgeschlossen, da sie zur Aussteifung von Bauteilen nicht eingesetzt werden dürfen. Daraus resultiert auch, dass bezüglich des Elastizitätsmoduls und der Scherfestigkeit keine normativen Anforderungen an die Platten gestellt werden [12].

2.2.1 Ausgangsstoffe und Herstellung

Die DIN 18948:2018-12 gibt vor, welche Ausgangsstoffe für die Lehmplatten verwendet werden dürfen. Alle Stoffe müssen vollständig deklariert werden und die Bestandteile müssen homogen vermengt werden. In der Norm unter anderem angeführte erlaubte Zusatzstoffe (demonstrativ) sind [12]:

- natürliche Gesteinskörnung nach DIN EN 13139
- Ziegemehl oder -splitt aus mörtelfreien Ziegeln
- Blähperlit, Blähton, Blähglas, Schaumglas, Blähschiefer und Naturbims nach DIN EN 13055
- Pflanzenteile und -fasern, auch Zellulosefasern
- Tierhaar
- zerkleinertes, chemisch unbehandeltes Holz (keine zerkleinerten Holzwerkstoffe)

Die Herstellungsmethode kann streichend, stampfend oder pressend sein.

2.2.2 Anforderungen an die Lehmplatte nach DIN 18948:2018-12

Um für industriell hergestellte Produkte eine ökonomische Transportierbarkeit und genormte Toleranzen für die vereinfachte Verarbeitung und Einbaubarkeit von Lehmplatten im Gebäude herzustellen, gibt die DIN 18948:2018-12 Mindestanforderungen an die Geometrie und die mechanischen Eigenschaften vor. Da diese Diplomarbeit die Forschung zu diesen Eigenschaften für den späteren Einsatz von Lehm im Trockenbau leistet, werden die Forschungsergebnisse im Kapitel 5 mit den unten angegebenen Anforderungen verglichen.

2.2.2.1 Form und Maßhaltigkeit

Die Lehmplatten müssen eben, plattenförmig und rechteckig sein und dürfen gelocht sein. Längs- und Querränder können Nuten und Federn und Seitenflächen mit Profilierungen enthalten. Das Format sollte ein Vielfaches von 12,5 cm mit einer Dicke von nicht mehr als 1/5 der Breite sein. Ebenfalls ist eine Gleichmäßigkeit der Maße mit produktionsbedingt zulässigen Abweichungen innerhalb einer Zuordnung in eine Maßhaltigkeitsklasse zu gewährleisten. Da diese für die vorliegende Arbeit weniger relevant ist, wird an dieser Stelle auf die DIN 18948:2018-12, Kap. 6.2, Tabelle 1 verwiesen.

2.2.2.2 Rohdichteklassen

Die DIN 18948:2018-12 führt Rohdichteklassen ein, die vom Hersteller zu deklarieren sind. Platten der Rohdichteklassen 0,6 bis 1,2 dürfen als Leichtlehmplatten bezeichnet werden. Diese Einteilung ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

Tabelle 2 — Rohdichteklassen von Lehmplatten

	1	2
	Rohdichteklasse	Mittelwert der Trockenrohddichte kg/m ³
1	0,6	510 bis 600 ^a
2	0,7	610 bis 700 ^a
3	0,8	710 bis 800 ^a
4	1,0	810 bis 1 000 ^a
5	1,2	1 010 bis 1 200 ^b
6	1,4	1 210 bis 1 400 ^b
7	1,6	1 410 bis 1 600 ^b
8	1,8	1 610 bis 1 800 ^b
9	2,0	1 810 bis 2 000 ^b
10	2,2	2 010 bis 2 200 ^b

^a Einzelwerte dürfen die Klassengrenzen um nicht mehr als 50 kg/m³ unter- bzw. überschreiten.
^b Einzelwerte dürfen die Klassengrenzen um nicht mehr als 100 kg/m³ unter- bzw. überschreiten.

Abb. 2.2: Rohdichteklassen nach DIN 18948:2018-12, [12]

Die für diese Arbeit hergestellten Lehmprobekörper befinden sich in den Rohdichteklassen 1,8-2,2 und werden daher als *Lehmplatten* oder *LP* bezeichnet. Für den Einsatz im Trockenbau wäre aus Sicht einer einfachen Montage eine leichtere Lehmmischung zu bevorzugen. Aus bauphysikalischer Sicht weisen schwerere Platten aufgrund ihrer größeren Masse prinzipiell ein höheres Schalldämmmaß als Leichtlehmplatten auf. Dies ist durch weiterführende Untersuchungen zu bestimmen. Zur Berechnung der für die beprobten Lehmprüfkörper gültigen Rohdichteklasse siehe Kap. 5.

2.2.2.3 Anforderung der Norm an die mechanischen Eigenschaften von Lehmplatten

Oberflächenhärte Es wird eine ausreichende Oberflächenhärte gefordert, die mittels Stahlkugelfalltest (definiert in der DIN 18948:2018-12) festgestellt wird. Der Durchmesser der entstehenden Vertiefung darf nicht mehr als 30 mm betragen. Die Oberflächenhärte wurde im Zuge dieser Arbeit nicht bestimmt und muss durch weiterführende Untersuchungen ermittelt werden.

Oberflächenzugfestigkeit Der in der DIN 18948:2018-12 als Oberflächenzugfestigkeit bezeichnete Festigkeitswert muss mindestens 0,1 N/mm² betragen. Dies wird durch die Haftzugfestigkeitsprüfung nachgewiesen, siehe Kap. 4.6.

Biegezugfestigkeit Lehmplatten haben eine Biegezugfestigkeit von $0,8 \text{ N/mm}^2$ aufzuweisen. Allerdings muss lt. DIN 18948:2018-12 nach der DIN EN 1015-12 geprüft werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde in Anlehnung an die DIN EN 310 geprüft, die Begründung findet sich in Kap. 4.4. Als Mindestanforderung wird ebenfalls der Wert von $0,8 \text{ N/mm}^2$ festgelegt.

2.3 Die ökologische Stärke der Lehmplatte im Trockenbau

An dieser Stelle erfolgen ein paar allgemeine Überlegungen zur Verwendung einer Lehmplatte im Trockenbau.

Historisch gesehen wurde mit Lehm als Element und tragendes Bauteil bereits vor Jahrtausenden gearbeitet, vgl. Kap. 2.1. Bei Fachwerkhäusern wurden auch statisch nicht tragende Bauteile wie Ausfachungen von Fachwerken mit Lehmbaustoffen ausgeführt. Dabei wurden fast immer direkt vor Ort verfügbare Ressourcen genutzt.

Für den Trockenbau ist es heute üblich, mit hoch automatisierten Prozessen auf großen Bandanlagen in Industriehallen mit Gips zu arbeiten und Gipsplatten mit und ohne Glasfaserverstärkungen herzustellen. Bereits der Primärenergieinhalt der umweltfreundlichsten Gipskartonplatte schlägt mit $3,35 \text{ MJ je kg}$, das entspricht etwa 930 kWh je Tonne , zu Buche (vgl. Studie über eine vergleichende Ökobilanzbetrachtung und Lebenszyklusanalyse [13]). Das liegt zum großen Teil an der Herstellung von Gips in Rauchgasentschwefelungsanlagen (REA), die oft in Stein- oder Braunkohlekraftwerken stattfindet. Die Alternative zu REA-Gips ist Naturgips, welcher aber immer noch 50% der Primärenergie von REA-Gips benötigt [14]. Ganz im Gegensatz zu einem - sogar industriell getrockneten - Lehmputz, für welchen 139 kWh eingesetzt werden (siehe Abbildung 2.1). Es müssen beim Lehmputz noch die PEI der Additive hinzugefügt werden. Sofern dies natürliche Stoffe sind, die kaum bis wenig verarbeitet werden, ist der PEI in Summe dennoch deutlich niedriger.

Durch den niedrigen Bedarf von Primärenergie zur Herstellung von Lehmplatten erscheint es sinnvoll, den Baustoff auch in geringem Maße einem industrialisierten Prozess zu unterziehen - den gesamten Lebenszyklus im Sinne der Ökologie mitbetrachtet - um eine gleichbleibende Qualität des fertigen Produktes gewährleisten zu können. Dabei ist es wichtig, nur die nötigsten Schritte - welche die Ökobilanz negativ beeinflussen - zu unternehmen. Regionale Rohstoffgewinnung mit kürzesten Transportwegen ist immer anzustreben. Dazu muss der Rohstoff aus einer Grube gewonnen und in einem Werk unmittelbar in der Nähe der Grube verarbeitet werden. Es können auch die jeweiligen Qualitätskontrollen in situ oder nahe davon stattfinden. Der Transport zum Einbauort sollte ebenfalls möglichst ressourcenschonend erfolgen. Nach der - im besten Fall Jahrzehnte langen - Nutzung, muss eine Weiterverwendung des Materials im Sinne von Recycling oder Upcycling erfolgen. Denn der ungebrannte Lehm ist ohne Einschränkungen und Qualitätsverlust immer wieder verwendbar.

Untersuchungen zur Ökobilanzierung von Lehmbaustoffen existieren bereits in Deutschland, in Österreich jedoch noch nicht. Weiterführende Informationen finden sich über den Dachverband Lehm e.V. (Horst Schröder, Manfred Lemke).

3 Additive

Ausgangspunkt der Untersuchungen sind die Referenzprobekörper, wie sie in Kap. 4.1.1.1 beschrieben sind. Diese bestehen aus Wasser und natürlich vorkommendem Lehm. Um das Material als Baustoff einsetzen zu können, sind u.a. bestimmte mechanische Leistungsanforderungen zu erfüllen. Um diese Anforderungen mit tatsächlich vorhandenen Eigenschaften vergleichen zu können, sind labortechnische Untersuchungen notwendig. Im Hinblick auf mögliche Anwendungsbereiche im Trockenbau ergeben sich die wesentlichen mechanischen Eigenschaften Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit und Haftzugfestigkeit, die in den Kapiteln ab Kap. 4.3 genauer beschrieben sind. Die vorliegende Diplomarbeit soll zur Grundlagenforschung dienen und greifbare Festigkeitskennwerte ermitteln. Sie können in weiterer Folge bei Entwicklungen wie etwa einer Lehmbauplatte für den Trockenbau als Ersatz von Gipskarton- oder Gipsfaserplatten herangezogen werden.

3.1 Materialauswahl - Beschreibung und erwartete Auswirkung auf mechanische Eigenschaften

Die verwendeten Materialien/Additive sind aus der Literaturrecherche und mechanischen Überlegungen heraus ausgewählt worden. Wichtig ist dem Autor dabei die ökologische Komponente, dies wird weiter unten in Kap. 3.2 genauer erklärt.

3.1.1 Filz

Verwendet wird eine Filzmatte aus reiner Schafschurwolle vom Werdenfelser Bergschaf, Materialstärke 5mm, spezifisches Gewicht 960 g/m^2 (ungelocht und unkomprimiert) [15]. Ein selbst gestanztes Lochraster soll für einen besseren Verbund zwischen Lehm und Filz sorgen. Der Lochdurchmesser beträgt 6 mm mit einem Lochraster von $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$.

Die 5mm starke Filzschicht soll (für die Laborprüfung) einseitig auf die Lehmplatte aufgebracht werden. Dazu wird sie in die Schalung gelegt und danach die Lehmmischung auf die Filzmatte aufgebracht und verdichtet. Um einen verbesserten Verbund des Filzes mit dem Lehm zu erreichen, wird der Filz gelocht und mit Schleifpapier aufgeraut, mehr dazu in Kap. 4.1.1.2. Zweck des Filzes ist es einerseits, als Putzträger zu wirken, sodass nachträglich bauseits der Putz direkt auf die Matte aufgebracht werden kann und andererseits bei Biegung der Platte die Aufnahme von Zugkräften. Voraussetzung für die Mitwirkung bei Plattenbiegung ist ein sehr guter Verbund zwischen Lehm und Filz.

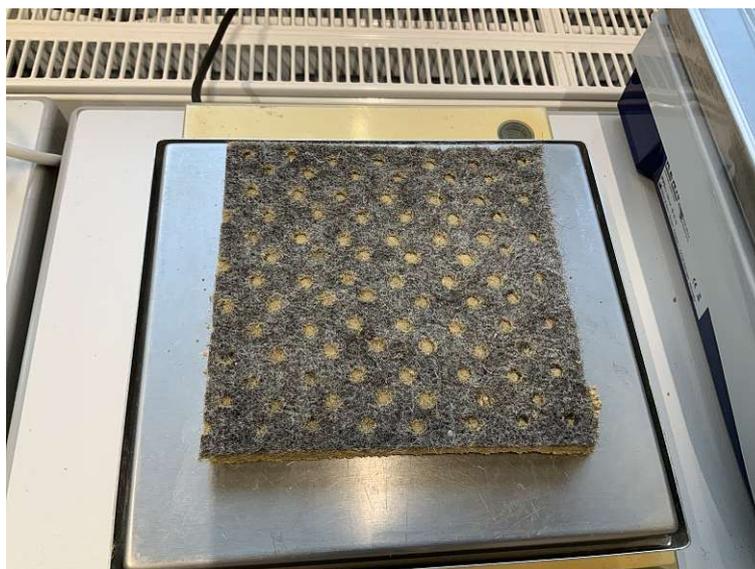


Abb. 3.1: Gelochte Filzmatte auf Lehmprüfkörper, Kantenlänge 15 cm, Lochdurchmesser 6 mm, Lochabstand Kantenlänge 10 mm × 10 mm

3.1.2 Holzfasern

Für die Holzfasern wird die Holzfaser-Einblasdämmung *STEICO-Zell* der Firma Steico SE verwendet. Neben den Holzfasern kommt hier ein Flammenschutzmittel in Form von Ammoniumsulfat zum Einsatz, welches aus Ammoniak und Schwefelsäure gebildet wird. Das Produkt ist in Deutschland lt. Abfallschlüssel der Europäischen Abfallverzeichnisverordnung in die Kategorie AVV 17 02 01 eingeteilt, was bedeutet, dass es wie Holz und Holzwerkstoffe entsorgt werden darf [16], [17]. Eine Verwendung von chemisch behandelten Additiven ist gemäß DIN 18948:2018-12 nicht zulässig. Für eine Verwendung in einem zugelassenen Bauprodukt müssten die Holzfasern demnach ohne Flammenschutzmittel eingesetzt werden. Dies bedarf dann einer erneuten Ermittlung der Festigkeitswerte. Die Faserlänge variiert von wenigen Millimetern bis zu ca. 1 cm. Vereinzelt sind Fasern bis 1,5 cm Länge sichtbar. Der Durchmesser der Fasern ist nicht messbar, die Fasern verfügen jedoch über eine große Schlankheit. Dies ist in Abbildung 3.2 zu sehen.

Die Holzfasern sollen die Biegezugfestigkeit gegenüber dem Referenzprobekörper steigern, da diese höhere Zugspannungen aufnehmen können als der Lehm. Voraussetzung dafür ist eine homogene Durchmischung der Lehm-Holzfaser Mischung, d.h. keine *Holznestern* innerhalb des fertigen Probekörpers und ein guter Verbund zwischen den Holzfasern und der Lehmmatrix. Wie sich das Flammenschutzmittel Ammoniumsulfat auf den Verbund zwischen den Holzfasern und dem Lehm und somit auf die Biegezugfestigkeit auswirkt, kann nicht abgeschätzt werden. Dies ist in separaten Versuchen zu prüfen. Hinsichtlich der Druckfestigkeit wird erwartet, dass diese sinkt, da die Druckfestigkeit von Holz niedriger ist als jene von Lehm. Für die Haftzugfestigkeit wird eine Steigerung erwartet, da im Lehm-Holzfaser-Verbund größere Zugkräfte aufgenommen werden können.



Abb. 3.2: Holzfasern STEICOzell

3.1.3 Flachsgewebe

Die Firma Andreas Zöchbauer GmbH stellt Flachs in Form von Gewebematten zur Verfügung. Deren Verwendungszweck ist die Armierung für Lehmputzsysteme. Es wird ein Drehergewebe eingesetzt, welches mit pflanzlicher Stärke formstabil gemacht wird. Die Maschenweite beträgt $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$, das Flächengewicht 48 g/m^2 [18]. Der Probekörper ist in Abbildung 3.3 abfotografiert.

Die Flachsgewebematte wird bei der Herstellung der Prüfkörper einseitig in den Lehm eingearbeitet (Details finden sich in Kap. 4.1.1.2), wo sie ebenfalls (wie die in Kap. 3.1.1 beschriebene Filzmatte) in der Zugzone Zugkräfte aus der Biegebeanspruchung der Platte übernehmen soll.

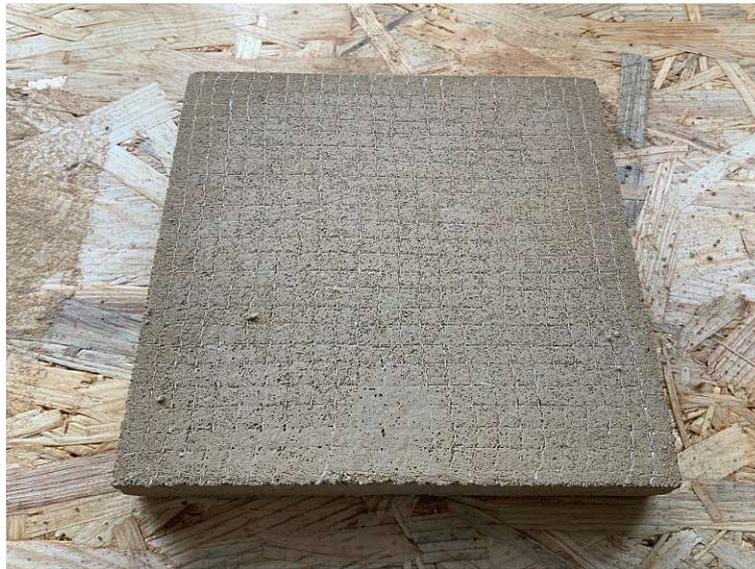


Abb. 3.3: Lehmprüfkörper mit oberflächennahem Flachsgewebe, Probekörpergröße 15 cm × 15 cm

3.1.4 Kasein

Für das Milchprotein wurde die Kaseingrundierung der Fa. Kreidezeit Naturfarben GmbH benutzt. Diese besteht aus Kasein und Soda und ist daher bereits aufgeschlossen und fertig verwendbar. Die Grundierung liegt in Pulverform vor und muss mit Wasser angerührt werden.

Das mit Soda aufgeschlossene Kasein wird dadurch zu einem Eiweißleim und somit zu einem Bindemittel für den im Lehm enthaltenen Sand und Schluff. Dies soll die Druck- und Biegezugfestigkeit in den Proben steigern.

3.1.5 Kalk gelöscht

Verwendet wird *Baumit Sumpfkalk*, ein gelöschter Kalkteig, der laut Hersteller zur Herstellung von Mauer- und Putzmörtel geeignet ist. Das Gebinde besteht aus Calciumhydroxid in Wasser mit einem Festkörpergehalt von etwa 40%. Die Dichte des abgelagerten gelöschten Weißkalkes beträgt ca. 1.300 kg/m³ [19].

Gelöschter Kalk hat eine Jahrhunderte lange Historie bei der Herstellung von Kalkmörtel, wo Sumpfkalk mit Sand vermenget wird. Der Kalk bindet dabei mit dem CO₂ in der Luft ab und erhärtet unter Bildung von Calciumcarbonat. Daher wird erwartet, dass diese Reaktion auch mit Lehm anstelle von Sand eintritt (durch den Sandanteil im Lehm), was eine Erhöhung der Druckfestigkeit bewirkt.

3.2 Ökologie der Additive

Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass der Autor unter *Ökologie* die ressourcenarme Verwendung von in der Natur vorkommenden Materialien meint und nicht etwa eine Definition wie sie von Ernst Haeckel 1866¹ gemacht wurde:

(...) die gesamte Wissenschaft von den Beziehungen des Organismus zur umgebenden Außenwelt.

Grundsätzlich ist ein Baustoff oder eine Materialmischung, die für bauliche Zwecke verwendet wird umso umweltverträglicher, desto weniger die Ausgangsstoffe industrielle Prozesse durchlaufen. Denn es wird gemeinhin ein umso höherer Ressourcenaufwand betrieben, je weniger das Endprodukt dem Ausgangsprodukt gleicht, wie wenn - im Idealfall - das Ausgangsprodukt mit dem Endprodukt ident ist. Nachdem an Baustoffe - was die mechanischen Anforderungen betrifft - sehr hohe und immer höhere Erwartungen gestellt werden (siehe etwa ultrahochfester Beton (UHPC)), wird auch die Herstellung aufwändiger und energetisch intensiver und dadurch sowohl weniger ökologisch als auch ökonomisch.

Nun ist die Verwendung von in situ vorgefundenem und direkt vor Ort verarbeitetem bzw. eingebautem Lehm sicherlich eine ressourcenschonende Bauweise. So können tragende Bauteile, welche die Lasten auf Druck in den Untergrund leiten, leicht hergestellt werden. Die Druckfestigkeit des Lehmes liegt in etwa in der Größenordnung von Ziegelmauerwerk [21]. Die verschiedenen historisch gewachsenen Bauweisen mit Lehm sind im Handbuch Lehm- und Ziegelbau von Minke nachzulesen [1]. Nach der Herstellung des Rohbaus findet der Innenausbau statt. Und hier ist es derzeit nicht möglich oder zumindest nicht wirtschaftlich, den Lehm für einen trockenen Ausbau vor Ort zu gewinnen und den Rohstoff direkt zu einem Baustoff zu verarbeiten. Um eine ökonomische Lösung zu erreichen, müssen plattenförmige Bauteile, die im Innenausbau verwendet werden können, in einem (möglichst dem Gewinnungsort der Rohstoffe und dem Einbauort des Baustoffes örtlich nahe liegenden) Werk hergestellt werden. Denn eine Produktion von größeren Mengen und deren Lagerung unter Einhaltung einer gleichbleibend hohen Qualität ist nur bei kontrollierten Umgebungsbedingungen der Temperatur und Luftfeuchte sowie unter Witterungsunabhängigkeit möglich. Dabei sollten die Ausgangsstoffe zumindest nach der Nutzung und der Aufbereitung des Produktes wiederverwendbar oder ohne weitere Maßnahmen biologisch abbaubar sein. Anders ausgedrückt sollte das - von Verunreinigungen befreite und nicht weiter aufbereitete Produkt am Ende des Lebenszyklus ohne anfallenden Abfall dem natürlichen Kreislauf der Erde rückgeführt werden können, ohne dass dies negative Einflüsse auf die Umwelt nach sich zieht.

Aus diesem Grund werden für die vorliegende Arbeit aus Sicht des Autors nur fünf möglichst ökologische Ausgangsstoffe als Additive bzw. Komponenten für die Lehmplatten herangezogen, nämlich: Filz aus Schafschurwolle (biologisch abbaubar), Holzfasern mit Ammoniumsulfat (kann nach der Nutzung im Bauwerk als natürliches Düngemittel für Pflanzen dienen), Flachsgewebe (biologisch abbaubar), Kasein (natürliches Milchprotein, biologisch abbaubar) und Kalk gelöscht (mineralisch, weltweit vorkommend). In der Baubranche verwenden Hersteller von Lehm- und Ziegelplatten bereits teilweise ökologische Ausgangsstoffe für Lehmplattenzusätze. Es werden beispielsweise Schilfmatten als Putzarmierung eingesetzt. In der baupraktischen Anwendung werden jedoch auch häufig Produkte wie Glasfasermatten verwendet, die nach der Nutzung als Armierung in Lehm- und Ziegelplatten theoretisch wiederverwertbar sind. Durch die aufwändige Trennung der Glasfasermatte vom Lehm und die Befreiung der Platte von Lehmresten sowie die

¹[20]

Untersuchung der Matten auf Schäden und die Aussortierung der schadhaften Platten, ist die in der Praxis durchgeführte Wiederverwendung aus ökonomischer Sicht zumindest zweifelhaft. Hinzu kommt der Transport zu einem Werk, welches die Matten wieder verarbeiten kann.

Daher ist aus Sicht des Autors die einzig konsequente Herangehensweise die alleinige Verwendung von biologisch abbaubaren Ausgangsstoffen, bei der es keiner Trennung der Komponenten der Platte nach deren Nutzung bedarf.

4 Methode

Dieses Kapitel umfasst die Findung der optimalen Konsistenz der Probekörper mittels Vorversuchen, die möglichen Arten der Verdichtung der Probekörper und die Beschreibung der durchzuführenden Versuche für die Ermittlung der mechanischen Festigkeiten in Bezug auf die gültigen Normen.

4.1 Probekörperherstellung

Die Probekörperherstellung basiert - was den Wassergehalt bzw. die Plastizität betrifft - auf Werten aus der Literatur, Erfahrungswerten des betreuenden Institutes für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie (Forschungsbereich Ökologische Bautechnologien) und dem Kugelfalltest, beschrieben von Minke [1]. Letzterer wird weiter unten für die vorhandenen Lehmischungen erörtert. Allgemein gilt für alle Zusammensetzungen - mit und ohne Additive - dass die Masse unmittelbar nach dem Anmischen für mindestens 12 Stunden *gemaukt* wird. Dies bedeutet eine Lagerung der feuchten Masse über Nacht, wodurch sich die Bindekraft des Lehmes erhöht, da sich die Tonminerale während dieser Phase auf Grund ihrer elektrochemischen Anziehungskräfte umlagern und dichtere Packungen bilden können [1]. Der optimale Wassergehalt, bezogen auf die feste Lehm Masse, wurde mittels Vorversuchen mit 15 Ma% festgelegt, siehe Tab. 4.1.

4.1.1 Mischungsverhältnisse

Im Folgenden wird unterschieden zwischen:

- Referenzprobekörpern
- Probekörpern mit Additiven

Referenzprobekörper Als Ausgangspunkt zur Vergleichbarkeit der Materialeigenschaften stellen die Referenzprobekörper dabei eine Mischung aus S&L Lehmfeinputz 0/2, S&L Trockenlehm-pulver gemahlen 0/2 und Wasser (Leitungswasser) dar. Im Folgenden wird Lehmfeinputz als LFP und Trockenlehm-pulver als TLP bezeichnet.

Probekörper mit Additiven Diese bestehen aus oben genannten Zutaten plus den jeweiligen Additiven, beschrieben in Kapitel 3.

4.1.1.1 Referenzprobekörper

Um dem Lehmfeinputz die notwendige Plastizität für die Herstellung der Probekörper zu verleihen, wird Wasser beigemischt. Für den ersten Vorversuch wird ein W/L-Verhältnis von 0.25 verwendet. Da der Wassergehalt initial zu hoch erscheint, wird zur Findung der optimalen Konsistenz für weitere Proben iterativ der Wassergehalt angepasst, dieser dem durch den Kugelfalltest nach Minke [1] beschriebenen Optimum entspricht. Dabei hat sich ein Wasser zu Lehm Verhältnis von 0.15 als ideal erwiesen (siehe Tab. 4.1).

Tab. 4.1: W/L-Verhältnis Referenzprobekörper

Lehmfeinputz [g]	Wasser [g]	W/L [-]
250	125	0.5
500	125	0.25
625	125	0.2
833	125	0.15
1000	125	0.125
1250	125	0.1

Es werden Probemischungen hergestellt, die anschließend 15 Stunden im Klimaschrank bei 23°C/50% rel.LF. lagern (zur Herstellung und Verdichtung siehe 4.1.3 und 4.1.4). Nach dem Ausschalen sanden die Proben stark ab und beim Kugelfalltest zerbrechen sie in viele kleine Stücke, was eine zu *magere* Mischung, respektive ein zu geringer Feinstkornanteil bedeutet. Daher muss der Lehm *gefettet* werden. Diese Feinstkornanteile werden in Form von Trockenlehm-pulver zugemischt. Dadurch erhöht sich die innere Bindung der Tonminerale und die Mischung wird plastischer. Als optimaler Trockenlehm-pulvergehalt hat sich ein Verhältnis TLP:LFP von 0.05:1 herausgestellt. Der Trockenlehm-pulveranteil bezieht sich nur auf die Lehmfeinputzmasse ohne Wasser. Um eine homogene Mischung von Lehmfeinputz, Trockenlehm-pulver und Wasser zu erreichen, ist zuerst das Wasser mit dem Lehmfeinputz zu mischen und anschließend unter ständigem Rühren das Trockenlehm-pulver langsam einzurieseln. Nachdem alle Bestandteile beigemischt sind, wird die Masse 10 Minuten lang kräftig durchmischt. Dies geschieht mit einem elektrischen Handrührwerk, da jeweils größere Mengen für die Probenherstellung verarbeitet werden. Eine Charge besteht dabei aus

- 30 kg Lehmfeinputz
- 4,725 kg Wasser
- 1,5 kg Trockenlehm-pulver

4.1.1.2 Probekörper mit Additiven

Lehm mit Filz Um eine gute Verbundwirkung des Filzes mit dem Lehm zu erreichen, werden zwei Maßnahmen getroffen:

- Lochen mit einem Stanzeisen, Durchmesser 6mm mit Lochabstand horizontal und vertikal je 20mm
- freilegen einzelner Wollhaare mit Schleifpapier Körnung P60

Nachdem der Filz gelocht und aufgeraut ist, wird er in die Schalung gelegt. Die Schalung 150 mm × 150 mm × 15 mm ist für die Haftzugprüfungsprobekörper vorgesehen, die Schalung mit 120 mm × 20 mm × 20 mm für die Biegezug- und Druckprüfungsprobekörper.

Nach dem Einlegen der Filzmatten wird die entsprechend vorbereitete Lehm-masse in die Schalungen gefüllt und die Probekörper verdichtet, siehe 4.1.3. In Abbildung 4.1 ist eine Filzprobe vor und nach der Aufrauung dargestellt, Abbildung 4.2 zeigt bereits in die Schalung eingelegten Filz mit und ohne eingefülltem Lehm und in Abbildung 4.3 ist ein fertiger Probekörper mit Filzarmierung zu sehen.

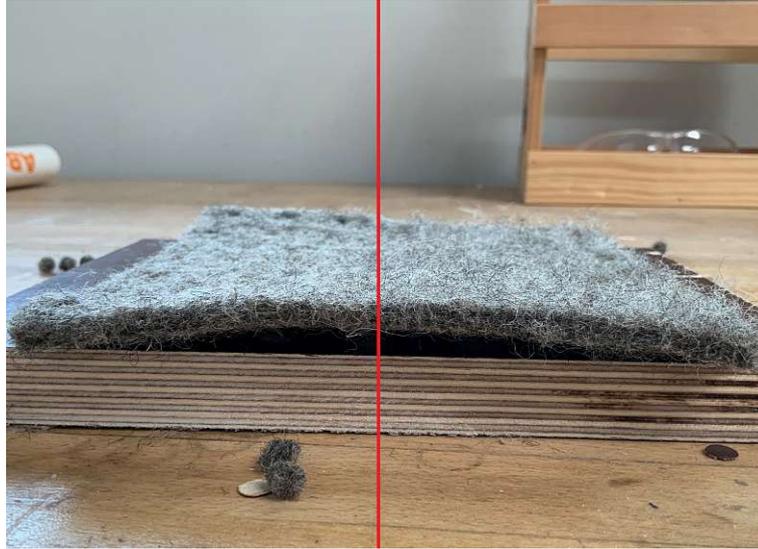


Abb. 4.1: Filz links natur, rechts mit Schleifpapier aufgeraut



Abb. 4.2: Hinten: Filz in Schalung eingelegt, vorne: Lehm bereits eingefüllt



Abb. 4.3: Fertiger Probekörper mit Filz

Lehm mit Holzfasern Um die optimale Vorgehensweise für eine möglichst homogene Durchmischung der Holzfasern mit dem Lehm zu finden, wurden mehrere Versuchsprobekörper hergestellt. Die in 15 kg Säcken verpackten Holzfasern sind im Lieferzustand stark komprimiert. Daher finden sich nach Öffnen der Verpackung im losen Zustand eher verfilzte Klumpen als einzelne Fasern. In einem ersten Schritt sind die Holzfasern daher voneinander zu trennen. Dazu wird ein Gefäß nahezu luftdicht mit einer durchsichtigen Polyethylenfolie verschlossen. In diese Folie werden gegenüberliegend zwei kleine Löcher geschnitten. Ein Loch dient der Druckluftzufuhr, das gegenüberliegende wirkt wie ein Überdruckventil. Damit keine Fasern entweichen können, wird das Überdruckventil mit einem Stück des Filters einer Atemschutzmaske zugeklebt. So kann Luft aus dem Gefäß entweichen, aber keine Fasern. Unter Zugabe von Druckluft trennen sich die einzelnen Fasern und die Masse erfährt einen Volumenzuwachs. In Abbildung 4.4 sind die verklumpten Holzteilchen nach Entnahme aus der Lieferverpackung zu sehen. Diese lösen sich voneinander, sichtbar in Abbildung 4.5.



Abb. 4.4: Verklumpte Holzfasern nach Entnahme aus Liefergebinde



Abb. 4.5: Holzfasern, durch Druckluft von Verfilzungen gelöst, vor der Einmischung in Lehm-
masse

Um die Auswirkungen der Holzfasern vor allem auf die Biegezugfestigkeit bestimmen zu können, werden drei verschiedene Holzfaserteile getestet. Die Holzfaserteile sind in Massenprozent der festen Anteile angegeben (Lehmfeinputz und Trockenlehm-pulver). Die Wahl der Anteile basiert auf der Literaturrecherche, insbesondere auf der Masterarbeit von Erich Streit [22], der in seinen Versuchen dem Lehm 2,5 Ma% Holzfaserteil beigemischt hat und auch auf der Dissertation von Dirk Schubert, der Probekörper aus Ton und Holzfasern durch Pressagglomeration mit bis zu 60% Holzfaserteil hergestellt hat [7]. Bei in Vorversuchen durchgeführten Mischungen stellt sich die maximal mit dem elektrischen Handmischgerät in den Lehm einmischbare Menge zu 2,5 Ma% heraus. Darüber hinaus wird die Verarbeitbarkeit der Masse durch die Holzfasern so stark erschwert, dass eine homogene Verteilung dieser in der Lehmmatrix nicht mehr möglich ist. Daher wird die Abstufung des Holzfaserteils wie folgt vorgenommen:

- 0,5 Ma% Holzfaserteil
- 1,5 Ma% Holzfaserteil
- 2,5 Ma% Holzfaserteil

Nach der oben beschriebenen Auflösung der Verklumpungen werden die Holzfasern unter ständigem Rühren mit dem Handrührgerät in die Lehm-masse langsam eingebracht.

Lehm mit Flachsgewebe Die in Kapitel 3.1.3 beschriebene Gewebematte wird auf die richtige Größe zugeschnitten und in die Siebdruckplattenschalung gelegt. Darauf wird der Lehm aufgebracht und anschließend verdichtet, siehe Kapitel 4.1.3. Zu sehen ist dies in Abbildung 4.6.



Abb. 4.6: Flachsgewebe in Schalung, mit und ohne Lehm-masse

4.1.2 Kugelfalltest

Mit dem Kugelfalltest, Minke bezeichnet dies als *Handprüfverfahren*, kann die Bindekraft innerhalb des Lehms abgeschätzt werden. Dazu wird eine Kugel mit etwa 4 cm Durchmesser geformt, die aus 1,5 m auf eine harte Oberfläche fallen gelassen wird. Wenn die Probe komplett zerfällt, ist der Lehm zu mager und muss gefettet werden. Wenn sich die Kugel nur zu einem flachen Fladen verformt und nur sehr kleine oder gar keine Risse bildet, so ist die Probe sehr tonhaltig (zu fett) und muss daher gemagert werden, um als Baulehm Verwendung finden zu können. Wenn die Probe etwas größere Risse bildet und sich leicht verformt, ist die Bindekraft nicht mehr so

stark und der Lehm kann als Baulehm verwendet werden. Untenstehend in den Abbildungen 4.7 und 4.8 finden sich eine sehr magere Mischung und die für die in weiterer Folge durchgeführten Versuche verwendete Mischung mit 5 Ma% TLP (bezogen auf LFP) und 15 Ma% Wasser (bezogen auf LFP+TLP).



Abb. 4.7: Links: zu magere Mischung (ohne TLP), rechts: richtige Mischung (5 Ma% TLP)

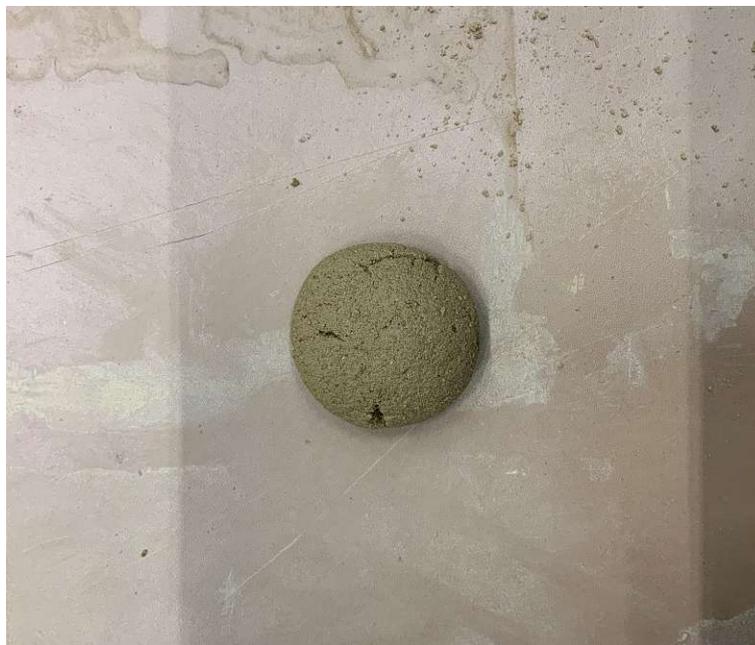


Abb. 4.8: Optimierte Mischung: 250 g LFP, 39,38 g Wasser, 12,5 g TLP

4.1.3 Verdichtung

Prinzipiell stehen zwei verschiedene Verdichtungsarten der in die Formen eingefüllten Probekörpermasse zur Verfügung:

- statisch
- dynamisch

Um die hinsichtlich der Festigkeiten bessere Methode zu ermitteln werden Vorversuche geplant, welche nach den unten beschriebenen Verfahren durchgeführt und danach ausgewertet werden. Dabei hat sich herausgestellt, dass die dynamisch verdichteten Probekörper augenscheinlich über eine höhere Festigkeit verfügen. Die Auswertung dazu findet sich in Kapitel 5. Daher werden für alle nachfolgenden Versuche die Probekörper mittels dynamischer Verdichtung hergestellt.

4.1.3.1 Statische Verdichtung

Bei der statischen Verdichtung wird mittels Anpressdruck, welcher langsam gesteigert und bei einem vordefinierten Wert eine gewisse Zeit lang gehalten wird, der Probekörper gestaucht. Dabei wird ein Teil der in der Lehmmasse eingelagerten Luft aus dem Probekörper gedrückt, die plättchenförmigen Tonteilchen teilweise normal zur Krafteintragsrichtung ausgerichtet und ein Teil des in der Probe gebundenen Wassers aus dem Probekörper gepresst. Schubert schreibt in seiner Dissertation von der Einlagerung von Adhäsionsflüssigkeit (Solvatwasser) zwischen den plättchenförmigen Tonteilchen. Die stark wirkenden Adhäsionskräfte nehmen mit größerem Abstand der Tonteilchen zueinander ab, wodurch diese während der Verdichtung leichter aneinander vorbeigleiten können. Die Ordnung der Teilchen verbessert sich und die Festigkeit der Probekörper wird durch das Wasser (durch die Benetzung und mittels innerer Kohäsion) erhöht [7]. Die Durchführung geschieht mit einer hydraulischen Presse (händischer Druckaufbau durch Hebelbewegung) bei langsamer Steigerung des Druckes auf 100 bar. Die Messvorrichtung für den Druck befindet sich dabei direkt am Hydraulikstempel. Daher kann der Druck, welcher am Prüfstempel anliegt, leicht vom angezeigten Druck abweichen.

4.1.3.2 Dynamische Verdichtung

Die dynamische Verdichtung komprimiert den Lehmprobekörper durch Energieimpulse, die z.B. - wie im vorliegenden Fall der Versuche für diese Arbeit - durch ein Fallgewicht aus einer definierten Höhe vertikal wiederholt auf den Probekörper einwirken.

Der Literatur ist zu entnehmen, dass dynamische Verdichtungsmethoden tendenziell einen größeren Erfolg versprechen, was die Bindekraft im Lehm und somit die Festigkeit des Lehmes betrifft. Die Tonplättchen können sich durch die entstehenden Stoßwellen waagrecht übereinander ausrichten, wodurch ein dichteres Gefüge als bei der statischen Verdichtung entstehen kann. Zusätzlich können sich die Tonminerale bei genügend vorhandenem Wasser zu dichteren Packungen umlagern. So entsteht eine höhere Bindekraft und damit eine größere Druckfestigkeit im trockenen Zustand, siehe auch [1]. Um einen Vergleich der Festigkeiten durch die erwähnten Methoden zu erhalten, wurden Vergleichsprüfkörper hergestellt (nur Referenzprobekörper ohne Additive) und beprobt.

Um die dynamische Verdichtung der Probekörper reproduzierbar zu machen, was den Energieeintrag betrifft, wird entschieden, dass als Verdichtungsgerät ein sich im Bauwesen - genauer in der Bodenmechanik - bewährtes Gerät verwendet wird: der Proctorhammer. Der Hammer wird

In Gleichung (4.1) ist der Eintrag der spezifischen Energie in den Probekörper dargestellt [23]:

$$E_S = \frac{G_F \cdot h \cdot n_S \cdot n_l \cdot g}{V_P} \quad (4.1)$$

mit

- E_S ... Spezifische Energie
- G_F ... Fallgewicht
- h ... Fallhöhe
- n_S ... Anzahl der Schläge je Schicht
- n_l ... Anzahl der Schichten
- g ... Gravitation
- V_P ... Volumen des Proctortopfes

Für die Probekörper mit den Abmessungen 160x20x20mm ergibt sich somit die Verdichtungsenergie E_S zu:

$$E_S = \frac{2,5 \text{ kg} \cdot 0,3 \text{ m} \cdot 5 \cdot 1 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}{0,16 \text{ m} \cdot 0,02 \text{ m} \cdot 0,02 \text{ m}} \cdot 1 \times 10^{-6} = 0,5748 \text{ MJ/m}^3 \quad (4.2)$$

Für die Probekörper mit den Abmessungen 160x40x40mm erhält man nach (4.1) die Verdichtungsenergie E_S zu:

$$E_S = 0,1437 \text{ MJ/m}^3 \quad (4.3)$$

Und analog für Probekörperabmessungen von 150x150x10mm:

$$E_S = 0,1635 \text{ MJ/m}^3 \quad (4.4)$$



Abb. 4.10: Proctorhammer mit Fallgewicht und Lastverteilerplatte



Abb. 4.11: Lastverteilerplatte mit Zentriervorrichtung



Abb. 4.12: Probekörper mit überschüssigem Material nach Verdichtung

4.1.4 Konditionierung und Lagerung

Die zur Versuchsdurchführung herangezogenen Normen verlangen eine Konditionierung der Probekörper bei $23 \pm 2^\circ\text{C}/50 \pm 5\%$ bis zum Erreichen der Massekonstanz. Diese ist nach DIN 18948:2018-12 erreicht, wenn die Ergebnisse von zwei aufeinander folgenden Wägungen im Abstand von 24h um maximal 0,05% der Masse (bezogen auf den kleineren Messwert) voneinander abweichen [12].

In dieser Norm wird außerdem verlangt, dass die Prüfkörper mindestens sieben Tage vor der Prüfung unter oben genannten Bedingungen gelagert werden müssen. Die richtige Konditionierung und Lagerung wird durch Klimaschränke der TU Wien sichergestellt, bei der sich die Parameter Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit genau einstellen lassen. Untenstehend finden sich stellvertretend zur Veranschaulichung der Trockendauer die Tabelle 4.2 mit den gewogenen Gewichten der Referenzprobekörper.

Tab. 4.2: Gewicht Referenzprobekörper bis zur Massenkonstanz

Probekörper**	Gewicht nach Ausschalen [g]	Gewicht 1. Wägung [g]	Gewicht 2. Wägung [g]	Gewicht 3. Wägung [g]
150x150x15mm	15.09.2021 17:30	20.09.2021 15:00	21.09.2021 15:00	22.09.2021 15:00
D1	681.46	681.04	681,10*	681.17*
D2	666.81	666.06	666.11*	666.11*
D3	685.36	684.56	684.60*	684.64*
D4	678.10	677.18	677.25*	677.30*
S1	700.06	699.64	699.71*	699.75*
S2	694.38	693.66	693.69*	693.71*
S3	709.98	709.27	709.32*	709.27*
S4	689.26	688.51	688.58*	688.59*

*Massenkonstanz bei dieser Messung erreicht

**D=dynamisch verdichtet, S=statisch verdichtet, siehe Kap. 4.1.3

4.2 Rohdichte

Um die verschiedenen Probekörper in Rohdichteklassen lt. DIN 18948 [12] einordnen zu können, wird zunächst die Rohdichte [12] aller Proben bestimmt: Die Rohdichte wird aus der Masse mittels Präzisionswaage Sartorius LP 5200P mit einer Ablesbarkeit von 0,01 g (bezogen auf das äußere Probekörpervolumen) ermittelt durch einen digitalen Messschieber mit einer Ablesbarkeit von 0,01 mm berechnet. Die DIN 18948 fordert Geräte mit einer Genauigkeit von 0,1 g bzw. 0,1 mm. Die herstellungsbedingten Abweichungen von den Soll-Maßen bzw. Soll-Massen liegen jedoch teilweise um den Faktor 5-10 darüber. Die Präzision der Messgeräte ist daher nicht notwendig, allerdings können Messungenauigkeiten aufgrund einer zu gering auflösenden Waage bzw. einer zu wenig genauen Längenmessung ausgeschlossen werden.

Die Proben werden dabei bis zur Massenkonstanz bei 23°C und 50% rel. LF. konditioniert und je Lehmplatte mindestens drei (die DIN 18948 fordert mindestens zwei) repräsentative Plattenstücke (d.h. Platten mit der größten Ebenheit und keinen Randausbrüchen etc.) gewogen und vermessen. Aus den bestimmten Rohdichten wird der Mittelwert gebildet und auf volle 10 kg/m³ gerundet. Die vollständige Auflistung aller Abmessungen und Rohdichten aller Probekörper findet sich im Anhang.

4.3 Mechanische Eigenschaften: normative Grundlagen

Für Österreich existieren zum Zeitpunkt der Verfassung dieser Diplomarbeit keine normativen Regelungen zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Lehmplatten. In Deutschland ist 2018 erstmals eine Norm erschienen, die explizit Lehmplatten zum Inhalt hat. Als Grundlage wird daher die DIN 18948:2018-12 Lehmplatten - Anforderungen und Prüfverfahren [12] herangezogen. Zu den geforderten Mindestfestigkeiten seitens der Norm, wird auf Kap. 2.2.2.3 verwiesen.

Die wesentlichen, zu bestimmenden mechanischen Eigenschaften der Biegezugfestigkeit und Haftzugfestigkeit sind lt. DIN 18948:2018-12 in Anlehnung an folgende Normen zu ermitteln:

- Biegezugfestigkeit: DIN EN 310 [24]
- Haftzugfestigkeit: DIN EN 1015-12 [25]

Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass die Biegezugfestigkeit abweichend von der Forderung der DIN 18948:2018-12 nicht nach DIN EN 310, sondern nach DIN EN 1015-11 [26] geprüft wird, Details und Begründung dazu siehe Kapitel 4.4.

Zusätzlich zur Biegezugfestigkeit und Haftzugfestigkeit wird eine Druckfestigkeitsprüfung nach der DIN EN 1015-11 [26] durchgeführt.

4.4 Biegezugfestigkeitsprüfung

Die Biegezugfestigkeit wird in Anlehnung an die DIN EN 1015-11 [26] und nicht wie von der DIN 18948 [12] gefordert in Anlehnung an DIN EN 310 [24] ermittelt, denn dadurch können für die Ermittlung der Druckfestigkeit die zuvor verwendeten Probekörper des Biegezugfestigkeitsversuches herangezogen werden. Diese Norm (DIN EN 1015-11) regelt die Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk betreffend der Biegezug- und Druckfestigkeit für Festmörtel.

4.4.1 Anforderungen an Probekörper und Vorbereitung für die Prüfung

In der gültigen Fassung der DIN EN 1015-11 wird festgelegt [26], [21]:

- Prüfkörpermaße 160x40x40 [mm]
- Beprobung von drei Prüfkörpern

Die fertigen Lehmischungen (ohne/mit Additiven) werden (nach dem Mauken) in die Schaltungsformen gefüllt, dynamisch verdichtet (ausgenommen einige Referenzprobekörper) und unter $23 \pm 2^\circ\text{C}/50 \pm 5\%$ bis zur Massenkonstanz konditioniert, genaueres siehe unter Kap. 4.1.

4.4.2 Bestimmung der Biegezugfestigkeit

Bedingt durch die hohe Prüfkörperanzahl und den langen Trocken- bzw. Konditionierungszeiten der Probekörper werden zur Bestimmung des mechanischen Kennwertes der Biegezugfestigkeit - entgegen der lt. DIN EN 1015-11 geforderten 160x40x40 mm - kleinere Probekörper mit den Maßen 160x20x20 mm hergestellt. Aufgrund der Berechnung einer auf eine Fläche bezogenen Kraft ist dies zulässig. Es ist zu berücksichtigen, dass sich ein Skalierungseffekt zeigen kann, bei dem Prüfkörper mit kleineren Abmessungen eine im Verhältnis zu ihrer Querschnittsfläche höhere Bruchlast aufweisen können als größere Prüfkörper. Dies wird in der Ergebnisauswertung der Referenzprobekörper (vgl. 5.3.1) diskutiert.

Die Biegezugfestigkeit wird mittels Drei-Punkt Biegeversuch an einer Zwick/Roell mit je 1kN bzw. 250kN maximal aufbringbarer Kraft durchgeführt. Ein in die Prüfvorrichtung eingelegter Prüfkörper ist in Abbildung 4.14 dargestellt.

Die Last muss stoßfrei mit einer gleichmäßigen Laststeigerung im Bereich von 10 N/s bis 50 N/s so aufgebracht werden, dass der Bruch innerhalb von 30 s bis 90 s eintritt und die Prüfeinrichtung muss wie in Abbildung 4.13 aufgeführte geometrische Anforderungen erfüllen [26]. Da diese Norm für Mauerwerk, resp. Festmörtel, dessen Festigkeit weit höher als die der Probekörper aus Lehm liegt, verfasst wurde, wird die Laststeigerung so adaptiert, dass der Bruch der Probe bei 30 s-120 s eintritt. Das geschieht bei einer Laststeigerung von 0,5 N/s. Die Biegezugfestigkeitsprüfung versteht sich daher in Anlehnung an die DIN EN 1015-11 durchgeführt zu werden.

Tabelle 3 — Anforderungen an Prüfmaschinen

Höchstzulässige relative Spannweite	Höchstzulässige relative Anzeigeabweichung	Höchstzulässige relative Nullpunktabweichung
%	%	%
±2,0	±2,0	±0,4

Maße in Millimeter

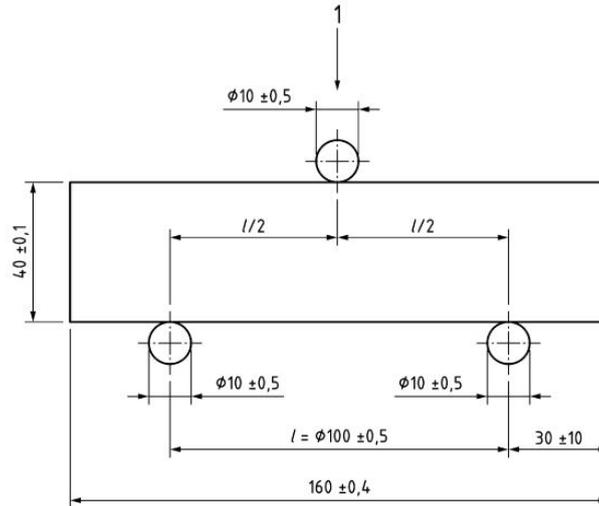


Abb. 4.13: Prüfeinrichtung Biegezugfestigkeit, [26]

mit

1 ... Last

l ... Abstand zwischen den Achsen der Auflagerrollen, in Millimeter

Die Höchstlast wird aufgezeichnet und mit dieser die Biegezugfestigkeit berechnet [26]:

$$f = 1,5 \cdot \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2} \quad (4.5)$$

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

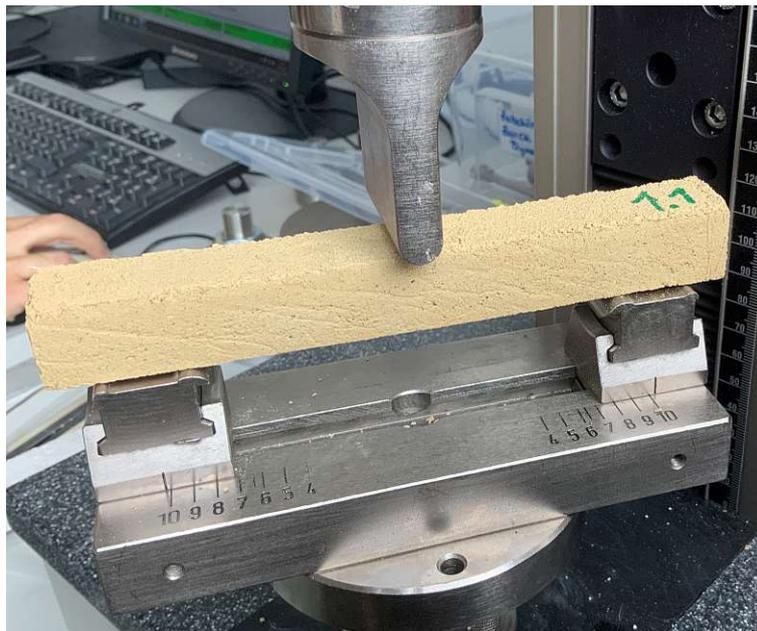


Abb. 4.14: Prüfeinrichtung mit Probekörper

4.5 Druckfestigkeitsprüfung

Die Druckfestigkeitsprüfung erfolgt ebenfalls wie die Biegezugfestigkeitsprüfung in Anlehnung an die DIN 1015-11 [26].

4.5.1 Anforderungen an Probekörper und Vorbereitung für die Prüfung

Die Probekörper müssen die Massenkonstanz erreicht haben und die Probe wird zwischen zwei Lasteintragungsplatten in die Prüfeinrichtung eingelegt, welche aus Wolframkarbid oder Stahl mit einer Oberflächenhärte von mindestens 600 HV (Härte Vickers) nach EN ISO 6507-1 sein müssen. Die geometrischen Anforderungen an die Lasteintragungsplatten werden nicht übernommen, da die Proben kleiner sind, als von der Norm verlangt. Stattdessen werden Stahlplättchen mit den Abmessungen 20 mm × 20 mm verwendet.

Unmittelbar nach der Drei-Punkt-Biegeprüfung werden die in der Mitte gebrochenen Probekörper für die Druckprüfung herangezogen, sofern diese im Bereich der Lasteintragung sichtlich unbeschädigt sind.

4.5.2 Bestimmung der Druckfestigkeit

Für die Druckfestigkeit muss unterschieden werden zwischen der Lasteinbringungsrichtung orthogonal und parallel zur Verdichtungsrichtung der Probekörper. Die Norm DIN EN 1015-11 gibt vor, dass die Belastungsrichtung orthogonal zur Verdichtungsrichtung, also auf eine der beiden seitlich geschalteten Flächen, zu sein hat. Um die Auswirkungen der Lasteintragungsrichtung auf die Druckfestigkeit zu untersuchen, wird für die Vorversuche die Last orthogonal als auch parallel zur Verdichtungsrichtung aufgebracht. Daraus gewonnene Erkenntnisse fließen in die darauf folgenden Versuche ein.

Wie in Kap. 4.4.2 beschrieben, werden Probekörper mit 160 mm × 20 mm × 20 mm durch die Biegezugprüfung halbiert. Die zwei entstandenen Probekörper mit ca. 80 mm × 80 mm × 20 mm

werden in die Lasteintragungsplatten eingespannt und in die Prüfeinrichtung so eingelegt, dass die Last stoßfrei über die ganze Fläche der Lasteintragungsplatten in den zu beprobenden Körper eingeleitet werden kann. Der Prüfkörper muss so angeordnet werden, dass die ausgeschaltete stirnseitige Endfläche $16 \pm 0.1\text{mm}$ vom nächsten Rand der Druckplatten oder der Lasteintragungsplatten entfernt ist [26].

Dies wird nicht nur für die stirnseitige Endfläche, sondern auch für die Bruchfläche eingehalten, zu sehen in Abbildung 4.15.

Die Last wird eingeleitet und kontinuierlich erhöht, bis der Bruch eintritt. Die Festigkeit wird danach als die vom Prüfkörper aufnehmbare Höchstlast, bezogen auf die Querschnittsfläche der Lasteintragungsplatte, berechnet [26]:

$$\sigma = \frac{F}{b \cdot l} \quad (4.6)$$

mit

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

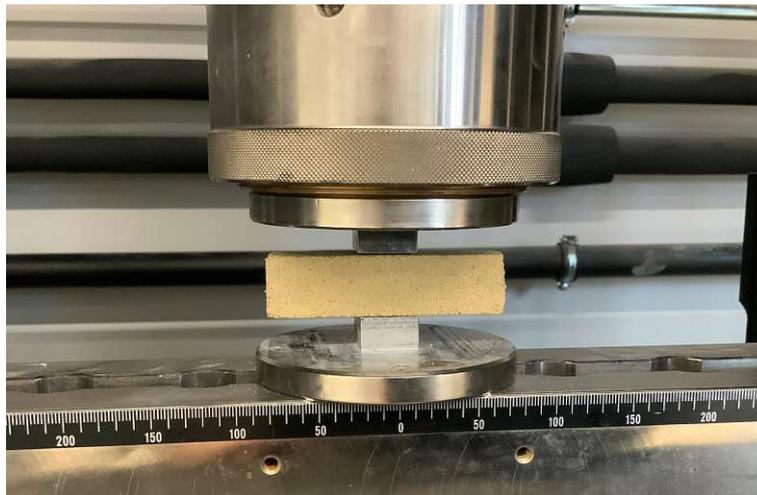


Abb. 4.15: Eingespannter Prüfkörper für die Druckfestigkeitsprüfung

4.6 Haftzugfestigkeitsprüfung

Für die Prüfung der Haftung der Lehmteilchen aneinander bzw. der verwendeten Materialien auf dem Lehm, ist nach DIN 18948:2018-12 die DIN EN 1015-12 zu verwenden. Diese regelt das Prüfverfahren zur Bestimmung der Haftzugfestigkeit zwischen Putz und Untergrund.

4.6.1 Anforderungen an Probekörper und Vorbereitung für die Prüfung

In Kapitel 6 der Norm werden folgende Anforderungen an die Proben gestellt:

- Beprobung von fünf Prüfflächen

- kreisförmige Prüfflächen mit Durchmesser von etwa 50 mm

Da kein mit dem Untergrund kraftschlüssig verbundenes Material beprobt wird, sondern Lehmprüfkörper, die lose auf dem Untergrund aufliegen, müssen die Probekörper über eine ausreichend große Fläche verfügen, damit das Dreibein der Prüfeinrichtung komplett auf dem Probekörper aufliegen kann.

Nach der Konditionierung im Klimaschrank und Erreichen der Massenkonstanz werden die Proben mittels Diamant-Dosenbohrer mit einem Durchmesser von 50 mm ca. 5 mm tief eingeschnitten, damit eine definierte Prüffläche entsteht (Abbildung 4.16). Bei den Proben mit Filzgewebe wird der Filz mit einem Winkelschleifer oktagonale durchtrennt (Durchmesser ebenfalls ca. 50 mm) und anschließend der Lehmprobekörper mit dem Diamant-Dosenbohrer eingeschnitten, siehe Abbildung 4.17.



Abb. 4.16: Prüfkörpervorbereitung

Nun werden Prüfstempel mit 50 mm Durchmesser mittels einem Zweikomponenten-Epoxidharzkleber auf die zu beprobende Oberfläche geklebt. Hierbei ist darauf zu achten, dass sich kein Kleber außerhalb des Randes der Prüfflächen befindet. Damit der Kleber vollständig aushärten kann, werden die Proben 24h bei Normklima gelagert. Dies ist in Abbildung 4.18 zu sehen.

4.6.2 Bestimmung der Haftzugfestigkeit

Das Testgerät proceq dy-216 belastet den Prüfstempel orthogonal zur Prüffläche mit einer Geschwindigkeit von $0,025 \text{ N}/(\text{mm}^2 \text{ s})$ (siehe Abbildung 4.19). Laut DIN EN 1015-12 sind die Einzelwerte der Haftzugfestigkeit nach folgender Gleichung, gerundet auf $0,05 \text{ N}/\text{mm}^2$, zu berechnen:

$$f_u = \frac{F_u}{A} \quad (4.7)$$



Abb. 4.17: Prüfkörpervorbereitung Filz



Abb. 4.18: Aufgelebte Prüfstempel für Haftzugfestigkeitsprüfung



Abb. 4.19: Auf Probekörper 2.1 aufgesetztes Haftzugprüfgerät proceq dy-216

Die Haftzugfestigkeit wird als Mittelwert aus den Einzelwerten der drei Probekörper berechnet. Eine Ausnahme bilden die Probekörper mit 6 Ma% Löschkalk. Hier können nur zwei brauchbare Messungen gemittelt werden, da die Haftzugfestigkeit so gering ausfällt. In untenstehender Abbildung ist die Vorrichtung zur Haftzugfestigkeitsprüfung zu sehen.

5 Ergebnisauswertung und Conclusio

Dieser Abschnitt behandelt die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse aller geprüften Lehmkörper. Am Ende des Kapitels sind die Festigkeiten in einer tabellarischen Übersicht einander gegenübergestellt. Es werden folgende Abkürzungen in den nachstehenden Tabellen verwendet:

- \bar{x}_D ... Mittelwert der Festigkeiten aller dynamisch verdichteten Proben aus den Vorversuchen
- \bar{x}_S ... Mittelwert der Festigkeiten aller statisch verdichteten Proben aus den Vorversuchen
- $\bar{x}_{Mi,j}$... Mittelwert der Festigkeiten aller Proben aus den Versuchen je Materialkombination
- s ... Standardabweichung der Festigkeiten über die Grundgesamtheit aller Proben je Materialkombination

5.1 Rohdichte

Die normgemäß ermittelten Rohdichten der Lehmprobekörper betragen auf 10 kg/m^3 gerundet:

Tab. 5.1: Gewicht Referenzprobekörper bei Massenkonstanz ($23^\circ\text{C}/50\%$ rel.LF.)

Material	Rohdichte gerundet [kg/m^3]
Referenzprobekörper	1850
Lehm mit Flachsgewebematte	1850
Lehm mit Filz*	1840
Lehm mit Kasein (1 Ma%)	1710
Lehm mit Kasein (5 Ma%)	1630
Lehm mit Kalk gelöscht (4 Ma%)	1780
Lehm mit Kalk gelöscht (6 Ma%)	1730
Lehm mit Holzfasern (0.5 Ma%)	1790
Lehm mit Holzfasern (1.5 Ma%)	1740
Lehm mit Holzfasern (2.5 Ma%)	1720
Referenz dyn. verdichtet	1860
Referenz stat. verdichtet	1850

*Die Dichte bezieht sich auf den Lehmkörper exkl. Filzmatte

Aus

bzw. 2,0 fallen und daher nicht als Leichtlehmplatten bezeichnet werden dürfen. Die Referenzprobekörper sind mit 1850 kg/m^3 relativ dicht gestampft, was auf eine suffiziente Verdichtung schließen lässt. Minke schreibt über Stampflehm von einer Dichte von 1700 bis 2200 kg/m^3 , wobei die höheren Werte mehr Kies, Schotter oder Gesteine enthalten und dadurch eine verbesserte

Korn-zu-Korn Übertragung des Druckes ermöglicht wird [1].

Für die Lehmprobekörper mit Filz wurde nur der Lehm für die Ermittlung der Rohdichte herangezogen. Es zeigt sich nur eine geringfügig niedrigere Dichte des Lehmes mit dem Filz. Die Abweichung liegt bei 0.5% bezogen auf den Referenzprobekörper. Durch die Messungenauigkeit relativiert sich der Unterschied und die Dichte kann als gleich groß betrachtet werden.

Wegen der Elastizität des Filzgewebes kommt es bei der dynamischen Verdichtung zu einer Federwirkung, wodurch ein Teil der Energie nicht als Verdichtungsarbeit geleistet wird (siehe Abbildung unten). Die geringere Dichte gegenüber der Dichte des Referenzprobekörpers beträgt allerdings nur 0.5% und ist daher vernachlässigbar.

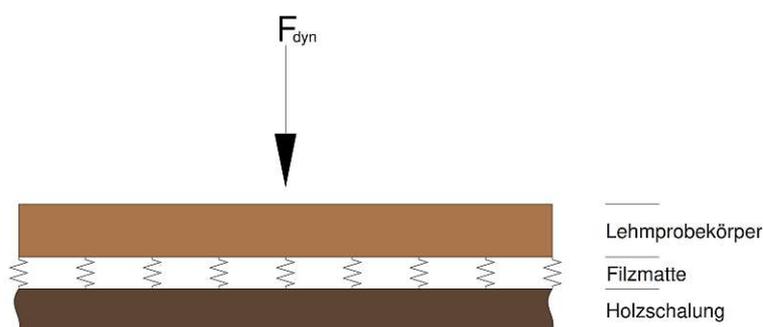


Abb. 5.1: Masse-Feder bei Probekörper Lehm mit Filzmatte

Beimischungen von Kasein verringern die Probekörperdichte um bis zu 13%, die Probekörper mit Löschkalkanteil sind bis zu 7% weniger dicht. Die Lehmprobekörper mit Holzfasern weisen eine bis zu 7% geringere Dichte auf als die Referenzprobekörper. Die Dichten sind geringer, da die Wichten der einzelnen Komponenten (Kasein, Wasser, Holz) geringer sind als die Wichte des Lehmes. Was den Vergleich der dynamisch verdichteten Probekörper mit den statisch verdichteten Probekörpern betrifft, so sind die dynamisch verdichteten Probekörper um ca. 0.5% dichter als die statisch verdichteten. Auch hier sind die Messungenauigkeiten im Verhältnis zum Dichteunterschied so hoch, dass die Dichte als gleich groß bestimmt werden kann. Mehr dazu in Kapitel 5.2.

5.2 Vorversuche statische und dynamische Verdichtung

Um die in Kapitel 4.1.3 beschriebene Wirksamkeit der statischen und dynamischen Verdichtung der Probekörper vergleichen zu können, werden Vorversuche durchgeführt. Zu den Randbedingungen siehe Kapitel 4.1.3.

5.2.1 Biegezugfestigkeit Referenzprobekörper

Die Biegezugfestigkeit der statisch verdichteten Referenzprobekörper nach Formel 4.5 beträgt im Mittel $0,96 \text{ N/mm}^2$. Im Vergleich dazu beträgt die Biegezugfestigkeit der dynamisch verdichteten Referenzprobekörper $1,16 \text{ N/mm}^2$. Dies entspricht einer Festigkeitssteigerung von mehr als 20%. In Tabelle 5.2 sind die Ergebnisse der Biegezugversuche mit dargestellt. Die Bruchlasten streuen zwischen den verschiedenen Probekörpern kaum. Über die gesamte Belastungsdauer sind keine spontanen Ausschläge über die Ordinate zu sehen, was darauf hinweist, dass der Querschnitt nicht lokal versagt bevor die Bruchlast erreicht ist. Sobald die äußerste Faser versagt, reißt der

Querschnitt über die gesamte Querschnittshöhe. Dies ergibt eine recht gerade Bruchkante, was in Abbildung 5.2 an den zerstörten Referenzprobekörpern zu sehen ist.

Tab. 5.2: Biegezugfestigkeit der statisch und dynamisch verdichteten Referenzprobekörper

Material	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]
D1	1.16
D2	1.19
D3	1.14
\bar{x}_D	1.16
s	0.02
S1	1.04
S2	0.90
S3	0.94
\bar{x}_S	0.96
s	0.06

5.2.2 Druckfestigkeit Referenzprobekörper

Die Druckfestigkeiten bei nahezu gleicher Dichte der dynamisch und statisch verdichteten Probekörper (vgl. Tab. 5.1) nach Formel 4.6 betragen:

- Last orthogonal zur Verdichtungsrichtung:
 - 2,55 N/mm² bei dynamischer Verdichtung
 - 1,77 N/mm² bei statischer Verdichtung
- Last parallel zur Verdichtungsrichtung:
 - 1,79 N/mm² bei dynamischer Verdichtung
 - 1,31 N/mm² bei statischer Verdichtung

Wenn die Last orthogonal zur Verdichtungsrichtung aufgebracht wird, ergibt sich für die dynamische Verdichtung eine im Mittel um 42% höhere Druckfestigkeit im Vergleich zur Belastung parallel zur Verdichtungsrichtung. Bei der statischen Verdichtung weist die Druckfestigkeit einen um 35% höheren Wert auf.

Die Probekörper der dynamischen Verdichtung weisen durchschnittlich eine um mehr als 40% höhere Druckfestigkeit als die statisch verdichteten Probekörper auf. Eine tabellarische Zusammenfassung der Druckfestigkeiten aller Prüfkörper findet sich untenstehend in Tabelle 5.3. Die mit * gekennzeichneten Werte sind Versuche, bei denen die Last parallel zur Verdichtungsrichtung aufgebracht wird.

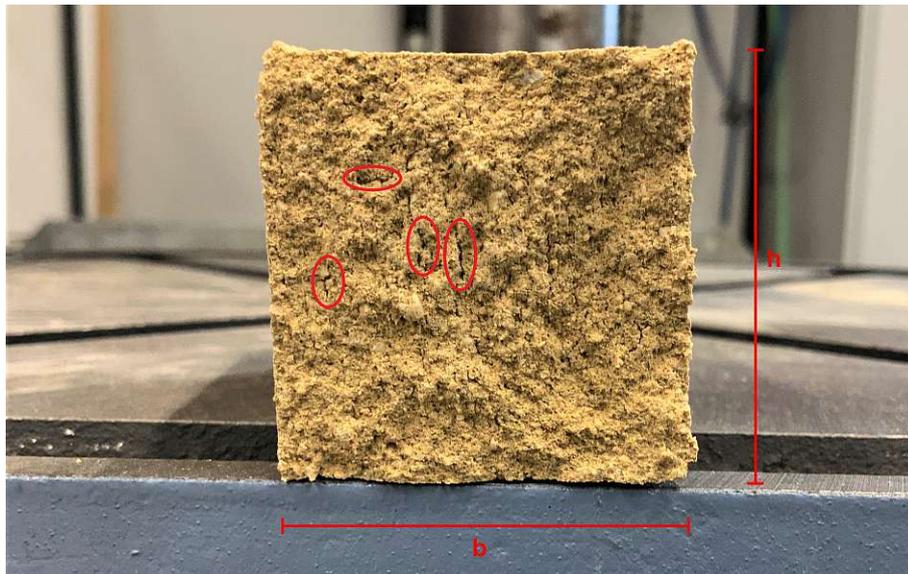
In Abbildung 5.3 ist der Querschnitt eines statisch verdichteten Referenzprobekörpers zu sehen. Die ungeschaltete Seite befindet sich oben. In Richtung der Krafteintragung sind Hohlräumbildungen zu sehen, die bis zu 4 mm lang sind. Die reduzierten Druckfestigkeiten der Probekörper mit zur Verdichtungsrichtung paralleler Krafteintragung können dadurch teils erklärt werden. Denn die bei vertikaler Belastung wirkenden Korn-zu-Korn Druckkräfte bedingen durch Kraftumlenkungen Querkraftkräfte, die innerhalb des Lehmgefüges aufgenommen werden müssen. Sind nun Hohlräume vorhanden, wird die effektive Querschnittsfläche (erstreckt sich in folgender Abbildung über h und aus der Ebene) reduziert, weil in luftgefüllten Porenräumen keine Kraft übertragen werden kann, wodurch der Querschnitt früher versagt.



Abb. 5.2: Zerstörte Probekörper nach der Biegezugfestigkeitsprüfung, D1-D3 und S1-S3

Tab. 5.3: Druckfestigkeit der statisch und dynamisch verdichteten Referenzprobekörper

Material	Druckfestigkeit [N/mm ²]
D1	2.51
D2	2.78
D3	2.35
\bar{x}_D	2.55
s	0.18
S1	1.36
S2	1.79
S3	2.17
\bar{x}_S	1.77
s	0.33
D1*	1.65
D2*	1.71
D3*	2.01
\bar{x}_{D^*}	1.79
s*	0.16
S1*	1.36
S2*	1.16
S3*	1.40
\bar{x}_{S^*}	1.31
s*	0.11

**Abb. 5.3:** Querschnitt eines statisch verdichteten Referenzprobekörpers, ungeschalte Fläche oben, sichtbare Hohlrumbildungen entlang der Krafteinbringungsrichtung während der Verdichtung

Es wurden zusätzlich Haftzugfestigkeitsprüfungen der Proben mit $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.4 dargestellt. Hier ist ersichtlich, dass die dynamisch verdichteten Probekörper über eine bessere innere Haftung verfügen als die statisch verdichteten.

Tab. 5.4: Haftzugfestigkeit der statisch und dynamisch verdichteten Referenzprobekörper

Material	Haftzugfestigkeit [N/mm ²]
D1	0.24
D2	0.19
D3	0.21
\bar{x}_D	0.21
s	0.025
S1	0.18
S2	0.18
S3	0.18
\bar{x}_S	0.18
s	0

5.2.3 Vergleich statische Verdichtung mit dynamischer Verdichtung

Es wird bei der dynamischen und bei der statischen Verdichtung solange verdichtet, bis augenscheinlich keine weitere Probekörperstauchung mehr feststellbar ist. Die zu den Probekörpern beider Verdichtungsarten gehörigen Dichten weichen kaum voneinander ab. Daher kann davon ausgegangen werden, dass alle Referenzprobekörper gleichermaßen gut verdichtet worden sind. Die Vorversuche haben gezeigt, dass durch die Wahl der Verdichtungsmethode sowohl die Biegezugfestigkeit als auch die Druckfestigkeit des Lehmestoffes deutlich gesteigert werden kann. Bei nicht industriell hergestellten Lehmkörpern kann durch die dynamische Verdichtung die Biegezugfestigkeit um 1/5 (20%) und die Druckfestigkeit um 40% erhöht werden. Aus diesem Grund wird für die weitere Probekörperherstellung entschieden, dass alle Probekörper mittels dynamischer Verdichtung hergestellt werden.

5.3 Versuche

Die Erkenntnisse aus den Vorversuchen (Kapitel 5.2) werden für die Versuchsdurchführung aller Probekörper mit und ohne Additive und mit und ohne Armierung aus natürlichen Rohstoffen übernommen. Insbesondere werden alle Probekörper bei ihrer Herstellung dynamisch verdichtet. In diesem Kapitel finden sich die Ergebnisse der Biegezug- und Druckprüfung sowie der Haftzugprüfung. Am Ende des Kapitels findet sich eine Zusammenfassung der Ergebnisse (Abschnitt 5.3.7).

5.3.1 Referenzprobekörper

Die mittlere Biegezugspannung in den reinen Lehmprobekörpern, berechnet nach Formel 4.5, beträgt $1,12 \text{ N/mm}^2$ (Standardabweichung $0,031 \text{ N/mm}^2$) und weicht um ca. 3.5% von der mittleren Biegezugspannung der dynamisch verdichteten Referenzprobekörper ab (vgl. Kap. 5.2.1). Dies liegt an den Inhomogenitäten der Probekörper, welche durch das Verdichten und Trocknen entstehen. Es bilden sich dabei Porenräume und Risse. Der in Kap. 4.4.2 erwähnte Skalierungseffekt tritt für die Referenzprobekörper somit nicht auf, bzw. in einem zu vernachlässigenden

Maß, was die Verwendung von schlankeren Probekörpern gegenüber den in der Norm geforderten Prüfkörpern legitimiert. Die in der folgenden Abbildung zu sehenden vertikalen Ausschläge im Last-Zeit Diagramm sind auf diese Inhomogenitäten zurückzuführen. Bereits vorhandene Risse vergrößern sich schlagartig und die Normalspannungen in Längsrichtung der Proben lagern sich um, sodass die Last weiter gesteigert werden kann, bis die Biegezugspannung in der äußersten Faser im gezogenen Bereich des Probekörpers die kritische Grenzspannung erreicht und dieser spontan versagt. Ausschläge im Last-Zeit Diagramm, die in den ersten Sekunden nach der Belastung dargestellt sind, können darauf zurückgeführt werden, dass bei der Verdichtung entstehende Grate an der Fläche der Oberseite des Probekörpers (wo das Proctorgerät aufgesetzt wird) durch die Lastrolle mit geringem Kraftaufwand zerstört werden. Die Lastrolle liegt erst danach über die ganze Probekörperbreite auf dem Probekörper auf und die Last wird weiter gesteigert. In Abbildung 5.4 ist die Bruchlast dargestellt und Abbildung 5.5 zeigt die zerstörte Probe nach dem Dreipunkt-Biegeversuch.

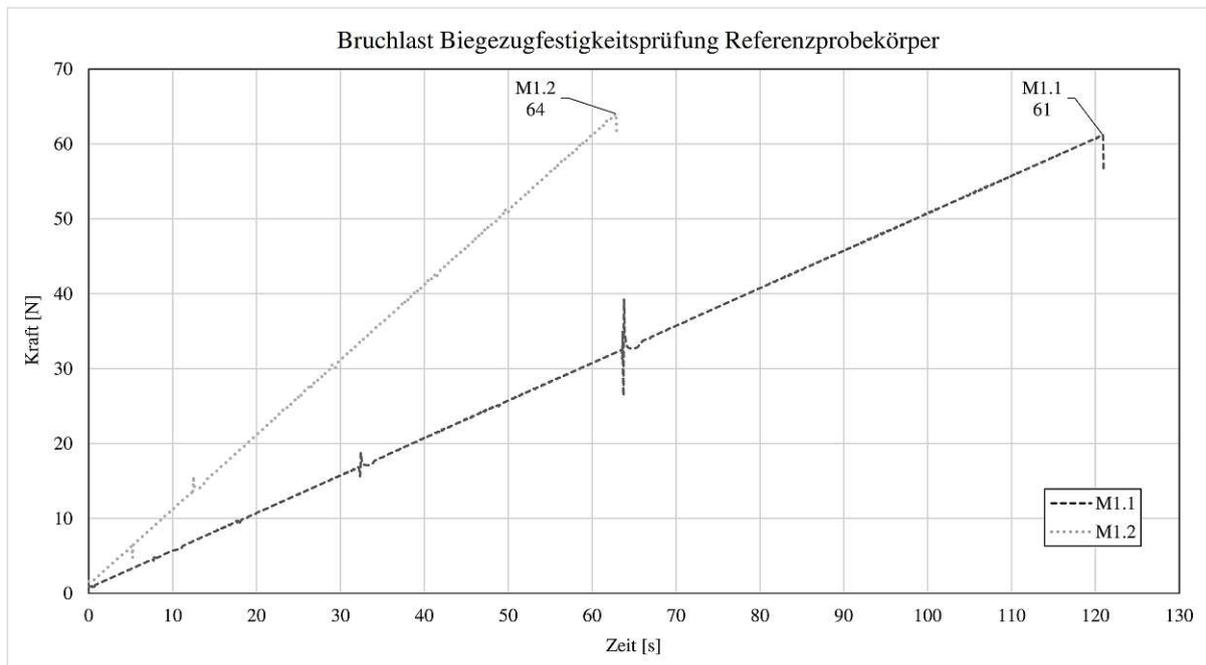


Abb. 5.4: Bruchlasten der Biegezugversuche der Referenzprobekörper

Die Druckfestigkeit der Referenzprobekörper wurde im Mittel über alle Proben mit $2,36 \text{ N/mm}^2$ mit einer zugehörigen Standardabweichung von $0,358 \text{ N/mm}^2$ ermittelt. Die maximale Druckfestigkeit liegt bei $2,82 \text{ N/mm}^2$ bei Probe M1.2 und die minimale Druckfestigkeit bei $1,96 \text{ N/mm}^2$ bei M1.4, was eine Abweichung vom Mittelwert von etwa 20% bedeutet (Zusammenfassung in Tabelle 5.5). Diese Schwankungen finden sich auch in den Druckfestigkeitsprüfungen der Vorversuche wieder (vgl. 5.2.2) und beruhen auf den verschiedenen Kornverteilungen in den Probekörpern untereinander und auf deren manuelle und daher nicht exakt gleichen Verdichtungen. Der Versagensmechanismus kann wie folgt beschrieben werden: Während die Last auf den Probekörper aufgebracht wird, erfährt er eine in Krafteinleitungsrichtung zunehmende Stauchung. Diese Stauchung ist aufgrund der hohen Reibungskräfte zwischen Druckstempel und Probe und zwischen Auflagerfläche und Probe nicht konstant über die Probenhöhe. An den Kontaktstellen ist die Stauchung nahezu null und in der Probenmitte am Größten. In der Mitte des Probekörpers kann dieser seitlich ausweichen, an den Kontaktstellen erfährt dieser eine Verformungsbehinde-



Abb. 5.5: Zerstörte Probe M1.1 nach dem Dreipunkt-Biegeversuch

rung. Dadurch entstehen von den Kontaktstellen ausgehend zwei Druckkegel. Da es sich um einen spröden Werkstoff handelt und der Probekörper seitlich an den Kontaktstellen nicht ausweichen kann, schieben sich die Druckkegel keilförmig gegeneinander, was hohe Schubspannungen in der Mitte des Probekörpers bewirkt. Die größten Schubspannungen wirken unter 45° zur Belastungsrichtung und es kommt entlang dieser Scherfugen zum Bruch der Probe [27]. Die kegelförmigen Ausbrüche und die Scherfläche sind in Abbildung 5.6 zu sehen. In Abbildung 5.7 ist die zerstörte Teilprobe des Probekörpers M1.1 zu sehen.

Tab. 5.5: Druckfestigkeit der Referenzprobekörper

Material	Druckfestigkeit [N/mm ²]
M1.2	2.82
M1.3	2.29
M1.4	1.96
$\bar{x}_{M1.j}$	2.36
s	0.36



Abb. 5.6: Zerstörter Probekörper mit sichtbaren kegelförmigen Ausbrüchen



Abb. 5.7: Zerstörte Teilprobe M1.1 nach der Druckfestigkeitsprüfung

Die Oberflächenzugfestigkeit bzw. Haftzugfestigkeit innerhalb des Probekörpers beträgt für die Referenzprobekörper im Mittel $0,19 \text{ N/mm}^2$ (siehe Tabelle 5.6). Die Standardabweichung beträgt weniger als $0,02 \text{ N/mm}^2$ und bestätigt die geringe Streuung der Ergebnisse. Die Ausbruchsgeometrie ist kegelförmig, wie auf Abbildung 5.8 sichtbar ist. Es wird dabei nicht nur eine oberflächennahe Lehmschicht zerstört, sondern die Bruchkegelhöhe ist teilweise sogar gleich der Plattenstärke von 15 mm . Die in der Lehmplattenprüfnorm DIN 18948 geforderte minimale Oberflächenzugfestigkeit von $0,1 \text{ N/mm}^2$ wird für jede Probe eingehalten.

Tab. 5.6: Haftzugfestigkeit der Referenzprobekörper

Material	Haftzugfestigkeit [N/mm ²]
M1.1	0.17
M1.2	0.17
M1.3	0.21
M1.5	0.20
$\bar{x}_{M1,j}$	0.19
s	0.018



Abb. 5.8: Zerstörter Probekörper M1.2 nach der Haftzugfestigkeitsprüfung

5.3.2 Lehm mit Flachsgewebe

Die im Mittel berechnete Biegezugfestigkeit in den Lehmprobekörpern mit Flachsgewebe als Zugarmierung beträgt $1,17 \text{ N/mm}^2$ mit einer Standardabweichung von $0,088 \text{ N/mm}^2$. Dies entspricht einer Steigerung gegenüber der Biegezugfestigkeit der Referenzprobekörper um ca. 4.5 %. Die Biegezugfestigkeiten finden sich in Tabelle 5.7. Bei der Herstellung der Probekörper wurden die Matten in die Schalung eingelegt und der Lehm in die Schalung gefüllt und verdichtet. Dadurch ergibt sich so gut wie keine Lehmdeckung über den Flachsfasern, die notwendig wäre, um einen guten Verbund zwischen dem Flachs und dem Lehm herzustellen. Der geringe Verbund ist nicht ausreichend, um die bei der Biegung entstehenden Zugkräfte in die Flachsfasern einzuleiten. Die Folge ist ein Herausziehen der Flachsfasern aus dem Lehm in Probekörperlängsrichtung. Ab

diesem Zeitpunkt wird die Flachsgewebematte unwirksam und es kommt zu einer Spannungsumlagerung, bei dem sich ein über die Lehmkörperhöhe linearer Normalspannungsverlauf einstellt, was bedeutet, dass der Lehmkörper in der Zugzone die vollen Zugspannungen aufnehmen muss. Der Lehmkörperquerschnitt in der Randfaser mit der maximalen Zugspannung ist zusätzlich geschwächt, denn die Fasern verdrängen das Lehmvolumen, wodurch eine Sollbruchstelle im Lehm entsteht. Das Herausziehen der Flachsfasern geschieht im vorliegenden Versuch so frühzeitig, dass das aufnehmbare Biegemoment des Probekörpers mit Flachsgewebematte jenes des Referenzprobekörpers nicht übersteigt. Als Folge dessen wurden bei keinem der Prüfkörper gerissene Flachsfasern festgestellt, was bedeutet, dass die Fasern ihre Zugfestigkeit nicht überschreiten konnten. In Abbildung 5.9 ist zu sehen, wie sich die Flachsgewebematte vom Lehmprobekörper gelöst hat.

Tab. 5.7: Biegezugfestigkeit der Lehmprobekörper mit Flachsgewebe

Material	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]
M2.1	1.29
M2.2	1.16
M2.3	1.21
M2.4	1.05
$\bar{x}_{M2.j}$	1.17
s	0.09



Abb. 5.9: Zerstörte Probe nach dem Dreipunkt-Biegeversuch

Für die Haftzugfestigkeitsprüfung wurde bei einem Probekörper das Flachsgewebe vor der Prüfung kreisförmig mit dem Durchmesser des Prüfstempels durchtrennt (50 mm), um den Einfluss des Flachsgewebes auf die Haftzugfestigkeit zu untersuchen (Probekörper M2.3*). Die restlichen Probekörper wurden vor der Prüfung nicht verändert. Die mittlere Haftzugfestigkeit über alle Probekörper ergibt sich zu 0,24 N/mm², die Haftzugfestigkeit des Probekörpers mit durchtrenntem Flachsgewebe M2.3* beträgt 0,23 N/mm² (Tabelle 5.8). Das lässt vermuten, dass zumindest Flachsgewebe mit sehr geringer Lehmdeckung keinen Einfluss auf die Haftzugfestigkeit des Lehmes hat. Dies lässt sich durch die oberflächennahe Aufbringung des Flachsgewebes erklären, welches ohne Lehmdeckung keinen signifikanten Herausziehungswiderstand aus dem Lehmgefüge bietet und dadurch keinen größeren Ausziehkegel im Lehm verursacht. Um diese Vermutung zu

bestätigen, muss das Versuchsergebnis in Zukunft durch mehrere Prüfkörper bestätigt werden. In Abbildung 5.10 ist der Probekörper M2.3* zu sehen, bei dem die Durchtrennung des Flachsgewebes erfolgt ist. Darunter ist in Abbildung 5.11 der Probekörper M2.4 ohne Durchtrennung des Gewebes zu erkennen. Die Ausbruchskegel sind hier von gleichem Durchmesser.

Tab. 5.8: Haftzugfestigkeit der Probekörper mit Flachsgewebematten

Material	Haftzugfestigkeit [N/mm ²]
M2.1	0.23
M2.2	0.20
M2.3*	0.23
M2.4	0.28
$\bar{x}_{M2.j}$	0.235
s	0.003

mit

* ... Prüfkörper mit vor dem Versuch kreisförmig durchtrenntem Flachsgewebe

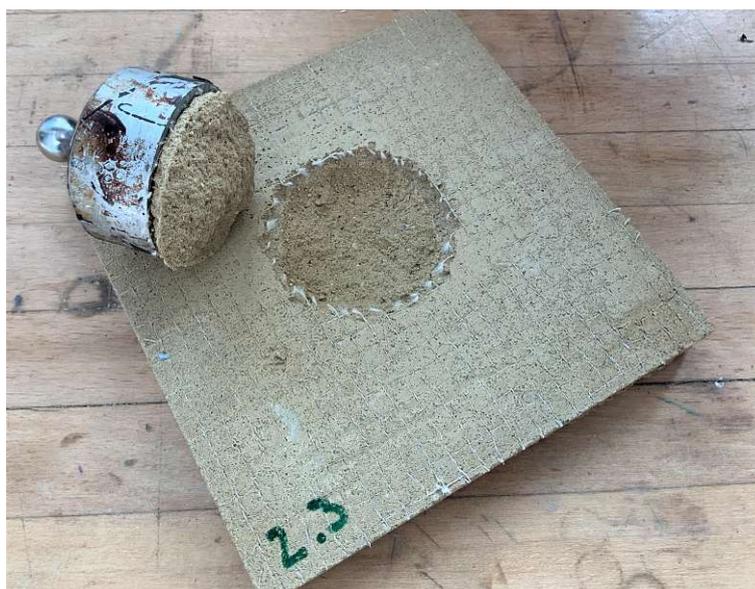


Abb. 5.10: Zerstörter Probekörper mit kreisförmig durchtrenntem Flachsgewebe vor Haftzugfestigkeitsprüfung



Abb. 5.11: Zerstörter Probekörper ohne vor Haftzugfestigkeitsprüfung durchtrenntem Flachsgewebe

5.3.3 Lehm mit Filz

Eine Bestimmung der mittleren Biegezugfestigkeit der Lehmprobekörper mit Filzbewehrung ist nicht aussagekräftig, da bei einem von drei Prüfkörpern der Verbund zwischen der Filzmatte und dem Lehm nicht ausreichend gut war (zum Mechanismus vgl. Kap. 5.3.2). Bei der zweiten Probe trat der Bruch in Auflagernähe auf, was in Abbildung 5.14 dargestellt ist. Der Probekörper versagte durch Herausziehen der Filzfasern aus dem Lehmgefüge, bevor der Filz die Zugspannungen aufnehmen konnte. In Abbildung 5.13 ist zu sehen, wie sich nach der Biegezugfestigkeitsprüfung das Filzgewebe relativ zum Lehm in Längsrichtung der Probe verschoben hat. Probekörper M3.2 versagte erst bei einer Bruchlast von 150 N, was im Vergleich zu den Referenzproben einer um 240% höheren Last entspricht. Hier wurde kein Herausziehen der Filzfasern aus dem Lehm beobachtet, was für einen guten Verbund spricht. Es sind bei ca. 52 Sekunden und 72 Sekunden nach Belastungsbeginn starke vertikale Ausschläge in Abbildung 5.12 zu sehen. Daher liegt die Vermutung nahe, dass zu diesen Zeitpunkten der Lehmprobekörper in der äußersten Zugfaser lokal die Zugspannungen nicht mehr aufnehmen kann und die Zugkraft dann vom Filz aufgenommen wird. Vorschläge für Maßnahmen um einen guten Verbund zwischen Filz und Lehm zu gewährleisten, sind in Kap. 5.4 erläutert. Dem ist hinzuzufügen, dass die für die Haftzugfestigkeit hergestellten Probekörper mit einer Größe von 150 mm × 150 mm × 15 mm über einen besseren Schubverbund zwischen Lehm und Filz verfügen dürften, als jene für die Biegezugfestigkeit hergestellten Prüfkörper, da aus geometrischen Gründen (Abmessungen zu klein) der Filz nicht kreisförmig ausgestanzt werden konnte und sich beim Verdichten dadurch keine „Schubknaggen“ im Lehm in Form von zylindrischen Erhebungen (vgl. Abbildung 5.15) ausbilden konnten. Hier ist Potential zur Steigerung der Biegezugfestigkeit vorhanden, welches durch weiterführende Untersuchungen genauer ermittelt werden sollte.

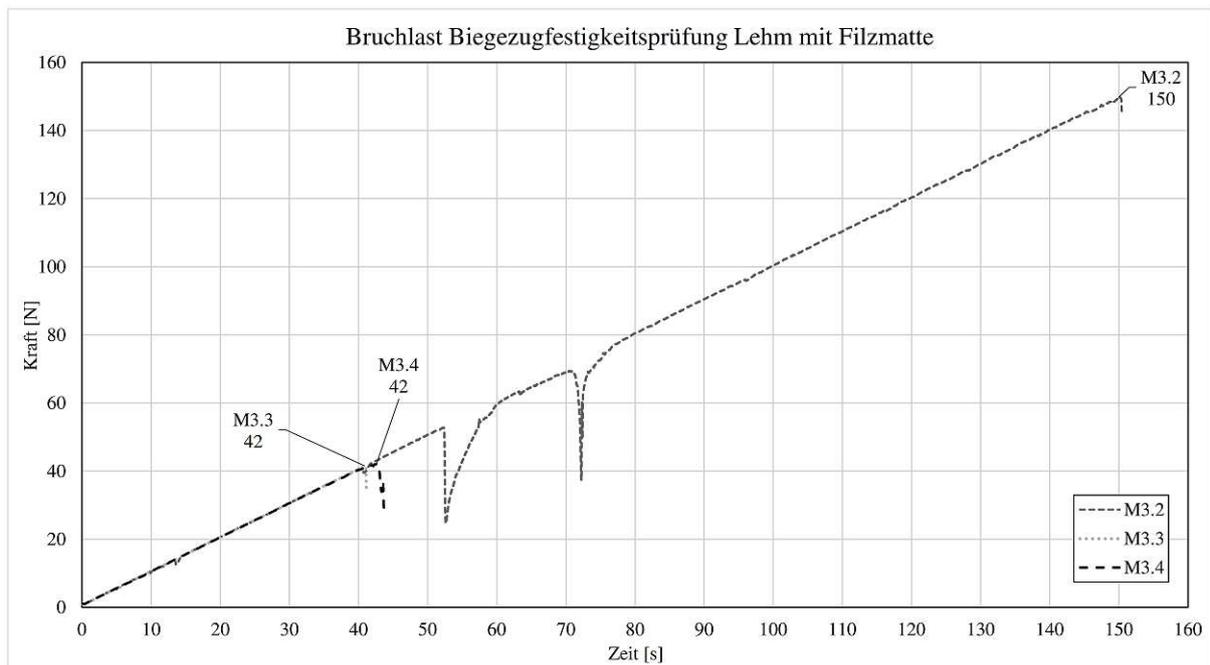


Abb. 5.12: Bruchlasten der Biegezugversuche der Lehmprobekörper mit Filzmatte



Abb. 5.13: Zerstörter Probekörper mit Filzmattenbewehrung nach dem Dreipunkt-Biegeversuch



Abb. 5.14: Zerstörter Probekörper mit Filzmattenbewehrung beim Dreipunkt-Biegeversuch, Bruch in Auflagernähe

Zur Haftzugfestigkeit des Filzes auf dem Lehm ist zu sagen, dass ein Adhäsionsversagen zwischen Filz und Lehm stattfindet und somit die Haftzugfestigkeit innerhalb des Filzgewebes höher ist als die erreichte Haftzugfestigkeit zwischen Filz und Lehm. Die mittlere Haftzugfestigkeit beträgt $0,07 \text{ N/mm}^2$ und liegt somit unter den lt. Lehmplattennorm DIN 18948 angegebenen $0,10 \text{ N/mm}^2$ (Tabelle 5.9). Allerdings gilt dieser Grenzwert für die Haftzugfestigkeit innerhalb des Lehmgefüges und nicht für die Haftung von Bewehrungen auf dem Lehm. Abbildung 5.15 zeigt den zerstörten Probekörper.

Tab. 5.9: Haftzugfestigkeit der Probekörper mit Filzmatten

Material	Haftzugfestigkeit [N/mm ²]
M3.1	0.07
M3.2	0.06
M3.3	0.07
$\bar{x}_{M3.j}$	0.067
s	0.005



Abb. 5.15: Zerstörter Probekörper mit Filzmattenbewehrung nach der Haftzugfestigkeitsprüfung

5.3.4 Lehm mit Kasein

Die mittleren Biegezugfestigkeiten betragen $0,49 \text{ N/mm}^2$ für Lehm mit 1 Ma% Kaseinanteil (Standardabweichung $0,06 \text{ N/mm}^2$) und $0,44 \text{ N/mm}^2$ für Lehm mit 5 Ma% Kaseinanteil (Standardabweichung $0,214 \text{ N/mm}^2$). Alle Ergebnisse sind in Tabelle 5.10 zusammengefasst. Die Lehmprüfkörper mit 10 Ma% Kaseinanteil konnten nicht geprüft werden, da die Festigkeiten so gering ausfielen, dass eine Auswertung nicht sinnvoll erscheint. Die Prüfkörper M6.4 und 7.4 erfahren ein Biegeversagen, allerdings vermutlich durch Inhomogenitäten, denn der zum Versagen führende Riss ist nicht an der gleichen Stelle wie das maximal auftretende Biegemoment (siehe Abbildung 5.16 und Abbildung. 5.18). Der Probekörper 7.2 wies bereits vor der Prüfung Risse auf, siehe Abbildung 5.17. Die Bruchlasten und somit die Biegezugfestigkeiten sind so gering, dass sich eine Weiterverfolgung der Zusammensetzung der Lehmprüfkörper mit Kaseinanteil ohne andere Zusatzstoffe nicht lohnt. Eine Beimischung von alkalisch wirkenden Stoffen wie Natriumhydrogencarbonat oder Calciumhydroxid bewirkt eine hohe Bindekraft des Kaseins und kann für nachfolgende Forschungen in Betracht gezogen werden.



Abb. 5.16: Zerstörter Probekörper mit 1 Ma% Kasein mit Biegeversagen durch Materialinhomogenitäten beim Dreipunkt-Biegeversuch



Abb. 5.17: Probekörper mit 5 Ma% Kasein mit erkennbaren Rissen vor der Biegezugfestigkeitsprüfung



Abb. 5.18: Zerstörter Probekörper mit 5 Ma% Kasein mit Biegeversagen durch Materialinhomogenitäten beim Dreipunkt-Biegeversuch

Tab. 5.10: Biegezugfestigkeit der Lehmprobekörper mit Kaseinanteil 1 Ma% (M6) und 5 Ma% (M7)

Material	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]
M6.1	0.45
M6.2	0.59
M6.3	0.46
M6.4	0.45
$\bar{x}_{M6.j}$	0.49
s	0.06
M7.2	0.15
M7.3	0.50
M7.4	0.66
$\bar{x}_{M7.j}$	0.44
s	0.21

Für die Druckfestigkeiten ergeben sich Mittelwerte von 1,77 N/mm² für Lehm mit 1 Ma% Kasein (Standardabweichung 0,091 N/mm²) und 1,93 N/mm² für Lehm mit 5 Ma% Kasein (Standardabweichung 0,11 N/mm²). Alle Werte sind in Tabelle 5.11 dargestellt. Die Druckfestigkeiten gegenüber dem Referenzprobekörper reduzieren sich somit drastisch um bis zu 22%.

Tab. 5.11: Druckfestigkeit der Lehmprobekörper mit Kaseinanteil 1 Ma% (M6) und 5 Ma% (M7)

Material	Druckfestigkeit [N/mm ²]
M6.1	1.69
M6.2	1.89
M6.3	1.71
$\bar{x}_{M6.j}$	1.77
s	0.09
M7.1	1.78
M7.2	2.02
M7.3	1.86
M7.4	2.04
$\bar{x}_{M7.j}$	1.93
s	0.11

Die Haftzugfestigkeiten der Probekörper mit 1 Ma% und 5 Ma% Lehmanteil sind mit durchschnittlich 0,13 N/mm² höher als die geforderten 0,10 N/mm². Allerdings ist dies nicht für alle Proben der Fall (M7.1) und eine Erfüllung des Kriteriums kann daher nicht gewährleistet werden. Die Ergebnisse sind in 5.12 tabellarisch dargestellt. Die schlechte Qualität der Materialmischungen ist in den Abbildungen 5.19 und 5.20 zu sehen.

Tab. 5.12: Haftzugfestigkeit der Probekörper mit Kasein 1 Ma% (M6) und 5 Ma% (M7)

Material	Haftzugfestigkeit [N/mm ²]
M6.3	0.11
M6.4	0.15
M6.5	0.13
$\bar{x}_{M6.j}$	0.125
s	0.022
M7.1	0.09
M7.4	0.13
M7.5	0.15
M7.7	0.13
$\bar{x}_{M7.j}$	0.125
s	0.022

**Abb. 5.19:** Zerstörter Probekörper mit 1 Ma% Kasein nach der Haftzugfestigkeitsprüfung



Abb. 5.20: Zerstörter Probekörper mit 5 Ma% Kasein nach der Haftzugfestigkeitsprüfung

5.3.5 Lehm mit Kalk gelöscht

Die Biegezugfestigkeit für Lehm mit 4 Ma% Löschkalk wurde zu $0,25 \text{ N/mm}^2$ ermittelt. Die zugehörige Standardabweichung beträgt $0,02 \text{ N/mm}^2$. Für die Probekörper mit 6 Ma% Löschkalkanteil beträgt sie $0,20 \text{ N/mm}^2$ (Standardabweichung $0,082 \text{ N/mm}^2$) und für Lehm mit 8 Ma% Löschkalk $0,17 \text{ N/mm}^2$ (Standardabweichung $0,028 \text{ N/mm}^2$). Die mit Löschkalk versehenen Probekörper sind nach der Austrocknung sehr spröde, was bewirkt, dass die Bruchlasten und somit die Biegezugfestigkeiten so gering sind, dass eine Weiterverfolgung der Zusammensetzung der Lehmprüfkörper mit Löschkalkanteil aus Sicht des Autors nicht sinnvoll erscheint (Werte aufgelistet in Tabelle 5.13). Ein zerstörter Probekörper ist in Abbildung 5.21 zu sehen.



Abb. 5.21: Zerstörter Probekörper mit 4 Ma% gelöschtem Kalk nach dem Dreipunkt-Biegeversuch

Tab. 5.13: Biegezugfestigkeit der Lehmprobekörper mit Löschkalkanteil 4 Ma% (M9), 6 Ma% (M10) und 8 Ma% (M11)

Material	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]
M9.1	0.27
M9.2	0.24
M9.3	0.27
M9.4	0.23
$\bar{x}_{M9.j}$	0.25
s	0.02
M10.1	0.24
M10.2	0.08
M10.3	0.27
$\bar{x}_{M10.j}$	0.20
s	0.08
M11.1	0.17
M11.2	0.14
M11.4	0.21
$\bar{x}_{M11.j}$	0.17
s	0.03

Die Druckfestigkeiten für Prüfkörper mit Anteil an gelöschtem Kalk sind stark reduziert (siehe Tabelle 5.14). Für die Probekörper mit 4 Ma% Löschkalk wurden im Mittel 0,81 N/mm² (mit einer Standardabweichung von 0,038 N/mm²) berechnet, bei 6 Ma% 0,77 N/mm² (aufgrund des Probekörpers M10.1, der eine außergewöhnlich niedrige Bruchlast von 219 Newton aufweist, Standardabweichung 0,137 N/mm²) und bei Probekörpern mit 8 Ma% beträgt die Druckfestigkeit 0,85 N/mm² mit einer Standardabweichung von 0,055 N/mm². Dies entspricht etwa einem Drittel Druckfestigkeit gegenüber dem Mittelwert der Referenzprobekörper. Diese Materialmischungen sind für Lehmbauprodukte ungeeignet.

Tab. 5.14: Druckfestigkeit der Lehmprobekörper mit Löschkalkanteil 4 Ma% (M9), 6 Ma% (M10) und 8 Ma% (M11)

Material	Druckfestigkeit [N/mm ²]
M9.1	0.75
M9.2	0.81
M9.3	0.84
M9.4	0.85
$\bar{x}_{M9.j}$	0.81
s	0.04
M10.1	0.58
M10.2	0.75
M10.3	0.96
M10.4	0.81
$\bar{x}_{M10.j}$	0.77
s	0.14
M11.1	0.91
M11.2	0.78
M11.4	0.87
$\bar{x}_{M11.j}$	0.85
s	0.06

Die Haftzugfestigkeit wurde mit etwa 50% der nach der Lehmplattennorm DIN 18948 geforderten Oberflächenfestigkeit ermittelt. Sie beträgt 0,05 N/mm² bei Lehm mit 4 Ma% Löschkalk bzw. 0,06 N/mm², wenn 6 Ma% Löschkalk beigemischt sind (Tabelle 5.15). Auch aus diesen Versuchen ist ersichtlich, dass eine Beimengung von gelöschtem Kalk die mechanische Eigenschaft der Haftzugfestigkeit stark verringert und der geforderte Wert der Norm nicht erreicht werden kann. Die dazugehörigen Bilder mit den zerstörten Probekörpern sind in den Abbildungen 5.22 und 5.23 zu sehen.

Tab. 5.15: Haftzugfestigkeit der Probekörper mit 4 Ma% (M9) und 6 Ma% (M10) gelöschtem Kalk

Material	Haftzugfestigkeit [N/mm ²]
M9.1	0.04
M9.2	0.04
M9.5	0.05
M9.8	0.06
$\bar{x}_{M9.j}$	0.048
s	0.008
M10.4	0.05
M10.6	0.06
$\bar{x}_{M10.j}$	0.055
s	0.005



Abb. 5.22: Zerstörter Probekörper mit 4 Ma% gelöschtem Kalk nach der Haftzugfestigkeitsprüfung



Abb. 5.23: Zerstörter Probekörper mit 6 Ma% gelöschtem Kalk nach der Haftzugfestigkeitsprüfung

5.3.6 Lehm mit Holzfasern

Die Biegezugfestigkeit des Lehmes mit 0.5 Ma% Holzfasern ist $0,85 \text{ N/mm}^2$ (Standardabweichung $0,068 \text{ N/mm}^2$). Mit 1.5 Ma% Holzfasern werden durchschnittlich $0,83 \text{ N/mm}^2$ erreicht (Standardabweichung $0,072 \text{ N/mm}^2$) und bei 2.5 Ma% Holzfasern $0,92 \text{ N/mm}^2$ mit einer Standardabweichung von $0,047 \text{ N/mm}^2$ (alle zugehörigen Biegezugfestigkeiten sind in der Tabelle 5.16 zu finden). Das bedeutet, dass sich bei Lehmkörpern mit Holzfasern die Biegezugfestigkeit um maximal 35% reduziert. Die Ursache kann darin liegen, dass die Holzfasern:

- über eine zu geringe Schlankheit verfügen bzw. die kritische Faserlänge nicht erreichen, vgl. Kap. 1.3.2 und daher der Verbund zur Kraftübertragung bzw. Zugkrafteinleitung in die Fasern nicht ausreicht
- die Fasern nicht homogen genug verteilt sind
- die Ausrichtung der Fasern zufällig und in alle Raumrichtungen vorhanden ist und nicht, wie es optimal wäre, die Fasern entlang ihrer Längsachse im Probekörper in Richtung der Probekörperlängsachse orientiert sind

Eine inhomogene Verteilung der Fasern wurde augenscheinlich nicht festgestellt. Die Fasern sind jedoch zufällig und in alle Raumrichtungen orientiert. Ob die kritische Faserlänge erreicht wird, kann durch die unbekannt Parameter der Zugfestigkeit der Faser und der Schubfestigkeit der Grenzfläche Faser/Matrix (siehe Glg. 1.1) nicht gesagt werden. Eventuell vorhandene Faserrisse sind mit freiem Auge nicht erkennbar. Es sind jedoch viele aus der Lehmmatrix herausgezogene Holzfasern sichtbar. Die laut DIN 18948 geforderte Mindestbiegezugfestigkeit von $0,80 \text{ N/mm}^2$ wurde nur mit einer Probe (M13.2) unterschritten. Diese Probe weist bei ca. 33s einen starken Ausschlag in der Ordinate auf, was auf eine lokale Schwächung des Querschnittes während des Verdichtens oder Austrocknens hinweist. Wird diese Probe aus der Mittelwertbildung ausgeschlossen, ergibt sich eine mittlere Zugfestigkeit der Lehmproben mit 1.5 Ma% Holzfasern von $0,87 \text{ N/mm}^2$. Dieser Wert reiht sich genau zwischen die Werte der Probekörper mit weniger und mehr Holzfasernanteil ein. Das bedeutet, dass sich selbst mit den in vorliegender Untersuchung zu klein gewählten Holzfasern die Festigkeit mit einem höheren Holzfasernanteil steigern lässt. Allerdings liegt diese immer noch mindestens 21% unter der Festigkeit der Referenzprobekörper.

Tab. 5.16: Biegezugfestigkeit der Lehmprobekörper mit Holzfaserteil 0.5 Ma% (M12), 1.5 Ma% (M13) und 2.5 Ma% (M14)

Material	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]
M12.1	0.96
M12.2	0.80
M12.3	0.82
M12.4	0.80
$\bar{x}_{M12.j}$	0.85
s	0.07
M13.1	0.88
M13.2	0.70
M13.3	0.85
M13.4	0.86
$\bar{x}_{M13.j}$	0.83
s	0.07
M14.1	0.85
M14.2	0.98
M14.3	0.91
M14.4	0.94
$\bar{x}_{M14.j}$	0.92
s	0.05

Die Druckfestigkeit sinkt mit zunehmendem Holzfaserteil von 2,06 N/mm² (bei 0.5 Ma% Holzanteil, Standardabweichung 0,121 N/mm²) auf 1,96 N/mm² (Standardabweichung 0,15 N/mm², 1.5 Ma% Holzanteil). Bei 2.5 Ma% Holzfaserteil beträgt die Druckfestigkeit jedoch 2,24 N/mm² mit einer Standardabweichung von 0,108 N/mm². Die Druckfestigkeit wird durch die Holzfasern um bis zu 20% reduziert. Da es normativ keine Vorgaben für die Druckfestigkeit von Lehmbauplatten gibt, ist die Festigkeitsreduktion akzeptabel im Hinblick auf die Verwendung von Platten im Trockenbau. Die Ergebnisse der Prüfungen finden sich in untenstehender Tabelle 5.17.

Tab. 5.17: Druckfestigkeit der Lehmprobekörper mit Holzfasergehalt 0.5 Ma% (M12), 1.5 Ma% (M13) und 2.5 Ma% (M14)

Material	Druckfestigkeit [N/mm ²]
M12.1	2.13
M12.2	2.17
M12.3	2.09
M12.4	1.86
$\bar{x}_{M12.j}$	2.06
s	0.12
M13.1	1.93
M13.2	1.85
M13.3	1.85
M13.4	2.22
$\bar{x}_{M13.j}$	1.96
s	0.15
M14.1	2.09
M14.2	2.39
M14.3	2.24
M14.4	2.22
$\bar{x}_{M14.j}$	2.24
s	0.11

Die Haftzugfestigkeit der Probekörper erhöht sich mit der Holzfasergebung. Die Haftzugfestigkeit der Lehmprobekörper mit 0.5 Ma% beträgt 0,20 N/mm², bei 1.5 Ma% wurden knapp 0,21 N/mm² ermittelt und bei 2.5 Ma% 0,21 N/mm² (Tabelle 5.18). Dies entspricht einer Steigerung der Haftzugfestigkeit gegenüber den Referenzprobekörpern von über 10%. Da die Haftzugfestigkeit für Lehmplatten eine wesentliche Rolle spielt (Lehmputzhaftung etc.), ist dies ein begrüßenswertes Ergebnis. Die erforderlichen 0,10 N/mm² wurden durch jede Probe erreicht. In Abbildung 5.24 ist eine Probe mit Kohäsionsversagen innerhalb des Klebers zu sehen. Sowohl auf dem Prüfstempel als auch auf dem Lehmprobekörper verbleibt nach dem Versuch eine Kleberschicht. Diese Probe wird daher nicht gewertet. Die Abbildung 5.25 zeigt einen zerstörten Probekörper mit 2.5 Ma% Holzfasergehalt.

Tab. 5.18: Haftzugfestigkeit der Probekörper mit Holzfasern 0.5 Ma% (M12), 1.5 Ma% (M13) und 2.5 Ma% (M14)

Material	Haftzugfestigkeit [N/mm ²]
M12.1	0.18
M12.2	0.22
M12.3	0.20
$\bar{x}_{M12.j}$	0.20
s	0.002
M13.4	0.21
M13.5	0.21
M13.7	0.20
$\bar{x}_{M13.j}$	0.207
s	0.005
M14.1	0.20
M14.2	0.20
M14.4	0.23
$\bar{x}_{M14.j}$	0.210
s	0.014



Abb. 5.24: Zerstörter Probekörper mit 1.5 Ma% Holzfasern nach der Haftzugfestigkeitsprüfung; Kohäsionsversagen innerhalb des Klebers



Abb. 5.25: Zerstörter Probekörper mit 2.5 Ma% Holzfasern nach der Haftzugfestigkeitsprüfung

5.3.7 Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse

Die auf dieser Seite zusammengefassten Ergebnisse werden im Kapitel 5.4 diskutiert und es wird ein Ausblick für die weitere, mögliche Forschung gegeben.

Tab. 5.19: Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse der mechanischen Prüfungen

Probekörper	Mittlere Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	Mittlere Druckfestigkeit [N/mm ²]	Mittlere Haftzugfestigkeit [N/mm ²]
M1 - Referenz	1.12	2.36	0.19
M2 - Flachsgewebe	1.17	-	0.24
M3 - Filzmatte	-*	-	0.07**
M6 - Kasein 1 Ma%	0.49	1.77	0.13
M7 - Kasein 5 Ma%	0.44	1.93	0.13
M9 - Löschkalk 4 Ma%	0.25	0.81	0.05
M10 - Löschkalk 6 Ma%	0.20	0.77	0.06
M11 - Löschkalk 8 Ma%	0.17	0.85	-
M12 - Holzfasern 0.5 Ma%	0.85	2.06	0.2
M13 - Holzfasern 1.5 Ma%	0.83	1.96	0.21
M14 - Holzfasern 2.5 Ma%	0.92	2.24	0.21

* ... Verbund Filz-Lehm nicht ausreichend bei 2 von 3 Prüfkörpern

** ... Haftzugfestigkeit des Filzes auf dem Lehm (Versagen in Fuge Filz - Lehm)

Tab. 5.20: Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse der mechanischen Prüfungen - Abweichungen vom Referenzprobekörper

Probekörper	Abweichung Biegezugfestigkeit bezogen auf M1 [%]	Abweichung Druckfestigkeit bezogen auf M1 [%]	Abweichung Haftzugfestigkeit bezogen auf M1 [%]
M1 - Referenz	±0	±0	±0
M2 - Flachsgewebe	+4.5	-	+25
M3 - Filzmatte	-	-	-64
M6 - Kasein 1 Ma%	-56	-25	-32
M7 - Kasein 5 Ma%	-61	-18	-32
M9 - Löschkalk 4 Ma%	-77	-66	-73
M10 - Löschkalk 6 Ma%	-83	-67	-69
M11 - Löschkalk 8 Ma%	-85	-64	-
M12 - Holzfasern 0.5 Ma%	-25	-15	+6
M13 - Holzfasern 1.5 Ma%	-26	-20	+10
M14 - Holzfasern 2.5 Ma%	-18	-5	+10

5.4 Conclusio

Die Haftzugfestigkeit kann durch Holzfaserbeimengungen (in allen geprüften Mengen) gesteigert werden. Die Filzmatten verfügen durch die in dieser Arbeit angewandte Methode der Probekörperherstellung über zu wenig Haftung auf dem Lehm. Es ist denkbar, diese zu steigern, indem eine flüssigere Lehmmischung als Ausgangsmaterial verwendet wird, sodass der Lehm tiefer in die Filzmatte eindringen kann. Eine andere, weniger dicht verfilzte Matte ist ebenfalls möglich, wobei die Zugfestigkeit der verfilzten Wolle reduziert wird. Zu hinterfragen ist jedoch die Wirksamkeit der sich nicht innerhalb des Lehmes befindlichen Filzfasern, denn diese können bereits leicht von Hand voneinander getrennt werden. Es sind Anwendungsbereiche möglich, bei denen der Filz akustisch wirksam sein soll und damit sichtbar bleiben muss. Als Beispiele seien die Wirkung der Luftschalldämmung und Verringerung der Nachhallzeit genannt. Dazu sind weiterführende Untersuchungen notwendig.

Flachsfasergewebe und Filzmatten haben das Potenzial, die Biegezugfestigkeit zu erhöhen. Dazu ist es notwendig, den Verbund zwischen den natürlichen Faserstoffen und dem Lehm zu erhöhen. Die Filzmatte verspricht hier am meisten Erfolg, da sich bei einer Probe die Biegezugfestigkeit um 240% steigern ließ (vgl. Kap.5.3.3). Allerdings konnte der gute Verbund nicht für alle Probekörper mit Filz hergestellt werden, was jedoch eine Grundvoraussetzung für eine weitere Verfolgung des Einsatzes der Matten ist. Es muss hier zusätzliche Forschungsarbeit geleistet werden, um eine kraftschlüssige Verbindung zwischen den Komponenten herstellen und gewährleisten zu können.

In Hinblick auf die Druckfestigkeit der Probekörper wird festgehalten, dass Lehmproben zukünftig nicht (ausschließlich) wie in der DIN EN 1015-11 orthogonal zur Verdichtungsrichtung geprüft werden sollten, sondern hauptsächlich parallel zur Verdichtungsrichtung. Bei den Versuchen für diese Diplomarbeit wurde festgestellt, dass die gemessene Druckfestigkeit bei Krafteintragung parallel zur Verdichtungsrichtung wesentlich geringer gegenüber der Druckfestigkeit der orthogonal zur Verdichtungsrichtung geprüften Proben ist (bis zu 30%, vgl. Kap. 5.2.2). Was den Trockenbau betrifft, ist die Eigenschaft der Druckfestigkeit nicht in gleichem Maße relevant wie die Biegezug- und vor allem die Haftzugfestigkeit, denn die Beanspruchung von Trockenbauplatten geschieht hauptsächlich in der Plattenebene, etwa durch an Haken aufgehängte Gegenstände oder Installationen rückseitig der Wand. Es sind allerdings Einsatzbereiche denkbar (wie etwa der waagrechte Teil einer Brüstung) bei denen die Lehmplatte eine möglichst hohe Druckfestigkeit aufzuweisen hat. Ebenfalls kommt ihr bei Hängeschränken eine Bedeutung zu, welche an Holzplatten, die zwischen Metallsteher geschraubt sind, befestigt werden. Aufgrund der Tiefe dieser Schränke ergibt sich durch die exzentrisch angreifende Vertikallast ein Versatzmoment, welches durch ein horizontales Kräftepaar von der Wand aufgenommen werden muss. Die Druckkraft wirkt unmittelbar auf die Lehmplatte, was eine gewisse Druckfestigkeit der Platte voraussetzt. Hier müssen ebenfalls genauere Versuche durchgeführt werden, um sinnvolle Mindestdruckfestigkeiten zu definieren. Von den getesteten Materialien beeinflussen die Holzfasern die Druckfestigkeit am wenigsten negativ.

Es hat sich herausgestellt, dass eine Beimengung von Kaseinpulver und Löschkalk alle untersuchten mechanischen Eigenschaften des Lehmes verschlechtern. Bei Kasein wurde eine Wirkung durch den Eiweißleim erwartet und bei Löschkalk sollte der Kalk mit dem Kohlendioxid abbinden und Calciumcarbonat bilden, welches zu einer Erhöhung der Druckfestigkeit führt. Die erwarteten positiven Auswirkungen der mechanischen Eigenschaften haben sich jedoch nicht eingestellt. Um die Bindekraft von Kasein zu erhöhen, kann Natriumhydrogencarbonat oder Calciumhydroxid als Beimengung in Betracht gezogen werden. Ohne deren Mitwirkung ist es nicht sinnvoll, Kasein

in Lehmalkörpern einzusetzen. Es wird von einer Weiterverfolgung von gelöschtem Kalk ohne andere Zusätze im Lehm abgeraten.

Die bauphysikalischen Untersuchungen der parallel verfassten Diplomarbeit von Tobias Müller betreffend den Wasserdampfdiffusionswiderstand, die Sorptionsfähigkeit und den Wärmedurchlasswiderstand sind zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit noch nicht abgeschlossen. Eine gemeinsame Betrachtung aller Versuchsergebnisse der Mechanik als auch der Bauphysik wird für die weiterführende Forschung empfohlen, da die Anforderungen je nach Verwendungszweck stark variieren können.

Literatur

- [1] G. Minke. *Handbuch Lehm*. Ökobuch Verlag, 2009. ISBN: 978-3-936896-41-1.
- [2] H. Schroeder. *Lehm*: Mit Lehm ökologisch planen und bauen. Bd. 3. Springer Vieweg, 2018. ISBN: 978-3658-23120-0.
- [3] A. Rischaneck. „Sicherheitskonzept für den Lehmsteinbau“. Dissertation. Technische Universität Wien, 2009.
- [4] D. Adam. *Grundbau und Bodenmechanik - Studienunterlagen zur Vorlesung*. Studienunterlagen. 2016.
- [5] C. Röhlen Ulrich und Ziegert. *Lehm*-Praxis. Beuth Verlag GmbH, 2020. ISBN: 978-3-410-29122-0.
- [6] P. Steingrass. *Moderner Lehm* 2002. Fraunhofer IRB Verlag, 2002. ISBN: 3-8167-6118-6.
- [7] D. Schubert. „Neue Werkstoff aus Ton, Faserstoffen und Bindemitteln durch Preß- und Aufbauagglomeration“. Dissertation. Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2003.
- [8] M. Uhl, P. Hohenblum, S. Scharf und C. Trimbacher. *Hausstaub - ein Indikator für Innenraumbelastung*. Umweltbundesamt GmbH, 2004. ISBN: 3-85457-753-2.
- [9] J. A. Blaschek. „Ausgerechnet Lehm - Praktische Perspektiven für den Lehm in Österreich“. Masterarbeit. Technische Universität Wien, 2015.
- [10] O. N. E. Agency. *Exposure to radiation from the natural radioactivity in building materials*. Forschungsber. Nuclear Energy Agency, Organisation for economic co-operation und development, 1979. 40 S.
- [11] D. Lehm. *Lehm* Regeln: Begriffe Baustoffe Bauteile. Springer-Verlag, 2013.
- [12] *DIN 18948:2018 12: Lehm*platten - Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Dez. 2018.
- [13] H. Tichelmann Karsten und Heller. *Vergleichende Ökobilanzierung und Lebenszyklusanalyse für Konstruktionen nichttragender Innenwände und tragender Außenwände*. Forschungsber. Technische Universität Darmstadt, Institut für Tragwerksentwicklung und Bauphysik, 2010. 98 S.
- [14] F. Radeloff Dagmar und Reitberger. *Herstellung und Entsorgung von Gipsplatten*. Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2009. ISBN: 3-85457-753-2.
- [15] M. GmbH. *Filzeinlage Schafwolle*. 2022. URL: <https://www.manufactum.at/filzeinlage-schafwolle-a26485/> (Zugriff am 05.03.2022).
- [16] B. V. GmbH. *Bundesgesetzblatt Jahrgang 2001 Teil I Nr. 65*. 2001. URL: https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?start=//*/%5B@attr_id=%27bgbl101s3379.pdf%27%5D#__bgbl__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl101s3379.pdf%27%5D__1646563653219 (Zugriff am 06.03.2022).
- [17] B. V. GmbH. *Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020 Teil I Nr. 32*. 2020. URL: [https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&start=//*/\[@attr_id=%27bgbl120s1533.pdf%27\]#__bgbl__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl120s1533.pdf%27%5D__1646564717095](https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&start=//*/[@attr_id=%27bgbl120s1533.pdf%27]#__bgbl__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl120s1533.pdf%27%5D__1646564717095) (Zugriff am 06.03.2022).

- [18] A. Z. GmbH. *Flachsgewebe*. 2022. URL: <https://www.lehmputze.at/index.php/produkteleistungen/putztraeger-armierung/134-flachsgewebe> (Zugriff am 06.03.2022).
- [19] B. GmbH. *Baumit Sumpfkalk*. 2022. URL: https://baumit.at/files/at/pdf_files/pdbl_sumpfkalk.pdf (Zugriff am 06.03.2022).
- [20] B. Streit. *Ökologie - Definitionen und Forschungsinhalte*. 1999. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/oekologie/47449> (Zugriff am 05.03.2022).
- [21] D. Lehm eV. *Lehmbau Regeln*. Bd. 3. Vieweg+Teubner, 2009. ISBN: 978-3-8348-0189-0.
- [22] E. Streit. „Herstellung und Charakterisierung von Verbundwerkstoffen aus Lehm und Naturfasern sowie natürlichen Zusätzen“. Masterarbeit. Universität für Bodenkultur Wien, 2018.
- [23] *DIN EN 13286-2:2013-02: Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische - Teil 2: Laborprüfverfahren zur Bestimmung der Referenz-Trockendichte und des Wassergehaltes - Proctorversuch*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Feb. 2013.
- [24] *DIN EN 310:1993 02: Holzwerkstoffe: Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Feb. 1993.
- [25] *DIN EN 1015-12:2016 12: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 12: Bestimmung der Haftzugfestigkeit zwischen Putz und Untergrund*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Dez. 2016.
- [26] *DIN EN 1015-11:2020 01: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 11: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Jan. 2020.
- [27] C.-A.-U. zu Kiel. *Grundpraktikum Versuchsreihe: Materialwissenschaft, Druckfestigkeit B306*. 2016. URL: https://www.tf.uni-kiel.de/servicezentrum/neutral/praktika/anleitungen/copy_of_b306.pdf (Zugriff am 25.04.2022).



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

A Datenblätter

0/2 S&L Lehmfeinputz



0/2 S&L Lehmfeinputz

Allgemeines:	S&L Lehmfeinputz 0/2 ist ein 100 % naturbelassener Lehmputz zum Anrühren mit Wasser Universell einsetzbar, Neubau sowie Altbau (kein Faseranteil)
Abbau/Herstellung:	Niederösterreich, Sand & Lehm Werk Winzing
Anwendung:	im Innenbereich auf ebenflächigen, tragfähigen, sauberen und ausreichend rauen Untergründen wie z. B. auf gebrannte Ziegel, Beton, Ytong, Natursteinmauerwerk, Lehmziegel und Lehmverputze, Lehmbauplatten, Heraklith BM, Holzrauschalung, OSB-Platten mit Schilfstukkatur und vielem mehr...Außer im unmittelbaren Spritzwasser-bereich!
Zusammensetzung:	Lehm, Ton, Quarzsande Körnung bis max. 2 mm
Verarbeitung/Verbrauch:	Oberputz, bei Bedarf auch als Unterputz Freifällmischer, Zwangsmischer, Lehmputzmaschine oder mit der Hand ca. 17 kg/cm Putzstärke/ m ² Verarbeitungstemperatur mind. 5°C Siehe allgemeine Verarbeitungsrichtlinien
Auftragsstärke:	3 mm – 6 mm als Grobputzersatz: bis zu 3 cm/Schichtstärke
Trockenzeiten:	Je nach Witterung können die Trocknungszeiten unterschiedlich sein. Bei zu hoher Luftfeuchtigkeit und Temperaturen unter + 5 ° Celsius sollte beheizt und entfeuchtet werden (eventuell Entfeuchtungsgerät). Regelmäßig lüften! Siehe allgemeine Verarbeitungsrichtlinien
Gebinde:	Big Bag 1000 kg Big Bag 500 kg lose
Lagerung:	trocken - unbegrenzt lagerfähig
Entsorgung:	Biomüll



Lieferung STEICOzell

Gewicht/St. [kg]	Anzahl/Palette [St.]
Lieferung in handlichen Säcken	
15 a)	21 (Säcke)
Lieferung in Ballen ohne Einzelfolierung/Großballen (Industrieverpackung)	
270 b)	1 Großballen (18 Ballen je 15 kg)

Technische Kenndaten STEICOzell

Zulassung für lose Holzfasern als Wärmedämmung	
Europäische technische Zulassung (ETA)	12/0011
Brandschutzklasse nach DIN EN 13501-1	E
Brandklassifizierung durch technisches Labor ITB (EN13501-1+A1:2010) (Prüfzeugnis 02039/18/Z00NZP)	B-s2,d0
Nennwert der Wärmeleitfähigkeit λ_D [W/(m*K)]	0,038
Empfohlene Rohdichte ρ [kg/m ³]	
• offenes Aufblasverfahren: oberste Geschossdecke	ca. 32
• geschlossene Bauteilhohlräume: Dach, Decke, Wand	ca. 35 - 45
Strömungswiderstand r [kPa*s/m ²] n. DIN EN 29053 30kg/m ³	> 5
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ	1/3
Spezifische Wärmekapazität c [J/(kg*K)]	2.100
Einsatzstoffe	Holzfasern, Flammenschutzmittel Ammoniumsulfat
Abfallschlüssel (EAK/AVV)	170201, Entsorgung wie Holz und Holzwerkstoffe

Ergänzende technische Daten

Bemessungswert Wärmeleitfähigkeit λ_B gemäß MVVTB [W/(m*K)]	
0,040	
Bemessungswert Wärmeleitfähigkeit λ gemäß ETA 12/0011 [W/(m*K)]	
0,039	
Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit λ gemäß SIA [W/(m*K)]	
0,038	
Brandkennziffer	
BKZ 5.3	
Brandverhaltensgruppe nach VKF Brandschutzrichtlinie	
RF2	

Bei der Berechnung des Wärmedurchlasswiderstandes von Bauteilen beim offenen Aufblasen gilt: Einbaudicke = Nenndicke + 20%.

Mindest-Rohdichten-Tabelle STEICOzell

Dämmstärke				
	[kg/m ³]			
	0° - 20°	20° - 60°	> 60°	
≤ 16 cm				
≤ 22 cm				
≤ 28 cm	32	35	35	35
≤ 34 cm				
≤ 40 cm				

Tipp für die Vorbemessung der Materialmenge: 40 kg/m³ oder 2,5 - 3,0 Sack/m³.

- a) Palettenformat: ca. 0,8*1,2*2,60 m; 33 Pal./LKW
- b) Palettenformat: ca. 0,80*1,20*2,30 m; 33 Pal./LKW

Hinweise: Trocken lagern. Transportverpackung erst entfernen, wenn Palette auf festem Untergrund steht. Verarbeitungsrichtlinien beachten.

Voraussetzung für die Setzungssicherheit ist die eingeblasene Menge lt. Verdichtungstabelle sowie die gleichmäßige Verteilung der STEICOzell im Gefach.

Bei vorgefertigten Bauteilen und anschließendem Transport müssen 7 kg/m³ Materialmenge zugegeben werden.



Ihr STEICO Partner

www.steico.com

Gedruckt auf FSC®-zertifiziertem Papier | Stand 09/2021 | Es gilt die aktuelle Auflage. Irrtum vorbehalten.

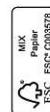


Abb. A.2: Datenblatt STEICOzell

Flachsgewebe



..... eine natürliche Alternative
zum herkömmlichen Putzgewebe
für die Armierung von Lehmputzen ...

Das Flachsgewebe ist eine spezielle, ökologische Armierung,
die zur Bewehrung von Lehmputzen entwickelt wurde.

Das schiefefeste **Drehergewebe** aus Flachsgarn ist verstärkt mit Naturstärke, dadurch
besonders formstabil und hat eine Maschenweite von 5 x 5 mm, Gewicht 48 g/m²

Das Flachsgewebe wird eingesetzt bei Untergründen wie Wandheizung, Schilfstukkatur und
Schilfdämmplatten. Nicht im feuchten Altbau verwenden.

Die Lehmputzarmierung muss im äußeren Drittel der Putzlage erfolgen!

Eine Flächenarmierung mit Flachsgewebe kann eine Rissbildung nicht mit Sicherheit
verhindern, wohl aber das Risiko verringern.

Bei luftiger, trockener Lagerung, vor Sonneneinstrahlung geschützt, mindestens
3 Jahre haltbar.

Rollen zu 100 Lfm x 1 m erhältlich



3123 Winzing Zur Sandgrube 12
T: 02786/2316 info@lehmputze.at

www.lehmputze.at
www.lehmbauplatte.at
www.natur-farbe.at

Abb. A.3: Datenblatt Flachsgewebe



Baumit Sumpfkalk



Produkt	Pastöser, gelöschter Kalkteig CL 90-S PL gemäß ÖNORM EN 459-1 zur Herstellung von Mauer- und Putzmörtel sowie Anstrichen. Baumit Sumpfkalk wird aus feinstgemahlenem Branntkalk, der in Großlöschtrommeln mit genau dosierten Warmwassermengen verrührt und zur kontrollierten Ablösung gebracht wird, hergestellt. Die daraus gewonnene Kalkmilch wird in ein frostsicheres Grubensystem abgepumpt und eingedickt. Baumit Sumpfkalk wird gelöscht und mind. 3 Monate abgelagert.
Zusammensetzung	Weißkalkhydrat (CL90-S), $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Wasser
Eigenschaften	Durch den fabrikmäßigen, fertig abgelöschten Baumit Sumpfkalk erhält man ein garantiert treibfreies Bindemittel. Sumpfkalkmörtel sind nach kurzer Aushärtezeit formbeständig, bleiben jedoch elastisch, wodurch er seine ausgezeichnete Haftung und Haltbarkeit erhält. Bei Bedarf kann durch Beimischen von Zement oder hydraulischen Bindemittel Mörtel mit hoher Festigkeit hergestellt werden.
Anwendung	Als Baukalk zur Mörtelherstellung für Innen- und Außenputzherstellung, für hochwertige Farbmischungen (Anstriche) sowie für Kalkanstriche (Weißigen).
Technische Daten	Chemische Formel: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in Wasser Festkörpergehalt: ca. 40 % Teigdichte: ca. 1.300 kg/m ³ abgelagerter gelöschter Weißkalk gem. ÖNORM EN 459-1 Materialbedarf: für Anstriche ca. 0,3 kg/m ² (bei 3 Anstrichen) für Mörtel und Putze je nach Mischungsverhältnis
Einstufung lt. Chemikaliengesetz	Die detaillierte Einstufung gemäß ChemG entnehmen Sie bitte dem Sicherheitsdatenblatt (gemäß Artikel 31 und Anhang II der Verordnung Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlamentes und Rates vom 18.12.2006) unter www.baumit.com oder fordern das SDBL beim jeweiligen Herstellerwerk an.
Qualitätssicherung	Eigenüberwachung durch unsere Werkslabors.
Lieferform	Kübel 20 kg, 1Pal. = 24 Kübel = 480 kg
Lagerung	Trocken auf Holzrost lagern, geöffneten Gebinden Wasser zugeben.

Produktdatenblatt Baumit Sumpfkalk, Stand 01/2020

1/3

Abb. A.4: Datenblatt gelöschter Kalk



Kaseingrundierung

Produktinformation Art. 145

11.10.2019

■ Allgemeines

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

■ Anwendung

Geeignet zur Verarbeitung auf allen unbehandelten und saugenden Untergründen wie Lehm-, Kalk-, Kalkzement-, Gipsputze, Gipskarton und Gipsfaserplatten, Stein, Beton.

Empfohlen zur Grundierung saugfähiger Altanstriche vor deren Renovierung; z. B. Kreidezeit Kaseinfarben, Lehmfarben, Sumpfkalkfarben und Dispersionsfarben.

Ungeeignet für alle glatten, nicht saugfähigen Flächen und dauerfeuchte Untergründe.

Für transparente Verfestigung von Putzen, insbesondere Lehmputzen im Innenbereich; hier ist das Anlegen von Probeflächen erforderlich (siehe „Tipps“).

Der Einsatz der Kaseingrundierung innerhalb der verschiedenen Kreidezeit Farb- und Putzsysteme ist in den entsprechenden Produktinformationen beschrieben.

■ Eigenschaften

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

■ Zusammensetzung (Volldeklaration)

Kasein, Soda

■ Geeignete Werkzeuge

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

Fassadenbürste (Art. P 6080)

Kalk Streichbürste (Art. P 6082)

Deckenbürste (Art. P 6054.1)

■ Vorarbeiten

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

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

■ Anrühren der Kaseingrundierung

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

■ Verarbeitung

Kaseingrundierung gleichmäßig und satt auftragen. Nur so viel Flüssigkeit auftragen, wie vom Untergrund aufgenommen wird. Überstände (massglänzende Stellen) vor dem Trocknen unbedingt mit einem Lappen abnehmen. Verarbeitungstemperatur mind. 8°C.

Die angerührte Grundierung muss am gleichen Tag verarbeitet werden. Schlecht oder faulig riechende Grundierung unter keinen Umständen weiter verarbeiten: Gefahr langanhaltender Geruchprobleme auch nach Trocknung!

■ Trockenzeiten bei Normalklima

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

■ Verbrauch

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

■ Gebindegrößen

	Inhalt	Reichweite
Art. 145	250 g (ergibt 8 Liter fertige Grundierung)	40-60 m ²

Preise entnehmen Sie bitte der gültigen Preisliste.

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

Seite 1/2

Abb. A.5: Datenblatt Kasein 1/2



Kaseingrundierung

Produktinformation Art. 145

11.10.2019

■ Lagerung

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

■ Reinigung der Werkzeuge

sofort nach Gebrauch mit Wasser.

■ Entsorgung von Produktresten

Produktreste nicht in das Abwasser geben. Produktreste sind kompostierbar, bzw. können eingetrocknet in den Hausmüll gegeben werden.

■ Tipps

Transparentes Fixieren von Putzen:

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

■ Kennzeichnung gem. ChemVOCFarbV

VOC Höchstgehalt (Kat. A/h): 30 g/l (2010), Produkt enthält max. 1 g/l VOC.

■ Kennzeichnung

entfällt, kein Gefahrgut.

■ Achtung

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

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

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