

Diploma Thesis

Building physical examination of clay with natural additives and coatings

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

Diplomarbeit

Bauphysikalische Untersuchung von Lehm mit natürlichen Additiven und Beschichtungen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs
eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

von

Tobias Müller, BSc

Matr.Nr.: 01025038

unter der Anleitung von

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Azra Korjenic**

Univ. Ass. 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 November 2022

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich die vergangenen Jahre begleitet, unterstützt und motiviert haben.

Mein aufrichtiger Dank gilt Frau Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Azra Korjenic, die es mir ermöglicht hat, im Rahmen meiner Diplomarbeit ein so zukunftsträchtiges Thema in ihrem Forschungsbereich Ökologische Bautechnologien behandeln zu dürfen.

Einen großen Dank für die Betreuung auch an Herrn Univ. Ass. Dipl.-Ing. Erich Streit, BSc, der mir während der gesamten Zeit mit seiner Expertise stets fachkundig und humorvoll zur Seite gestanden ist und immer ein offenes Ohr für meine Anliegen und Ideen hatte.

Ein besonderer Dank gilt meiner gesamten Familie, allen voran meinen Eltern Helga und Helmut, für die großzügige und wertvolle Unterstützung und deren Rückhalt während meiner gesamten Studienzeit, ohne die es mir so nicht möglich gewesen wäre, meinen Weg bis hierher zu gehen.

Von ganzem Herzen möchte ich mich auch bei meiner Partnerin Caroline bedanken, die mir über all die Jahre mit ihrem sonnigen Gemüt unterstützend und motivierend zur Seite gestanden und mir neben meiner Familie eine wichtige Stütze ist.

Bei meinen beiden Onkeln, Dietmar und Thomas, die stets ein offenes Ohr für mich haben, bedanke ich mich recht herzlich für die Übernahme des Lektorats.

Vielen Dank an meinen Freund Philipp Ender für die gegenseitige Motivation während der Forschungszeit für unsere beiden Diplomarbeiten, die vielen gemeinsam verbrachten Stunden im Labor sowie den intensiven Gedankenaustausch, welcher uns beide angespornt hat.

Danke auch an meine Freunde und Kommilitonen, mit denen sich über die gemeinsame Studienzeit hinaus langjährige Freundschaften entwickelt haben.

Kurzfassung

Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung ausgewählter bauphysikalischer Eigenschaften von Lehmbaustoffen in ihrer Reinform verglichen zu solchen mit Additiven und Beschichtungen mit dem Ziel der Verwendung in Trockenbaustoffen wie Lehm- und Trockenputzplatten. Im Detail handelt es sich um die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit in Anlehnung an die DIN EN 12664 nach dem Heizdrahtverfahren, des Wasserdampfdiffusionswiderstandes nach der DIN EN ISO 12572 sowie des Ab- und Adsorptionsverhaltens nach den DIN EN ISO 12571 und DIN 18948. Im Sinne der Nachhaltigkeit soll eine Basis zur Entwicklung eines natürlichen Baustoffes geschaffen werden, welcher möglichst ressourcenschonend hergestellt werden kann und in seinem gesamten Lebenszyklus nach dem Cradle-to-Cradle-Prinzip recyclebar ist.

Im Rahmen der durchgeführten Versuche wurden Probekörper in unterschiedlichen Zusammensetzungen hergestellt, nach dem dynamischen Verdichtungsverfahren mittels Proctorverdichtungsgerät verdichtet und entsprechend den Normvorgaben bis zur Massekonstanz konditioniert.

Als Ausgangsmaterial wurde S&L Lehmfeinputz 0/2 herangezogen. Die verwendeten Additive, in concreto Holzfasern, Löschkalk und Kasein, wurden der Lehmmischung in jeweils drei unterschiedlichen Masseanteilen beigemischt. Kaliwasserglas, Carnaubawachs und Filz wurden einseitig auf die Probekörperoberfläche angebracht. Durch die Kombination von Lehm mit gelochtem Filz kann das Sorptionsverhalten gegenüber den Referenzprobekörpern signifikant gesteigert werden. Im Fall der Absorption zeigt sich bei den Sorptionsisothermen eine Erhöhung von 25 %. Bei der Prüfung des wärmetechnischen Verhaltens zeigt sich für Filz ein um das Sechsfache erhöhter Wärmedurchlasswiderstand. Beim Sorptions- bzw. Desorptionsverhalten zeigt sich, dass alle Probekörper Feuchte schneller abgeben als sie über den selben Zeitraum aufnehmen. Die beigemischten Additive führen gesamtheitlich zu einer Verringerung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl. Die Probekörper mit Kalk zeigen dabei die größte Reduktion im Ausmaß von 24 %. Demgegenüber wirken sich die Beschichtungen Kaliwasserglas und Carnaubawachs in einer Größenordnung von ca. 10 % erhöhend aus. Die Wärmeleitfähigkeit wird durch die Zugabe der verwendeten Additive ebenso verringert. Für Löschkalk und Kasein ergeben sich die größten Abweichungen im Rahmen von 35–45 %.

Die dem Lehm zugesprochenen feuchteregulierenden Eigenschaften können durch den Verbund von Lehm mit gelochtem Filz deutlich gesteigert werden. Um die Oberfläche von Lehmbaustoffen zu stabilisieren, stellt Carnaubawachs eine gute Alternative zu Wasserglas dar. Für die Verwendung von Löschkalk ist es im Hinblick auf eine zukünftige Forschung jedenfalls sinnvoll, dem Lehm zusätzliche materialoptimierende Komponenten beizufügen, um dem augenscheinlich spröden Materialverhalten entgegenzuwirken.

Abstract

This diploma thesis focuses on the investigation of certain selected building physical properties of clay building materials in their pure form compared to those with additives and coatings, with the aim of using them in dry building materials such as clay panels and dry plaster panels. This involves the determination of thermal conductivity based on DIN EN 12664 according to the hot wire process, water vapor diffusion resistance according to DIN EN ISO 12572 and the sorption behavior according to DIN EN ISO 12571 and DIN 18948. In terms of sustainability a basis for the development of a natural building material should be created. The natural building material should be produced as resource-efficiently as possible and should be recyclable throughout its entire life cycle according to the cradle-to-cradle principle.

Within the tests, test specimen in different compositions were produced, compacted according to the dynamic compaction method with a Proctor compaction device and conditioned to constant weight according to the norm requirements.

S&L clay fine plaster 0/2 was used as raw material. The used additives, concretely wood fibers, slaked lime and casein, were added to the clay mixture in three different mass fractions. Potassium water glass, carnauba wax and felt were added to the test specimen surface on one side. Due to the combination of clay with perforated felt, the sorption behavior significantly increase compared to the reference specimen. In case of absorption, the sorption isotherms show an increase of about 25 %. During the examination in terms of thermal behavior felt shows a sixfold increase in thermal resistance. For the sorption and desorption behavior all test specimen show that they emitted moisture faster than they can absorb over the same period of time. The added additives lead to an overall reduction in the water vapor diffusion resistance factor. The test specimen with lime show the largest reduction of 24 %. In contrast, the coatings of potassium water glass and carnauba wax have an increasing effect of approximately 10 %. The added additives also lead to a reduction of thermal conductivity. For slaked lime and casein, the largest deviations are in the range from 35–45 %.

The moisture regulating qualities of the clay increase significantly in combination with perforated felt. In order to stabilize the surface of clay building materials, carnauba wax is a good alternative to water glass. In any case, especially with regards to future research, for the usage of slaked lime adding additional material-optimizing components to the clay prove necessary to improve the apparent brittle behavior of the material.

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort und Grundlagen	10
1.1	Entstehung des Lehms als Rohstoff	11
1.2	Zusammensetzung und Kornverteilungskurve	12
1.3	Ton als Bindemittel	15
2	Lehm als Baustoff	17
2.1	Von den Anfängen bis zur Gegenwart	17
2.2	CO ₂ -Emissionen – Einflüsse des Bausektors	18
2.3	Nachhaltigkeitsaspekt von Lehmbaustoffen	19
2.4	Einflüsse von Lehmbaustoffen auf die Lebensbereiche des Menschen	22
2.4.1	Raumklima	22
2.4.2	Strahlenbelastung	24
2.4.3	Brandverhalten	25
2.5	Mechanische Eigenschaften von Lehm	26
2.6	Bauphysikalische Eigenschaften von Lehm	27
2.6.1	Wärmetechnisches Verhalten	27
2.6.2	Wasserdampfdiffusion	28
2.6.3	Sorptionsverhalten	30
2.7	Definition und Regelwerke zur Verwendung von Lehmplatten im Trockenbau	31
2.7.1	Ausgangsstoffe und Herstellung	32
2.7.2	Anforderungen an die Lehmplatte nach DIN 18948:2018-12	33
2.7.3	Notwendigkeit ergänzender Regelwerke	35
3	Materialauswahl – Lehm, Additive und Beschichtungen	36
3.1	Die Verwendung von Zuschlägen und Zusätzen	36
3.1.1	Zuschläge	36
3.1.2	Zusätze	38
3.2	Materialauswahl und Erwartungshaltung im Hinblick auf bauphysikal. Eigenschaften	39
3.2.1	Lehm	39
3.2.2	Flachsgewebe	39
3.2.3	Filz	39
3.2.4	Kasein	40
3.2.5	Kalk gelöscht	40
3.2.6	Holzfasern	41
3.2.7	Kaliwasserglas	42
3.2.8	Carnaubawachs	42
4	Vorgehensweise und Prüfmethodik	43
4.1	Herstellung der Probekörper	43
4.1.1	Mischungsverhältnis und Vorversuche	43
4.1.2	Schalungsherstellung	47
4.1.3	Probekörper mit Additiven und Beschichtungen	48

4.1.4	Trocknung und Konditionierung	55
4.2	Rohdichte	56
4.3	Wasserdampfdiffusion	56
4.3.1	Anforderungen an die Prüfung	56
4.3.2	Ermittlung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	58
4.4	Wärmeleitfähigkeit	60
4.4.1	Anforderungen an die Prüfung	60
4.4.2	Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit	60
4.5	Sorptionsverhalten	61
4.5.1	Adsorption	61
4.5.2	Absorption	63
4.5.3	Sorptionsverhalten in zeitlicher Abhängigkeit	64
5	Ergebnisbewertung und Resümee	65
5.1	Rohdichte	65
5.2	Auswertung der Probekörper mit Additiven und Beschichtungen	66
5.2.1	Adsorptionsverhalten	66
5.2.2	Absorptionsverhalten	71
5.2.3	Diffusionsverhalten	77
5.2.4	Wärmeleitfähigkeit	81
5.3	Resümee	84
A	Anhang	89

1 Vorwort und Grundlagen

Das Bauen mit Lehm reicht bis weit in die Geschichte und in die unterschiedlichsten Regionen der Erde zurück. Bereits Jahrtausende vor unserer Zeit, als in der Geschichte der Menschheit das Jagen und Sammeln zunehmend durch den Ackerbau und die Viehzucht verdrängt wurden und damit zusammenhängend das Bauen fester Behausungen für Mensch und Tier sowie Vorratswirtschaft notwendig wurden, wurde neben den Baustoffen Naturstein und Holz vor allem Lehm verwendet. [1]

Lehm galt seinerzeit als einer der Hauptbaustoffe und wurde zwischenzeitig durch moderne Industriebaustoffe wie Beton und Zement, selbst in den ärmsten Entwicklungsländern der Welt, in den Hintergrund gedrängt. Mit der Verdrängung des Lehms ist auch das weltweite Wissen um die historischen Lehmbautechniken immer mehr in Vergessenheit geraten. Zudem führten die Industrialisierung von Prozessen bei der Herstellung von Baustoffen, aber auch politische Vorgaben und Entscheidungen dazu, dass vom Bauen mit Lehm immer mehr abgerückt wurde. [1]

Aufgrund dessen ist auch eine systematische Forschung zum Bauen mit Lehm jahrzehntelang unterblieben. Die vielseitigen Anwendungsgebiete sowie die baubiologischen Qualitäten des Lehms führen jedoch dazu, dass er heutzutage aktueller denn je ist und wieder vermehrt Anwendung in der Baubranche findet. [2]

Seit geraumer Zeit ist der viel diskutierte Klimawandel wieder verstärkt in den öffentlichen Fokus gerückt. Der nicht mehr zu leugnende starke Anstieg des CO₂-Gehalts in der Luft und die damit im Zusammenhang stehende globale Erwärmung lassen Rufe nach nachhaltigen, ökologischen und ökonomischen Prozessen immer lauter werden. Für die Baubranche bedeutet das Thema Nachhaltigkeit, den Verbrauch von Ressourcen in allen Lebensphasen eines Gebäudes gering zu halten [3].

Die gegenständliche Arbeit dient sohin der Grundlagenforschung für ein nachhaltiges und ressourcenschonendes Bauen mit dem Naturbaustoff Lehm. Anhand von diversen Laborversuchen sollen die bauphysikalischen Eigenschaften von Probekörpern aus Lehm in Kombination mit natürlichen Rohstoffen erhoben und ausgewertet werden. Der Fokus wird dabei auf die Ermittlung

- der Wärmeleitfähigkeit,
- des Wasserdampfdiffusionswiderstandes sowie
- des Sorptionsverhaltens, wobei hier zwischen der Adsorption und Absorption unterschieden wird,

von Lehmproben unter Beimengung natürlicher Rohstoffe (Additive) und Aufbringung von Beschichtungen, mit dem Ziel einer künftigen Verwendung in Trockenbaustoffen wie Lehm- oder Trockenputzplatten, gelegt.

An dieser Stelle möchte ich auf die von meinem Kollegen Philipp Ender (1) parallel zu der gegenständlichen Diplomarbeit laufende Arbeit mit dem Titel „Mechanische Untersuchung von Lehm mit Additiven und natürlichen Rohstoffen als Armierung“ verweisen, welche drei wesentliche mechanische Eigenschaften, nämlich die Biegezugfestigkeit, die Druckfestigkeit sowie die Haftzugfestigkeit derselben Lehmmischungen mit und ohne Additiven untersucht hat. Um eine einheitliche Ausgangsbasis zur Durchführung der anschließenden Versuche zu ermöglichen, wurden sowohl die Wahl der Materialien als auch die Zusammensetzungen der Probekörper von beiden Autoren übereinstimmend getroffen und die Probekörper in gemeinsamer Arbeit hergestellt. Die Überprüfung der bauphysikalischen Eigenschaften stellt somit eine Erweiterung der Untersuchungsergebnisse zu den mechanischen Eigenschaften dar. Eine doppelte Bearbeitung mancher Themenkomplexe ist daher nicht auszuschließen, weshalb auf eine inhaltliche Überschneidung in einzelnen Teilen der Arbeit hingewiesen wird.

1.1 Entstehung des Lehms als Rohstoff

Lehm ist eine Mischung aus Sand, Schluff und Ton bzw. bindekräftigen Tonmineralien und kann zudem auch gröbere Gesteinsanteile wie Schotter und Kies sowie organisches Material enthalten. Er stellt ein Verwitterungsprodukt aus dem obersten Bereich der festen Erdkruste dar. Seine Entstehung basiert entweder auf der Verwitterung von Fest- und Lockergesteinen oder auf der unsortierten Ablagerung seiner Bestandteile. [4]

Je nach Fundort weisen Lehme unterschiedliche Zusammensetzungen und daraus resultierend auch unterschiedliche Eigenschaften auf und werden in mehrere Kategorien eingeteilt [5].

Die Lehmregeln des Dachverbandes Lehm [6] definieren folgende Lehmarten:

- Berg- oder Gehängelehm, eine Zusammensetzung aus kantigen Gesteinstrümmern verschiedenster Körnungen, welcher auf den Gesteinen, aus denen er infolge von Verwitterung entstanden ist, oder an den Hängen darunter lagert.
- Geschiebelehm, ein durch Gletscher verlagertes Lehm, dessen Mineralgerüst aus runden Körnungen besteht.
- Mergel, ein kalkhaltiger Geschiebelehm.
- Schwemtlehm, welcher durch Wasserläufe aus früheren Lagerstätten abgeschlammte wurde und sich im ruhigen Wasser wieder sedimentiert hat.
- Lösslehm, welcher aus Löss, einem windverfrachteten kalk- und tonhaltigen Feinsand, durch Auswaschung des Kalkgehaltes entstanden ist. Lösslehm weist ein sehr feinkörniges Mineralgerüst und oft einen geringen Tongehalt auf.

Das Bodenprofil, dessen einzelne Lagen sich in ihren Eigenschaften jeweils unterscheiden, lässt sich im Wesentlichen in drei Bodenhorizonte gliedern. Die zuunterst liegende Schicht, der sogenannte C-Horizont, umfasst das feste oder lockere unverwitterte Ausgangs- bzw. Muttergestein. Darüber befindet sich der humusfreie, mineralische Unterboden (B-Horizont bzw. Anreicherungshorizont), in dem bestimmte Stoffe wie z.B. Kalk ausgefällt werden. Der oberste Horizont, der A-Horizont bzw. Auswaschungshorizont, wird durch den mineralischen, ausgelauten und humusreichen Oberboden gebildet. Zur Entnahme von Baulehm eignet sich ausschließlich der humusfreie Unterboden. [1, 7]

Baulehm muss in der Regel frei von organischen Bestandteilen sein. Zu viel Humusbestandteil, Mutterboden oder andere organische Bestandteile führen zu einer geminderten Festigkeit bzw.

neigen zur Schimmelbildung [8]. In Abbildung 1.1 ist die vereinfachte Darstellung eines Bodenprofils zu sehen.

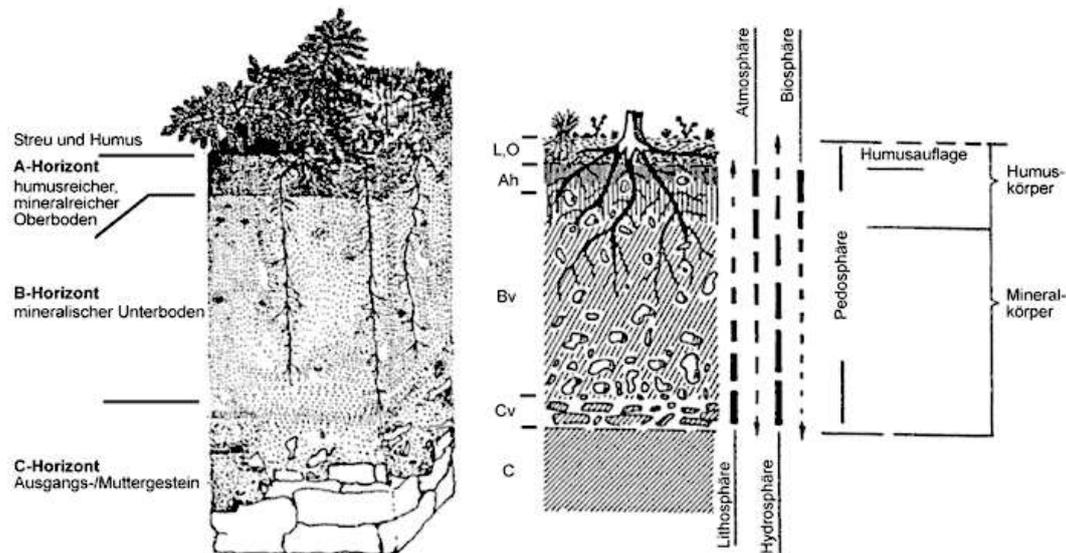


Abb. 1.1: Bodenprofil mit Horizonten, [7]

1.2 Zusammensetzung und Kornverteilungskurve

Die Bodenarten werden nach DIN 18196 [9] in drei Hauptgruppen, nämlich die grob-, gemischt- und feinkörnigen Böden eingeteilt. Sand und Kies werden den grob- und gemischtkörnigen Bodenarten zugeordnet, Schluff und Ton zählen hingegen zum feinkörnigen Boden. Die Zuordnung zu einer bestimmten Bodenart erfolgt anhand der Bestimmung der Korngröße. Tone weisen einen Korndurchmesser von $< 0,002$ mm auf, Feinschluff hat eine Korngröße von $0,002$ mm bis $0,063$ mm, das Sandkorn hat einen Durchmesser von $0,063$ mm bis $2,0$ mm und das Kieskorn zwischen $2,0$ mm und 63 mm. Lehm wird aufgrund seiner Kornzusammensetzung der gemischt- bis feinkörnigen Bodenart zugeordnet. [1]

Für die Verwendbarkeit von Lehm als Baulehm kommt es vor allem auf seine Körnung samt natürlicher Beimengungen sowie auf das Vorhandensein von Tonmineralen als Bindemittel an. Schluffe, Sand und Kies wirken im Lehm als Füllstoffe, Ton aufgrund seiner Feinkörnigkeit und Bindigkeit als Bindemittel. Abhängig davon, welcher Hauptbestandteil beim Lehm überwiegt, unterscheidet man zwischen tonigem, schluffigem oder sandigem Lehm. [5]

Zudem wird je nach Bindekraft zwischen magerem Lehm, wenn dieser arm an Tonanteilen ist, und einem fetten Lehm, bei erhöhtem Tonanteil, unterschieden [10]. Die nachstehende Abbildung 1.2 zeigt die Kornzusammensetzungen von verschiedenen Lehmarten im Dreiecksnetz.

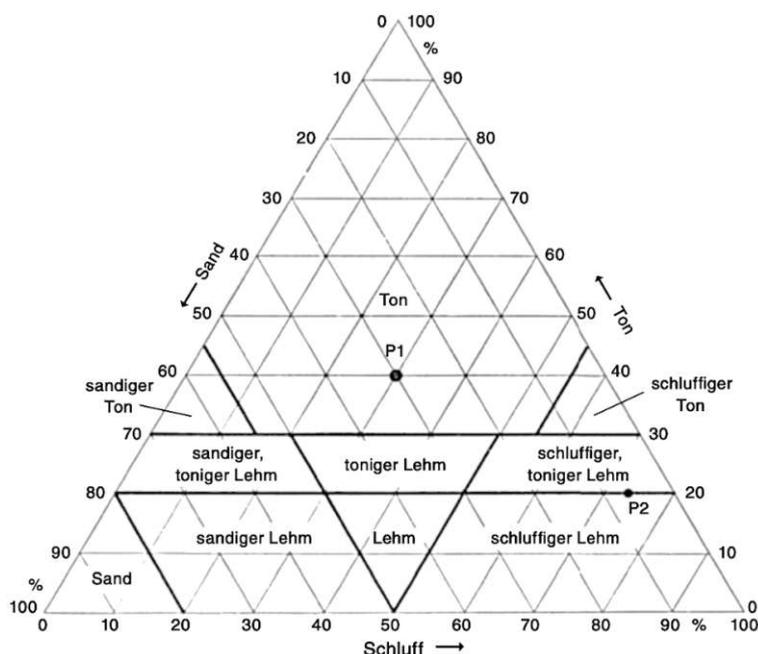


Abb. 1.2: Darstellung verschiedener Lehmarten nach ihrer Kornzusammensetzung im Dreiecksnetz, [1]

Alternativ kann die Zusammensetzung des Lehms auch in der Kornverteilungskurve (Körnungslinie bzw. Sieblinie) dargestellt werden. Der prozentuelle Anteil des jeweiligen Kornes wird dabei bezogen auf die Gesamtmasse des Lehms angegeben und die Korndurchmesser auf einer logarithmischen Skala aufgetragen. [10]

Die Kornverteilungskurve gibt Aufschluss über verarbeitungs- und bautechnische Eigenschaften, wie beispielsweise Formänderungen, die Verdichtbarkeit, die Druckfestigkeit und die Erosionsstabilität. Setzt sich Baulehm aus nur wenigen unterschiedlichen Korngrößen zusammen, spricht man von einer gleichförmigen Zusammensetzung. Anderenfalls ist er ungleichförmig zusammengesetzt. An den Kornverteilungslinien wird dies durch deren steilen bzw. flachen Anstieg deutlich. [1]

Die nachstehenden Abbildungen sind dem Handbuch Lehmabau von Minke [5] entnommen und zeigen verschiedene Kornverteilungslinien von magerem bis fettigem Lehm.

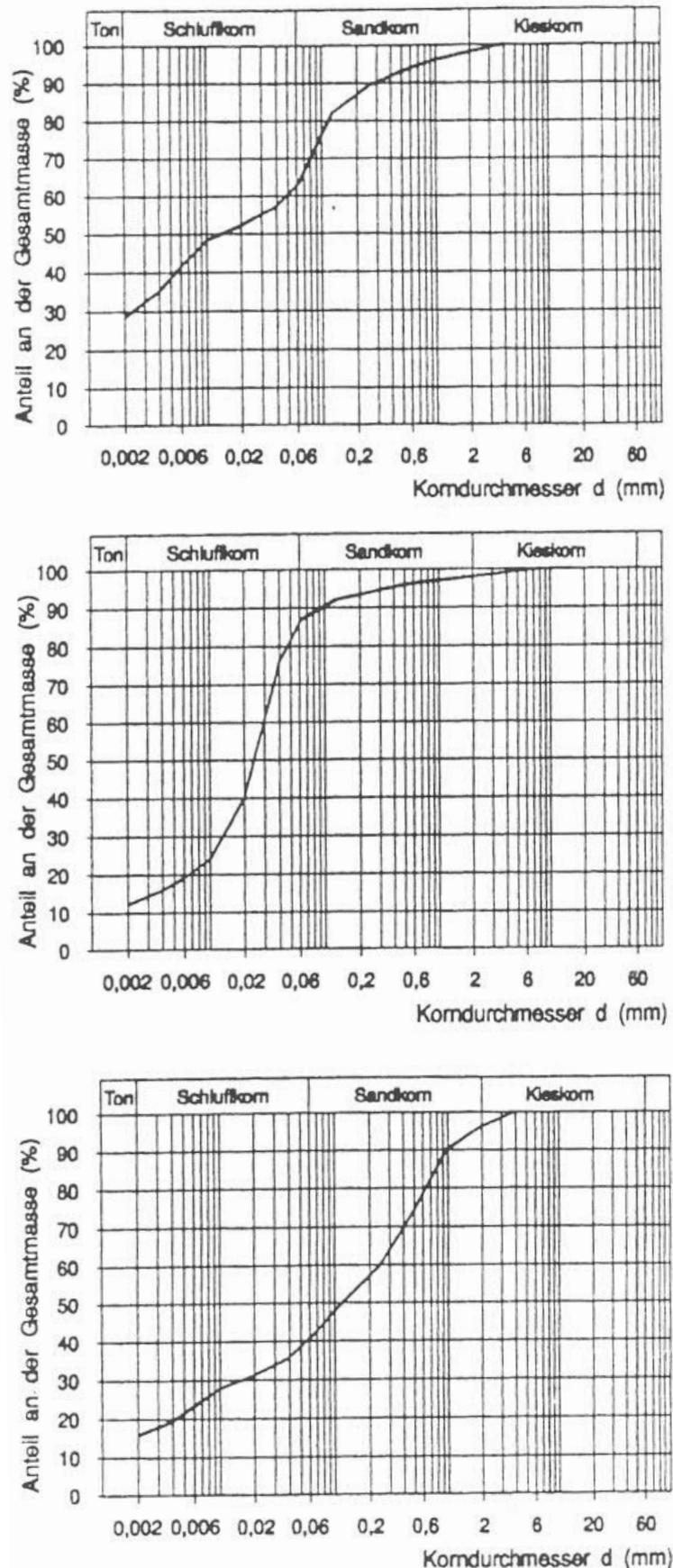


Abb. 1.3: Kornverteilungskurven von Lehm in absteigender Reihenfolge: toniger Lehm, schluffiger Lehm, stark sandiger Lehm, [5]

1.3 Ton als Bindemittel

Wie bereits im Kapitel 1.2 beschrieben, nimmt Ton im Lehm aufgrund seiner Feinkörnigkeit (Korndurchmesser von weniger als 0,002 mm) die Funktion als Bindemittel ein. Ton definiert sich als Verwitterungsprodukt aus Feldspat und anderen Mineralien. Feldspat besteht aus Aluminiumoxid, einem zweiten Metalloxid (Bor- oder Siliziumoxid) und Kieselsäure. Tone sind negativ geladen und haben dadurch im Gegensatz zu den weiteren Lehmbestandteilen die Eigenschaft, andere Teilchen an sich zu binden. [10]

Tonminerale, sogenannte Verwitterungs- und Umwandlungsprodukte magmatischer, metamorpher oder sedimentärer Ausgangsgesteine entstehen durch das Herauslösen leichter löslicher Verbindungen im Rahmen des Verwitterungsprozesses. Die Zusammensetzung der Ursprungsgesteine sowie das jeweilige Verwitterungsmilieu haben Einfluss auf die Bildung der Tonminerale. [8]

Tonminerale bestehen in der Regel aus hexagonalen kristallinen Plättchen, deren Oberfläche negativ geladen ist [5].

Zu den Grundbausteinen von Tonmineralen zählen

- vier Sauerstoffatome, die eine Tetraedereinheit um ein vierwertiges Silizium-Ion bilden (Tetraederschicht) und
- sechs Sauerstoffatome, die eine Oktaedereinheit um ein sechswertiges Aluminium-Ion bilden (Oktaederschicht).

Diese Grundbausteine verbinden sich und bauen sich in unterschiedlicher Zusammensetzung schichtförmig auf, wodurch die verschiedenen Tonminerale in Plättchenform entstehen [8]. Je nach Verknüpfung und Lagerung der Tetraeder und Oktaeder entstehen Schichten, die bei Vorhandensein jeweils nur einer Tetraeder- bzw. Oktaederschicht als Zweischichtmineral bzw. bei beidseitiger Anlagerung von Tetraederschichten an die Oktaederschicht als Dreischichtmineral bezeichnet werden [11]. Zu den bekanntesten Tonmineralen zählen das Kaolinit (Vertreter der Zweischichtminerale), das Illit sowie das Montmorillonit (beides Vertreter der Dreischichtminerale), deren Struktur und Eigenschaften der Abbildung 1.4 entnommen werden können.

	Zweischicht- minerale	Dreischicht- Minerale	Dreischicht- Minerale (quellfähig)	Vierschicht- minerale
Struktur:	T Tetraederschicht O Oktaederschicht	T Tetraederschicht O Oktaederschicht T Tetraederschicht	T Tetraederschicht O Oktaederschicht T Tetraederschicht	T Tetraederschicht O Oktaederschicht T Tetraederschicht O Oktaederschicht
Bindung der Elementar- schichten	Wasserstoffbrücken (Halloysit: H ₂ O- Moleküle)	Zwischenschicht- Kationen	Zwischenschicht- Kationen	Zwischenschicht- Kationen
Häufigster Vertreter:	Kaolinit	Illit	Montmorillonit	Chlorit
Farbe:	weiß	grau, grün, weiß	weiß, gelb	grünlich
Quellfähigkeit:	fehlt	fehlt (gering)	vorhanden	fehlt
Spezifische Oberfläche [m ² /g]:	30 (gering)	50 – 200 (abh. von der Korngröße und Aufweitung)	800 (hoch)	< 200 (mäßig)

Abb. 1.4: Übersicht - Struktur und Eigenschaften von Tonmineralen, [8]

Die Schichtstruktur der Tonminerale hat Einfluss auf deren Quellfähigkeit bzw. Wasseraufnahmevermögen. Von Quellen spricht man, wenn sich das Volumen des Lehms bei Wasseraufnahme vergrößert. Zurückzuführen ist der Vorgang der Volumenzunahme auf das Eindringen von Wasser in das Kristallgefüge des Tons im Lehm. Die Kristallplättchen werden dabei von einem dünnen Wasserfilm umschlossen. Dadurch wird der Lehm plastisch verformbar. Die Sorption von Wasserdampf führt hingegen nicht zum Quellen wie im oben beschriebenen Ausmaß und zu keiner Plastifizierung des Lehms. Schwinden bedeutet im Umkehrschluss die Verkleinerung des Volumens bei Trocknung. Beim Trocknen verdunstet das Wasser im Lehm und die Kristallplättchen lagern sich dicht aneinander. Dabei entstehen sogenannte Kohäsionskräfte, welche die „Bindekraft“ des Lehms im plastischen Zustand und im trockenen Zustand die Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit bewirken. Auch wenn der Tonanteil im Baulehm in der Regel lediglich zwischen 5–15 % beträgt, haben die Art und Menge des Tones Einfluss auf das Quell- und Schwindmaß. Einflussreicher als die Art des Tones betreffend Quellen und Schwinden sind dessen Menge und die Zusammensetzung der nichttonischen Partikel. Anknüpfend an die bereits angeführten bekanntesten Tonminerale quillt und schwindet Montmorillonit im Gegensatz zu Kaolinit und Illit sehr stark. [5]

Die meisten Tonminerale besitzen austauschbare Kationen, deren Art und Menge sich erheblich auf die Bindekraft bzw. Plastizität und damit einhergehend auch auf die Trockenbiegezugfestigkeit und die Trockendruckfestigkeit auswirken. Die Eigenschaft, Kationen auszutauschen, wird als Kationen-Austauschkapazität bezeichnet und in Milliäquivalenten je 1 g oder je 100 g Boden angegeben. Kaolinite besitzen im Vergleich zu Montmorilloniten eine eher niedrige Kationen-Austauschkapazität. Das Kationen-Austauschvermögen entspricht dem potenziellen Quellvermögen von Tonmineralien. Die Aktivitätszahl I_A nach Skempton ermöglicht eine qualitative Beurteilung der Fähigkeit einer Lehmprobe zur Wasseraufnahme und lässt auf die Dominanz bzw. das Vorhandensein bestimmter Tonmineralien schließen. [1]

Laut Minke [5] kann ganz allgemein gesagt werden, dass mit abnehmender Dicke des Kristallplättchens und damit einhergehender Zunahme der Oberfläche das Kationenaustauschvermögen und die Trockenbiegezugfestigkeit steigen.

2 Lehm als Baustoff

Das nachstehende Kapitel beschreibt die geschichtliche Entwicklung des Bauens mit Lehm und stellt einen Konnex zwischen den vom Bausektor ausgehenden Emissionen und dem Erfordernis einer nachhaltigen Entwicklung mit Blick auf die Zukunft her. Anschließend werden die Einflüsse auf die Lebensbereiche des Menschen dargelegt und die technischen und bauphysikalischen Eigenschaften von Lehmbaustoffen angeführt. Die Erläuterungen im Zusammenhang mit den in der gegenständlichen Arbeit erforderlichen Regelwerken bilden den Abschluss dieses Kapitels.

2.1 Von den Anfängen bis zur Gegenwart

Lehm als elementarer und einer der ältesten Baustoffe der Welt blickt auf eine mehrere Jahrtausende andauernde Tradition zurück und ist kulturgeschichtlich von sehr großer Bedeutung [12]. Als sogenannter Massenbaustoff hat er schon damals eine zentrale Rolle eingenommen. Abhängig von den klimatischen, vegetativen sowie geologischen Gegebenheiten, haben sich im Laufe der Menschheit unterschiedlichste Bauweisen und Konstruktionsformen herausgebildet. Den massiven Konstruktionen in trocken-heißen Klimaten, bei denen dem Lehm in der Wand eine lastabtragende Funktion zukommt, stehen Skelettkonstruktionen in Übergangsklimaten und Bergregionen gegenüber, bei denen ein Skelett aus Holz die Lastabtragung im Gebäude übernimmt. Dem Lehm, oftmals in Kombination mit Stein, kommt eine raumumschließende Funktion zu und er dient der Ausfachung. [1]

Im Nahen und Mittleren Osten lassen sich Lehmbauten mehr als 10.000 Jahre zurückverfolgen, Ägypten blickt auf eine etwa 5.000 Jahre alte Lehmbaugeschichte zurück und auch in Europa können erste Lehmbauten bis ca. 5.000 v. Christus zurückverfolgt werden. Die Technik des Stampflehmbaus gibt es beispielsweise seit der Jungsteinzeit und sie war über viele Erdteile weit verbreitet. Neben der vor etwa 4.000 Jahren errichteten Chinesischen Mauer, die ursprünglich fast ausschließlich aus Stampflehm bestand, findet man auch in Europa noch historische Stampflehmabauten, wie etwa die 1.000 Jahre alten Mauern der Alhambra in Spanien. [13, 14]

Auch in vielen Regionen Österreichs war Lehm über Jahrhunderte als Baumaterial von zentraler Bedeutung. Speziell hervorzuheben sind die ehemals große Anzahl an Ton- und Lehmgewinnungs- und Verarbeitungsstätten in Niederösterreich, von denen heutzutage nur noch einige wenige in Betrieb und der Öffentlichkeit zum Teil auch nicht bekannt sind, und das Südburgenland. Die Weinviertler Kulturlandschaft zeichnet sich durch bestimmte Lehmbautechniken, aus denen unverwechselbare traditionelle Bauten hervorgegangen sind, ganz besonders aus und ist innerhalb Europas einzigartig. Die meisten Lehmabauten, die heute noch bestehen, gehen auf das 19. Jahrhundert zurück. Die Industrialisierung in der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts führte schließlich zur weitgehenden Abkehr vom Bauen mit Lehm, weil moderne Baumaterialien wie Beton, Zement und Stahl als zukunftssträftig galten. Mit der Verdrängung des Lehms durch den vordergründigen Einsatz der genannten Baustoffe ist im Laufe der Jahrhunderte das weltweite Wissen um die historischen Lehmbautechniken immer mehr in Vergessenheit geraten. Durch die Erschließung neuer Transportwege, die die Industrialisierung mit sich brachte, wurde Kohle in

großem Maße verfügbar. Für Niederösterreich bedeutete dies beispielsweise den Bau unzähliger Ziegelöfen und die Verdrängung des Lehmbaus durch die Produktion gebrannter Ziegel. [13, 15]

Während der traditionelle Lehmhaubestand durch Abbruch und Umbauten einerseits immer mehr in den Hintergrund gedrängt wird, gewinnt der Einsatz von Lehm als zeitgemäßes und zukunftsträchtiges Baumaterial andererseits zeitgleich immer mehr an Bedeutung [15].

2.2 CO₂-Emissionen – Einflüsse des Bausektors

Seit dem Beginn des Industriezeitalters und der Industriellen Revolution um 1750 hat die Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre, allen voran das Kohlendioxid, immer mehr zugenommen. Im Jahr 2021 hat die globale Konzentration der Treibhausgase neue Rekordwerte erreicht. Der globale Jahresdurchschnitt der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre lag bei 414,7 parts per million [ppm] und war der höchste Wert, der jemals in den modernen Beobachtungsaufzeichnungen gemessen wurde. [16]

Die Zunahme der Kohlendioxid-(CO₂-) Konzentration in der Atmosphäre gilt als anthropogen und als eine der grundlegenden Ursachen des Treibhauseffektes, der zur weltweiten Erwärmung und somit zum Klimawandel als Folgeerscheinung beiträgt. Der durchschnittliche globale Meeresspiegel ist im Laufe des 20. Jahrhunderts bei gleichzeitiger Erhöhung der Meerestemperatur immer weiter angestiegen und hat im Jahr 2021, in dem er etwa 9,7 cm über dem Durchschnitt von 1993, dem Jahr, in dem die Aufzeichnungen der Satellitenmessungen begannen, lag, neue Rekordwerte erreicht. Gleichzeitig lässt die erhöhte Aufnahme von CO₂ das Meerwasser sauer werden, mit negativen Auswirkungen auf die Meereslebewesen. [1, 16]

Dem Bausektor werden von der UNO in etwa 40 % der globalen CO₂-Emissionen zugeschrieben. Grund dafür ist der Energieverbrauch bei der Produktion von Zement, Stahl und Beton. Als globales Instrument zur Verfolgung von Fortschritten gilt der Globale Statusbericht für den Gebäude- und Bausektor, der Erkenntnisse liefert und auf Informationen hinweist, die zum Verständnis der Bemühungen beitragen, die den Übergang zu einem emissionsfreien, energieeffizienten und widerstandsfähigen Gebäude- und Bausektor unterstützen. Der UN - 2020 Global Status Report for Buildings and Construction beziffert die CO₂-Emissionen aus dem Betrieb von Gebäuden mit rund 10 Gigatonnen CO₂ bzw. 28 % der gesamten globalen energiebezogenen CO₂-Emissionen. Damit seien die CO₂-Emissionen im Jahr 2019 auf den bislang höchsten Stand gestiegen. Bezieht man auch die Emissionen aus dem Baugewerbe mit ein, steigt dieser Anteil auf 38 % der gesamten globalen energiebezogenen CO₂-Emissionen. Insgesamt hat sich der Gebäude- und Bausektor im Jahr 2019 somit vom Ziel des Pariser Abkommens, den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf unter 2 °C zu senken entfernt, anstatt angenähert. [17]

Der UN - 2021 Global Status Report for Buildings and Constructions spricht hingegen von einem Rückgang der energiebedingten Emissionen aus Gebäuden und dem Baugewerbe im Jahr 2020, der auf die pandemiebedingten Folgeerscheinungen, nämlich eine veränderte Nutzung von bestehenden Gebäuden sowie ein allgemeiner Rückgang der Produktion und der Nachfrage nach Baumaterialien aufgrund der wirtschaftlichen Abschwächung, zurückzuführen ist. Um die Ziele des Pariser Abkommens dennoch zu erreichen, sieht der UN - 2021 Global Status Report for Buildings and Constructions vor, dass der globale Gebäude- und Bausektor bis 2050 fast vollständig dekarbonisiert wird. Die Verringerung von Gebäudeemissionen soll demnach während ihres gesamten Lebenszyklus durch eine Kombination aus der Verringerung der Energienachfrage (Verhaltensänderung und Energieeffizienz), der Dekarbonisierung der

Energieversorgung (z.B. Elektrifizierung durch erneuerbare Quellen und verstärkte Nutzung von kohlenstofffreien Heiztechnologien) und einer Berücksichtigung des in den Baumaterialien gespeicherten Kohlenstoffs erreicht werden. [18]

Aufgrund dessen ist es erforderlich, dass die Bauwirtschaft ihren Blick auf energieeffiziente und vor allem ökologische Alternativen zu den herkömmlichen Baumaterialien lenkt, wobei dem Baustoff Lehm im Hinblick auf seine ökologische Hochwertigkeit, vor allem aber auf klimafreundliches Bauen, ganz besondere Bedeutung zukommt.

2.3 Nachhaltigkeitsaspekt von Lehmbaustoffen

Die Gewinnung, Herstellung und Verarbeitung von industriell gefertigten Baustoffen ist oftmals mit schwerwiegenden Eingriffen in den Naturhaushalt, Emissionen und einem hohen Ressourcenverbrauch verbunden. Unter Berücksichtigung der Ausführungen in Kapitel 2.2 rückt jedoch das verantwortungsbewusste, ressourcenschonende und vor allem nachhaltige Bauen immer mehr in den Fokus der Baupraxis. Ziel ist daher die Reduktion der auf unsere natürlichen Lebensgrundlagen schädigend wirkenden Einflüsse. Die Rückkehr zum Bauen mit Lehmbaustoffen bedeutet in diesem Zusammenhang eine Rückkehr zu lokalen Bautraditionen und vielerorts auch zur kulturellen Identität. [19]

Der Begriff der Nachhaltigkeit wurde im Bericht „Our common future“ der Brundtland-Kommission an die UN-Kommission für Umwelt und Entwicklung erstmals im Sinne einer zukunftsverträglichen Entwicklung der Menschheit angewendet. Eine nachhaltige Entwicklung bedeutet demnach sinngemäß, dass die Bedürfnisse der heutigen Generation ohne Beeinträchtigung der Bedürfnisse künftiger Generationen gestillt werden. Auf die Baubranche umgelegt beschreibt der Begriff „Nachhaltiges Bauen“ einen Prozess, wonach in allen Lebensphasen eines Gebäudes der Verbrauch vorhandener Ressourcen und die Belastung der Umwelt unter Berücksichtigung der Ansprüche der Nutzer minimiert werden sollen. Differenziert wird dabei zwischen drei gleichwertigen Aspekten,

- der Ökologie,
- der Ökonomie und
- den Nutzerinteressen,

die bestimmten vordefinierten technischen Parametern und einer entsprechenden Qualität in Planung und Bauausführung an die Gebrauchstauglichkeit genügen müssen. Dabei handelt es sich um

- mechanische Festigkeit und Standsicherheit,
- Brandschutz,
- Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz,
- Nutzungssicherheit,
- Schallschutz,
- Energieeinsparung und Wärmeschutz. [1]

Durch die Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates „Zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten“ vom März 2011 wurden die obgenannten Anforderungen durch die nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen erweitert. Bauwerke sind demzufolge so zu errichten, dass sie nach Ende des Gebrauchs bzw. mit Ablauf ihres Lebenszyklus demontiert werden können und eine nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen ermöglicht werden kann. Das Bauwerk muss dauerhaft sein und es müssen umweltfreundliche Rohstoffe und Sekundärbaustoffe verwendet werden. Es muss gewährleistet sein, dass das Bauwerk in seiner Gesamtheit nach dem Abriss recycelt werden kann. Um dem Begriff des nachhaltigen Bauens gerecht zu werden, werden vor allem an die bauphysikalischen Eigenschaften von Baustoffen bzw. Baukonstruktionen umfassende Anforderungen gestellt. [1]

Ökologische Baustoffe dürfen, unter Berücksichtigung der obenstehenden Ausführungen, nur geringe Umweltbelastungen und negative gesundheitliche Auswirkungen im Laufe ihrer Lebenslinie erzeugen. Rohstoffe zur Baustoffherstellung müssen deshalb umweltverträglich und ressourcenschonend abgebaut werden und sollen regenerativ oder langfristig verfügbar sein. Der Energieaufwand zur Rohstoffgewinnung und Herstellung der Baustoffe muss ebenso wie der Transportenergieaufwand so gering wie möglich gehalten werden. Schadstoffemissionen bei der Herstellung und Verarbeitung sind ebenso zu vermeiden. Nach Ablauf der Lebensdauer von Gebäuden sollen die Baustoffe nach dem Cradle-to-Cradle-Prinzip mit minimalem Energieaufwand wiederverwendet, recycelt bzw. umweltfreundlich verbracht werden können. [1]

Der Lebenszyklus bzw. Stoffkreislauf eines Gebäudes beschreibt den gesamten Lebensweg von der Rohstofferkundung, über die Gewinnung, die Aufbereitung zu Baustoffen, die Verarbeitung zu Bauteilen, die Gebäudenutzung bis hin zum Abriss und Recycling. Der Baustoff muss während des gesamten Lebenszyklus den technischen und funktionalen Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit und das nachhaltige Bauen gerecht werden. Die Abbildung 2.1 beschreibt den Lebenszyklus des Baustoffs Lehm. Mit Durchlaufen eines Zyklusabschnittes erlangt der Lehm jeweils eine neue Qualität. Rohlehm wird zu Baulehm, dieser wiederum zum Lehmabbaustoff usw. Der Kreislauf schließt sich mit der Wiederverwendung von Recyclinglehm. [1]



Abb. 2.1: Lebenszyklus Lehmabbaustoff, [1]

Wie die bisherigen Ausführungen in Kapitel 2.1 bereits gezeigt haben, erfüllt Lehm sowohl als Rohstoff als auch als Baustoff die Anforderungen an das nachhaltige Bauen. Lehmbaustoffe gelten a priori als umweltfreundlich. Der Rohstoff selbst kann regional gewonnen werden und seine Weiterverarbeitung zum Baustoff kann mit geringem Energieaufwand und Hinterlassung eines marginalen CO₂-Abdruckes erfolgen. Lehmbaustoffe sind zudem ohne Qualitätsverlust in ihrem gesamten Lebenszyklus gemäß dem Cradle-to-Cradle-Prinzip unendlich recyclebar und können jederzeit problemlos in den Naturkreislauf rückgeführt werden. [1]

Als wichtiger Indikator, um die Umweltbelastung bei der Gewinnung von Rohstoffen maßgeblich zu reduzieren, gilt die Primärenergie (PE) bzw. der Primärenergieinhalt (PEI), der den Energieaufwand von der Gewinnung der Rohstoffe über die Herstellung der Produkte bis zu deren Verwendung angibt. Beachtenswert ist auch der Transportenergieaufwand des fertigen Bauteils bis zum Einbauort. Der PEI ist so gering wie möglich zu halten, da eine Einsparung an Primärenergie immer Hand in Hand mit der Reduktion der CO₂-Produktion geht. Der PEI-Wert wird zumeist in Kilowattstunden [kWh] oder Megajoule [MJ] pro Tonne oder Kubikmeter angegeben, wobei 1 MJ 0,278 kWh entspricht. Natürliche Baustoffe, allen voran Lehm, haben im Gegensatz zu industriell hergestellten Baustoffen einen sehr geringen PEI. [1, 5]

In Zahlen ausgedrückt beträgt der PEI von Lehmstein 400 kWh/m³ bzw. 1440 MJ/m³ und der einer Stampflehmwand 30 kWh/m³ bzw. 106 MJ/m³. Im Gebäudeausbau ist derzeit der Einsatz von Gipskartonplatten gängige Praxis. Im Hinblick auf den Einsatz von Lehmbaustoffen im Trockenbau bzw. die grundsätzliche Notwendigkeit der Verwendung von ressourcenschonenden und umweltverträglichen Baumaterialien sind nachstehend in Abbildung 2.2 vergleichsweise der PEI-Wert von Gipskartonplatten (830 kWh/m³ bzw. 2987 MJ/m³) und Gipsfaserplatten (1529 kWh/m³ bzw. 5505 MJ/m³) angeführt. [20]

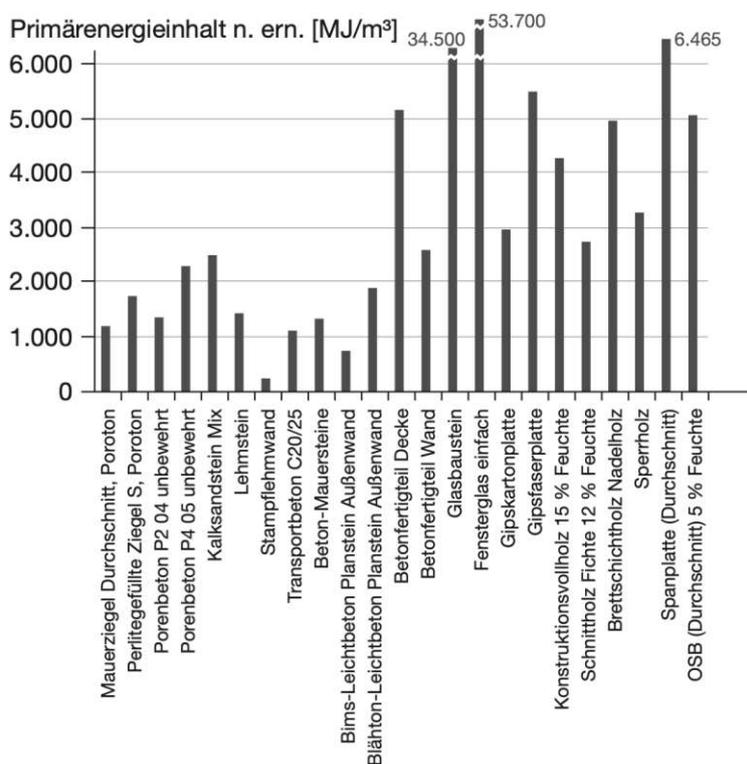


Abb. 2.2: PEI (nicht ern.) mineralischer Baustoffe, Holz und Holzwerkstoffe, [20]

Die Abbildung 2.2 veranschaulicht deutlich, dass die PEI-Werte von Gipskarton- und Gipsfaserplatten jene von Lehm um ein Vielfaches übersteigen. Die bereits vorhandenen PEI-Werte von Lehm sind zusätzlich um jene der im Rahmen der Entwicklung von Lehmplatten beigemengten Additive und Beschichtungen zu ergänzen, um einen aussagekräftigen PEI-Wert für das fertige Produkte zu erhalten und dieses in Relation zu den vorliegenden Werten von Gipskarton- und Gipsfaserplatten setzen zu können. Festzuhalten ist jedenfalls, dass selbst unter Berücksichtigung der PEI-Werte der Additive und Beschichtungen, unter der Voraussetzung, dass es sich dabei um natürliche Stoffe handelt, die wenig bis gar nicht verarbeitet wurden, der PEI-Wert des Gesamtproduktes wesentlich niedriger sein wird. Es scheint daher sinnvoll, den Einsatz von Lehmbauplatten als konkurrenzfähiges Produkt zu Gipskartonplatten im Trockenbau zu forcieren. Allgemein ist festzuhalten, dass, je weniger die Produkte industriell verarbeitet werden bzw. je niedriger der Anteil an Additiven und Beschichtungen ist, desto mehr dem ökologischen Gedanken entsprochen wird.

2.4 Einflüsse von Lehmbaustoffen auf die Lebensbereiche des Menschen

Ausgehend von dem Umstand, dass die Bevölkerung in unserem Kulturkreis in etwa 90 % ihrer Lebenszeit in Räumen verbringt und Millionen von Menschen unter innenraumbedingten Befindlichkeitsstörungen leiden, sollte ein wesentliches Ziel von Neu- und Umbauten von Gebäuden die Schaffung von behaglichen und gesundheitsverträglichen Wohn- und Arbeitsbereichen sein. Die Faktoren Raumklima, Lärm, Gerüche, Licht etc., aber auch Schadstoffe durch die Ausgasung von Baumaterialien sind unmittelbar mit der Gesundheit und dem Wohlbefinden verbunden und haben einen wesentlichen Einfluss auf unseren Gesundheitszustand. Aus diesem Grund ist es erforderlich, bei der Auswahl der Baumaterialien den Fokus vor allem auf deren Inhaltsstoffe zu legen. Die Stärke von Lehm besteht darin, dass er, unter der Voraussetzung, dass er nicht verunreinigt wurde, ausschließlich aus natürlichen Bestandteilen besteht, die weder auf die Umwelt, noch auf die Gesundheit des Menschen schädliche Auswirkungen haben. Des Weiteren wirkt sich die feuchtepuffernde Wirkung von Lehm positiv auf das Raumklima und damit einhergehend auf das Wohlbefinden und die Gesundheit von Menschen aus. [19, 21]

2.4.1 Raumklima

Das Raumklima wird v.a. anhand der Faktoren Raumlufttemperatur, der mittleren Strahlungstemperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit und der Geschwindigkeit der Luftbewegungen im Raum bestimmt. Vor allem die **Luftfeuchte** in Innenräumen beeinflusst die Gesundheit des Menschen wesentlich. Eine relative Luftfeuchte von weniger als 40 % kann beispielsweise zu einer Austrocknung der Schleimhäute führen und das Risiko, an Erkältungen zu erkranken, erhöhen. Die trockene Luft bewirkt, dass die schützende Schleimschicht durchlässiger wird und leichter von Krankheitserregern durchdrungen werden kann. [5, 22]

Eine hohe relative Luftfeuchte verringert im Gegensatz dazu unter anderem den Feinstaubgehalt der Luft, die Lebensdauer vieler Bakterien und Viren und aktiviert die Abwehrfähigkeit der Haut gegenüber Mikroben. Außerdem wird durch eine zu hohe relative Luftfeuchte (höher als 60 %) die Schlafqualität herabgesetzt. Erreicht die Luftfeuchtigkeit im Raum mehr als 70 %, wird dies regelmäßig als unangenehm empfunden, da feuchtwarme Luft die Sauerstoffaufnahme im Blut reduziert. Beträgt die relative Luftfeuchte in geschlossenen Räumen regelmäßig über 70 %, ist das Risiko von gefährlicher Schimmelbildung stark erhöht. Es ist allgemein bekannt,

dass eingeatmete Schimmelpilzsporen eine Vielzahl an Beschwerden und allergischen Reaktionen auslösen können. Zusammengefasst ist daher festzuhalten, dass der Feuchtegehalt in geschlossenen Räumen zwischen 40 % und 60 %, bestenfalls 50 % zu betragen hat. [5, 22]

Poröse, diffusionsoffene Baustoffe wie Lehm können durch ihre Fähigkeit zur Feuchtigkeitsaufnahme aus der Luft und Feuchtigkeitsabgabe an die Luft die hygrischen Bedingungen in geschlossenen Räumen positiv beeinflussen und zum Feuchteausgleich beitragen. Die feuchteregulierende Wirkung von Lehm hängt neben der Gleichgewichtsfeuchte unter anderem auch von der Geschwindigkeit ab, in der die Feuchtigkeit aufgenommen und wieder abgegeben werden kann. [5]

Detaillierte Ausführungen zum Sorptionsverhalten von Lehm im Allgemeinen finden sich in Kapitel 2.6.3. Die Ergebnisauswertungen der im Rahmen der gegenständlichen Arbeit durchgeführten Versuchsreihen zum Sorptionsverhalten von Lehm mit und ohne Additiven und Beschichtungen finden sich in Kapitel 5.

Eine weitere positive Eigenschaft von Lehm ist dessen Fähigkeit, **Schadstoffe** aus der Raumluft zu absorbieren. Bei der Untersuchung eines historischen Lehmputzes in einem ofenbeheizten Raum eines Wellerbaus aus dem 17. Jahrhundert wurde nach Ziegert im Lehmoberputz 3,5 % mehr Schwefel nachgewiesen als in den nahezu schwefelfreien Putzen der anderen Räume [5]. Zusätzlich ermöglicht die große Oberfläche der Tonminerale im Lehmbaustoff eine dauerhafte bzw. zumindest temporäre Bindung von Gerüchen und Schadstoffen und somit eine Verbesserung der Luftqualität in Innenräumen [19]. Die Fähigkeit der Bindung von Schadstoffen wird laut Minke [5] auch in der Industrie genutzt. Das Kernforschungszentrum Karlsruhe hat ein Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphat aus häuslichen Abwässern mit Hilfe von stark tonhaltigem Lehm entwickelt. Die Tonminerale binden die Phosphate an sich und werden somit dem Abwasser entzogen. Dem Wasser müssen bei diesem Verfahren keinerlei Fremdstoffe zugefügt werden und das gewonnene Phosphat kann in getrockneter Form als Calciumphosphat für die Düngemittelherstellung wiederverwendet werden. [5]

Zusammenfassend ist an dieser Stelle festzuhalten, dass Lehm nicht nur im medizinischen und kosmetischen Bereich aufgrund seiner positiven und gesundheitsverträglichen Wirkung große Beliebtheit erfährt. Seine antibakteriellen, reinigenden und entzündungshemmenden Eigenschaften resultieren bei seiner Verwendung als raumbildender Baustoff auf seiner Fähigkeit zur Bindung von Feuchte und Schadstoffen (Adsorptionsvermögen). [21]

In engem Zusammenhang mit einem gesunden Raumklima steht zudem das Erfordernis des richtigen **Lüftens** von Wohnräumen. Einerseits wird dadurch zu hohe Luftfeuchte abgeführt und ein behaglicheres Wohnklima geschaffen, andererseits wird der Bildung von Schimmel entgegen gewirkt. Ein regelmäßiger Luftaustausch sorgt zudem für einen ausreichenden Sauerstoffgehalt im Raum und das Vorhandensein von Schadstoffen in der Raumluft wird deutlich reduziert. [21]

Eine zusätzliche Eigenschaft von Lehm, die sich positiv auf ein behagliches Raumklima auswirkt, stellt seine **schalldämpfende Wirkung** dar. Die Anbringung von z.B. Trockenbau-Lehmplatten ermöglicht im schallschutztechnischen Bereich deutlich verbesserte Werte. [21]

2.4.2 Strahlenbelastung

Wenn die Rede von Strahlenbelastung ist, so ist zwischen

- der radioaktiven Belastung und
- der hochfrequenten elektromagnetischen Strahlung

zu unterscheiden.

Radioaktive Belastung

Es ist allgemein bekannt, dass der Mensch, so wie alle Lebewesen auf der Erde, einer natürlichen Exposition durch ionisierende Strahlen ausgesetzt ist. Unterschieden wird dabei zwischen der unveränderten natürlichen Belastung und der künstlichen Strahlenexposition. Die natürliche Belastung setzt sich aus der kosmischen, der terrestrischen und der inkorporierten, d.h. mit der Nahrung aufgenommenen, Strahlung sowie aus der durch Menschenhand veränderten natürlichen Strahlenexposition in Form von Baustoffen und der Inhalation von dem radioaktiven Gas Radon und der von seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten ausgehenden α -Strahlung zusammen. Die künstliche Strahlenexposition umfasst die Strahlenbelastung im Bereich der medizinischen Diagnostik und Therapie sowie die Folgen von Reaktorunfällen (z.B. Tschernobyl). [1]

Dass natürliche Baumaterialien wie Lehm, auf dem der Forschungsfokus in der gegenständlichen Arbeit liegt, natürliche Radionuklide enthalten und die Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit für einen Laien nicht absehbar sind, sorgt für ein gewisses Unsicherheitspotenzial in Teilen der Bevölkerung. Zur Beurteilung der von Baustoffen ausgehenden radioaktiven Belastung ist neben dem Maß auch die Art der Belastung zu berücksichtigen und diese in Relation zur natürlichen terrestrischen und kosmischen Strahlenbelastung zu betrachten. Untersuchungen von Minke [5] mit einem auf β - und γ -Strahlung reagierenden Impulszähler haben bei den untersuchten Lehmen keine höheren Werte als bei den geprüften Betonen und gebrannten Ziegeln ergeben. Vereinzelt zeigte sich sogar eine deutlich höhere Strahlenbelastung bei Ziegel. Zudem wurden in der Raummitte von Innenräumen mit Lehmwänden nicht mehr Impulse pro Zeiteinheit ermittelt als im Freien. [5]

Obwohl die von Radon und seinen Zerfallsprodukten ausgehende α -Strahlung nicht über die Haut aufgenommen wird, kann sie eingeatmet werden und birgt sohin ein gewisses Risiko, an Lungenkrebs zu erkranken. Die Exhalationsrate von Radon stellt daher eine beachtenswerte Größe dar. Untersuchungen der OECD in Deutschland im Jahr 1979 [23] haben aufgezeigt, dass reiner Lehm von allen natürlichen mineralischen Baustoffen die geringste Radonbelastung aufweist. Für Ziegel aus Tonerde ergab sich eine Exhalationsrate von 5,0 mBq/kg. Demgegenüber wurde für Kies ein Wert von 64,8 mBq/kg, für Zement 57,6 mBq/kg und für Gas-Beton eine Exhalationsrate von 18,0 mBq/kg ermittelt. [23]

Im Jahr 1993 stellte Halder bei der Untersuchung von 6000 Wohnungen fest, dass die Radonabgaben verschiedener Baustoffe, mit Ausnahme von Chemiegips (Phosphorit), nur zu geringen Innenraumkonzentrationen führen und der Zusammenhang zwischen Radon und Baumaterial für die Praxis bedeutungslos ist, da die Radonbelastung in Innenräumen überwiegend aus dem Erdreich kommt. [5]

Hochfrequente elektromagnetische Strahlung

Die hochfrequente elektromagnetische Strahlung (HF-Strahlung) beruht auf gepulsten Frequenzen. Bei den physiologischen Auswirkungen der HF-Strahlung auf den menschlichen Körper wird, je nach Wirkungsweise, zwischen thermischen und nicht thermischen Wirkungen unterschieden.

Während thermische Wirkungen beim Eindringen der elektromagnetischen Wellen in den Körper entstehen, sich dadurch die kinetische Energie der Moleküle erhöht und eine lokale Temperaturerhöhung mit sich bringt, haben Forschungen zur nicht thermischen Wirkung gezeigt, dass diese unter anderem Verhaltensänderungen, neurologische Effekte, eine Erhöhung des Krebsrisikos, Schlafstörungen, Einfluss auf den Hormonhaushalt und Stoffwechsel, Stressreaktionen, Effekte auf das Erbgut etc. mit sich bringen können. Die Anforderungen an Baustoffe und deren Fähigkeit, HF-Strahlung abschirmen zu können, sind daher besonders hoch. [1, 24]

Studien [25] zufolge können Lehmbaustoffe bei ausreichender Schichtstärke (≥ 24 cm) vor hochfrequenter Strahlung schützen. Diese Erkenntnis liefern Untersuchungen von Prof. Peter Pauli und Dr.-Ing. Dietrich Moldan am Institut für HF-, Mikrowellen- und Radartechnik der Universität der Bundeswehr München zur Abschirmung hochfrequenter Strahlung durch Baustoffe. Es konnte aufgezeigt werden, dass eine 24 cm dicke Wand aus Lehmsteinen der Rohdichte 1600 kg/m^3 und 15 % Lochanteil für den Frequenzbereich 1,8 bis 1,9 GHz des Mobilfunk-E-Netzes und der schnurlosen DECT-Telefone eine Strahlendämpfung von in etwa 22 dB, entsprechend einer Reduktion um 99,4 %, bewirkt. Im Gegensatz dazu beträgt die Strahlendämpfung einer vergleichsweise 24 cm dicken Wand aus Hohllochziegeln mit 1200 kg/m^3 nur 17 dB und die einer gleich dicken Kalksandsteinwand mit Rohdichte 1800 kg/m^3 nur 7 dB. Versuche mit herkömmlichen Leichtbauwänden, wie sie regelmäßig im Fertigteilmbau eingesetzt werden, lieferten hingegen kaum verwertbare Ergebnisse einer Strahlendämpfung. [25]

Eine nahezu vollständige Abschirmung von 49 dB, das entspricht einer Reduktion um 99,999 %, im Bereich von 2 GHz zeigten Versuche mit einem Grasdach in Verbindung mit einem 24 cm dicken Lehmsteingewölbe, wobei bereits ein Grasdach mit 16 cm Leichtsubstrat bei 2 GHz 22 dB, d.h. über 99,4 % Strahlendämpfung, erreicht. Ein herkömmliches Ziegeldach hält vergleichsweise nur ca. 50 % der elektromagnetischen Wellen ab. [5]

2.4.3 Brandverhalten

Lehm ist nach DIN 4102-4 der Baustoffklasse A1, den nicht brennbaren Baustoffen, zuzuordnen. Die DIN 18948 hält für Lehmplatten fest, dass diese ohne Beimengung organischer Zusatzstoffe oder -mittel sowie ohne organische Bewehrung nach DIN 4102-4 ohne weitere Prüfung in die Baustoffklasse A1 eingestuft werden können. Enthalten Lehmplatten nicht mehr als 1 % Masseanteil an homogen verteilten organischen Zusatzstoffen, so können diese nach der DIN 4102-4 ebenso ohne weitere Prüfung der Baustoffklasse A1 zugeordnet werden. [26]

Mit pflanzlichen Faserstoffen versetzte Leichtlehme gelten laut Lehmbau Regeln [6] ab einer Rohdichte von $\geq 1700 \text{ kg/m}^3$ als ebenfalls nicht brennbar, was bereits in DIN 18951 Bl.1:1951-01, die im Jahr 1971 ersatzlos zurückgezogen wurde, festgelegt war. Im Einzelnen sind Lehmbaustoffe nicht klassifiziert. [6]

Das Brandverhalten von Lehmplatten ist nach DIN 18948 durch Prüfung nach DIN 4102-1 oder DIN EN 13501-1 zu bestimmen. Sowohl der Verbund mit anderen Baustoffen als auch die Art und Menge der Zuschlagsstoffe, die Gestalt und die spezifische Oberfläche haben ausschlaggebenden Einfluss auf das Brandverhalten. [21]

2.5 Mechanische Eigenschaften von Lehm

Das nachstehende Kapitel beschäftigt sich mit den wesentlichsten mechanischen Eigenschaften von Lehm-Baustoffen und beschreibt in diesem Zusammenhang überblicksmäßig die Biegezugfestigkeit, die Druckfestigkeit, die Abriebfestigkeit sowie die Haftzugfestigkeit von Lehmkörpern. Detaillierte Ausführungen zu den Festigkeitseigenschaften in Abhängigkeit der Konditionierung, zur Kraftübertragung im Lehm mit und ohne Additiven oder Fasern sowie zum Bruchverhalten von Lehmkörpern sind dem Kapitel 1.3 der Diplomarbeit zur „Mechanischen Untersuchung von Lehm mit Additiven und natürlichen Rohstoffen als Armierung“ von Philipp Ender (1) zu entnehmen.

Biegezugfestigkeit

In der Regel sollen Lehm-Bauteile keinem Biegezug ausgesetzt werden, weshalb die Biegezugfestigkeit für Baulehme, im Gegensatz zu Lehmputzen, von geringer Bedeutung ist. Die Biegezugfestigkeit ist abhängig vom Tongehalt und der Art des Tons. Untersuchungen an 33 montmorillonitfreien Ziegelei-Tonen von Hofmann, Schembra et al. (1967) haben ergeben, dass Tone, die aus relativ großen und dicken Plättchen bestehen und dadurch ein niedriges Kationenaustauschvermögen aufweisen, eine ebenso niedrige Biegezugfestigkeit haben. Die Biegezugfestigkeit ist bei Kaolinit bei Vorhandensein austauschbarer Natriumionen am höchsten und bei Vorhandensein von austauschbaren Kalziumionen am niedrigsten. Der Unterschied kann dabei 100 % betragen. Montmorillonit weist im Vergleich zu Kaolinit eine höhere Biegezugfestigkeit auf. [5]

Druckfestigkeit

Im Allgemeinen liegt die Druckfestigkeit zwischen 3 und 6 N/mm² (entspricht zwischen 30 und 60 kg/cm²). Wesentliche Parameter sind die Menge und Art des Tons, aber auch die Größe und Menge der Schlus-, Sand- und Kieskörner sowie die Art und das Maß der Aufbereitung und der Verdichtung des Lehms. Die Druckfestigkeit von extrem magerem Lehmörtel beträgt zwischen 1 N/mm² und 10 N/mm² bei idealer Zusammensetzung. [5]

Abriebfestigkeit

Die Abriebfestigkeit steht in weitgehender Korrelation zur Biegezugfestigkeit. Bei mechanischer Beanspruchung unterliegen Lehmoberflächen und Lehm-Bauteile einem Abrieb. Die Abriebfestigkeit ist umso höher, je glatter und geschlossener die Oberfläche und je höher die Bindekraft sind. Das Forschungslabor für Experimentelles Bauen (FEB) der Universität Kassel entwickelte mangels genormter Verfahren und Tests zur Bestimmung der Oberflächenfestigkeit ein Gerät zur Bestimmung der Abriebfestigkeit von Lehmoberflächen. Eine rotierende Bürste mit Durchmesser 7 cm wird über ein Gewicht mit einem Pressdruck von 2 kg gegen die Lehmoberfläche gedrückt und der dabei entstehende Abrieb nach 20 Umdrehungen gewogen. Eine optimale Kornzusammensetzung und ein entsprechend ausreichender Tongehalt sind ausschlaggebend für die Abriebfestigkeit. Kaolinit-Tone ergeben im Vergleich zu Montmorillonit-Tonen eine geringere Festigkeit. [5]

Haftzugfestigkeit

Die Haftzugfestigkeit findet hauptsächlich im Zusammenhang mit Lehmputzen Beachtung und ist von der Rauheit des Untergrundes und der Biegezugfestigkeit des Putzes abhängig. Nach DIN 18555-6 wird sie folgendermaßen ermittelt: Eine Prüffläche von 50 mm Durchmesser wird freigebohrt und mit einer Prüfplatte beklebt. Mit Hilfe eines Prüfgeräts wird diese Prüfplatte anschließend im rechten Winkel zum Untergrund abgezogen. [5]

2.6 Bauphysikalische Eigenschaften von Lehm

In diesem Kapitel werden die bauphysikalischen Eigenschaften von Lehmstoffen erläutert. Dabei handelt es sich um das wärmetechnische Verhalten, die Wasserdampfdiffusion sowie das Sorptionsverhalten von Lehmkörpern, wobei zwischen Adsorption und Absorption differenziert wird.

2.6.1 Wärmetechnisches Verhalten

Die Wärmedämmwirkung eines Baustoffes wird wesentlich von dessen Porenvolumen und somit seiner Rohdichte sowie seinem Feuchtegehalt beeinflusst. Je höher die Anzahl an Luftporen, umso leichter ist der Baustoff und umso größer ist seine Wärmedämmwirkung. Bei höherem Feuchtigkeitsgehalt ist die Wärmedämmwirkung entsprechend geringer. Der Wärmefluss durch ein Bauteil wird durch den Wärmedurchgangskoeffizienten U [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$] bestimmt. [5]

Die Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK] gibt die Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes, nämlich wieviel Wärme (gemessen in W/m^2) durch eine 1 m dicke Wand bei einer Temperaturdifferenz von 1°C geht, an. Die mittlere Wärmeleitfähigkeit ist für unvermischte Lehme mit $\lambda = 0,9 \text{ W}/\text{mK}$ angegeben. [27] Die Wärmeleitfähigkeitswerte von Lehmstoffen erhöhen sich abhängig von der Rohdichte auf einen Wert von $1,1 \text{ W}/\text{mK}$ bei $2000 \text{ kg}/\text{m}^3$ und entsprechen somit jenen anderer Massivbaustoffe mit vergleichbarer Rohdichte. Die Wärmeleitfähigkeit von schwerem Stampflehm kann beispielsweise bis zu $1,4 \text{ W}/\text{mK}$ betragen. [5, 19]

Für Lehmstoffe enthält die DIN 4108-4 aus 2020 [28] folgende, in der Tabelle 2.1 angeführte, Wärmeleitfähigkeiten:

Tab. 2.1: Wärmeleitfähigkeiten für Lehmstoffe abhängig von der Rohdichte, [28]

Rohdichte ρ [kg/m^3]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
2000	1,10
1800	0,91
1600	0,73
1400	0,59
1200	0,47
1000	0,35
900	0,30
800	0,25
700	0,21
600	0,17
500	0,14

Baustoffe gelten bis zu einer Grenze von $0,1 \text{ W}/\text{mK}$ als Dämmstoffe, welche in der Regel eine Wärmeleitfähigkeit von $0,03 - 0,06 \text{ W}/\text{mK}$ aufweisen. Vergleichsweise weist Holz eine Wärmeleitfähigkeit von $0,13 - 0,20 \text{ W}/\text{mK}$ auf. [19]

Die Wärmespeicherfähigkeit eines Baustoffes wird durch die Wärmespeicherzahl S bestimmt, die die erforderliche Wärmemenge zur Erwärmung von 1 m^3 eines Baustoffes um 1°C angibt und proportional zur spezifischen Wärmekapazität c (auch als spezifische Wärme bezeichnet) und zur Rohdichte ρ ist. Die spezifische Wärme gibt im Gegensatz zur Wärmespeicherzahl S jene Wärme an, die notwendig ist, um 1 kg eines Baustoffes um 1°C zu erwärmen. Je nach

Zusammensetzung und Rohdichte, als wesentliche Einflussgröße für die Wärmespeicherfähigkeit, ergeben die Werte der spezifischen Wärmekapazität von Lehmstoffen zwischen 1000 und 1500 J/kgK. Je größer die spezifische Wärmekapazität eines Baustoffes, desto langsamer erwärmt er sich. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass dem Baustoff mehr Energie zugeführt werden muss, um ihn um 1 °C zu erwärmen. Im Gegensatz zu mineralischen Stoffen können organische Stoffe mehr Wärmeenergie speichern. Anorganische Bau- und Dämmstoffe weisen zumeist eine Wärmekapazität von in etwa 1000 J/kgK auf, organische Dämmstoffe hingegen Werte von 1400 und 1600 J/kgK. Der spezifische Wärmekapazitätswert von Holz und Holzwerkstoffen beträgt 2100 J/kgK, Stahlbeton hat einen Wert von 880 J/kgK. [5, 19]

Um das Verhältnis zwischen Wärmedämmung und Wärmespeicherung eines Bauteils beschreiben zu können, wird der Begriff Wärmedämmung verwendet. Damit wird beispielsweise die Eigenschaft von Außenwänden bezeichnet, mit der Schwankungen der Außentemperaturen verzögert und verringert an die Innenoberflächen weitergeleitet werden. Wie bereits beschrieben, haben leichte und poren- bzw. lufthaltige Baustoffe eine hohe Wärmedämmfähigkeit, deren Wärmespeichervermögen ist aufgrund fehlender Masse und Volumen jedoch nur in geringem Ausmaß vorhanden. Bei gut wärmegeprägten Wänden werden die Temperaturschwankungen gedämpft (Amplitudendämmung), bei Wänden mit großer Wärmespeicherwirkung erfolgt der Wärmedurchgang in die Innenoberfläche erheblich verzögert (Phasenverschiebung). Die Wärmespeicherkapazität von Lehmstoffen ist, je nach Mischverhältnis und somit abhängig von Raumgewicht, Grad der Verdichtung und Zusammensetzung der Tonminerale, als hoch zu beschreiben. [5, 21]

2.6.2 Wasserdampfdiffusion

Wie bereits unter Kapitel 1.3 beschrieben, bewirkt der Einfluss von Wasser auf Lehm, dass dieser seine Festigkeit verliert, „weich“ und somit plastisch verformbar wird. Die Einwirkung von Wasserdampf wirkt sich hingegen positiv aus. Lehm nimmt den Wasserdampf auf ohne „weich“ zu werden und zu quellen und gibt sie bei zu trockener Umgebungsluft wieder ab [5]. Auf den daraus resultierenden positiven Effekt eines gesunden Raumklimas wird ausführlich unter Kapitel 2.4 eingegangen.

Zwischen Innen- und Außenräumen besteht ein bestimmtes Dampfdruckgefälle, welches in unseren klimatischen Kreisen bei beheizten Räumen von innen nach außen verläuft. Als Diffusion wird jener Vorgang bezeichnet, bei dem sich der in der Luft enthaltene Wasserdampf durch das Dampfdruckgefälle nach den Gesetzen des Druckausgleichs einen Weg durch das trennende Bauteil sucht. Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ , deren Wert von der Rohdichte, der Porenstruktur und der Temperatur eines bestimmten Materials abhängt, gibt den Widerstand jenes Materials gegen die Diffusion des in der Luft enthaltenen Wasserdampfes an. Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ ist ein Verhältniswert und vergleicht die Diffusionsdichte des Wasserdampfstroms in einem Baustoff mit jener in einer Luftschicht von äquivalenter Dicke s_d . [1, 5]

Aus der Multiplikation der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ mit der Schichtdicke s des Bauteils ergibt sich der Wasserdampfdiffusionswiderstand, der als diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d [m] angegeben wird. Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl von ruhender Luft beträgt 1. Ein Bauteil mit $s_d = 10$ m entspricht somit einem Wasserdampfdiffusionswiderstand einer Luftschicht von 10 m. Allgemein gilt, dass bei zunehmender Rohdichte und gleichzeitigem

abnehmenden Porenraum der μ -Wert größer und der Baustoff gleichhin dampfdichter wird. Im Vergleich zu anderen Baustoffen weisen Lehmprodukte niedrige μ -Werte und somit eine hohe Diffusionsfähigkeit auf, was zur Folge hat, dass sich die jeweilige Gleichgewichtsfeuchte, wie im Kapitel 2.6.3 beschrieben, schnell wieder einstellt. [1, 5]

Minke [5] beschreibt in seinem Handbuch Lehmbau einige vom Forschungslabor für Experimentelles Bauen (FEB) im Nassbereichsverfahren nach DIN 52615 ermittelte μ -Werte für unterschiedliche Lehmsorten, die in der nachfolgenden Abbildung 2.3 angeführt sind.

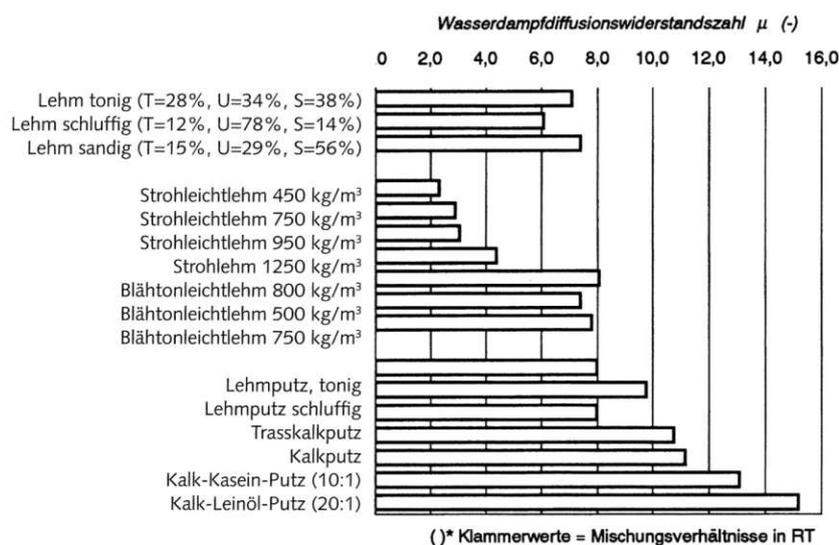


Abb. 2.3: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen verschiedener Lehmbaustoffe, [5]

Die Untersuchungsergebnisse von Massivlehm stellten sich dabei wie folgt dar: Die μ -Werte schluffiger Lehme liegen etwa um 20 % niedriger als die μ -Werte stark sandiger und stark toniger Lehme. Das Ergebnis für Blähtonleichtlehm der Rohdichte 750 kg/m³ weist einen etwa 2,5 mal so hohen μ -Wert wie Strohleichtlehm der gleichen Rohdichte auf. [5]

Aus der nachstehenden Tabelle 2.2 kann die Größenordnung der Wasserdampfdiffusionswiderstände von Lehmbaustoffen im Vergleich zu anderen Baustoffen abgelesen werden.

Tab. 2.2: Auszug von Wasserdampfdiffusionswiderständen versch. Baustoffe im Vergleich, [1]

Baustoff	Bereich von μ
Mauerwerk aus Ziegeln	5 – 10
Mauerwerk aus Klinker	50 – 100
Normalbeton	70 – 150
Lehmbaustoffe	5 – 10
Zementputz	50 – 100
Kalk-Zement-Putz	10 – 20
Holz trocken	100 – 500
Holz nass	20 – 80
Bitumenpappe unbesandet	2.000 – 20.000
Kunststoffolie	10.000 – 100.000
Alufolie ≥ 125 g/m ²	praktisch dampfdicht

2.6.3 Sorptionsverhalten

Sorption bezeichnet als Überbegriff die Aufnahme von gasförmigen oder gelösten Stoffen durch einen anderen festen oder flüssigen Stoff. Unterschieden wird zwischen Adsorption, die die Anreicherung von Stoffen an der Oberfläche eines Festkörpers bezeichnet, und der Absorption, bei der die Stoffe in das Innere des absorbierenden Stoffes eindringen. Im Vergleich dazu wird die Abgabe von Feuchtigkeit bei Abnahme der relativen Luftfeuchte als Desorption bezeichnet. [29]

Die gegenständliche Arbeit untersucht das Ab- und Adsorptionsvermögen von Lehmkörpern mit unterschiedlichen Zusammensetzungen. Wenn in der Folge von Sorption gesprochen wird, so ist die Aufnahme und Abgabe von Wasserdampf gemeint.

In Baustoffen bewirken Sorptionsvorgänge das Einstellen einer bestimmten relativen Feuchte, der sogenannten Gleichgewichtsfeuchte. Unter Gleichgewichtsfeuchte w_c ist der Feuchtegehalt in einem Baumaterial zu verstehen, der sich nach längerer Lagerung in einer Umgebung bei konstanter Luftfeuchte und konstanter Temperatur einstellt. Die im Baustoff vorhandene Wassermenge wird als massebezogener Wassergehalt U_m in Prozent angegeben und berechnet sich wie folgt [5]:

$$U_m = \frac{\text{Masse des Wassers}}{\text{Masse des trockenen Baustoffs}} \quad (2.1)$$

Das Sorptionsverhalten von Materialien kann graphisch in Sorptionsisothermen dargestellt werden. Sorptionsisotherme beschreiben den Gleichgewichtszustand von Baustoffen in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte bei konstanter Temperatur. Die Abbildung 2.4 zeigt vom FEB ermittelte Sorptionsisotherme von Massiv- und Leichtlehm.

Der Darstellung kann entnommen werden, dass die Gleichgewichtsfeuchten w_c von Lehmen ohne Zuschlagstoffe in einem Bereich von ca. 0,6 bis 3 % liegen, wobei sich die Gleichgewichtsfeuchte von 0,6 % bei einer relativen Luftfeuchte von 20 % einstellt. Die Gleichgewichtsfeuchte von Bentonitpulver, dessen Hauptbestandteil Montmorillonit ist, beträgt bei einer relativen Luftfeuchte von 50 % 13 %, bei Kaolinit beträgt sie hingegen nur 0,7 %. Roggenstroh in loser Form weist bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 80 % eine Gleichgewichtsfeuchte von 18 % auf. Bei Strohleichtlehm zeigt sich, dass mit zunehmendem Anteil an Stroh die Rohdichten sinken und zugleich die Gleichgewichtsfeuchten steigen. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass sich die Gleichgewichtsfeuchte beim Strohleichtlehm 450 bei einer relativen Luftfeuchte von 80 % im Vergleich zu sandigem bzw. tonigem Lehm verdoppelt. [5]

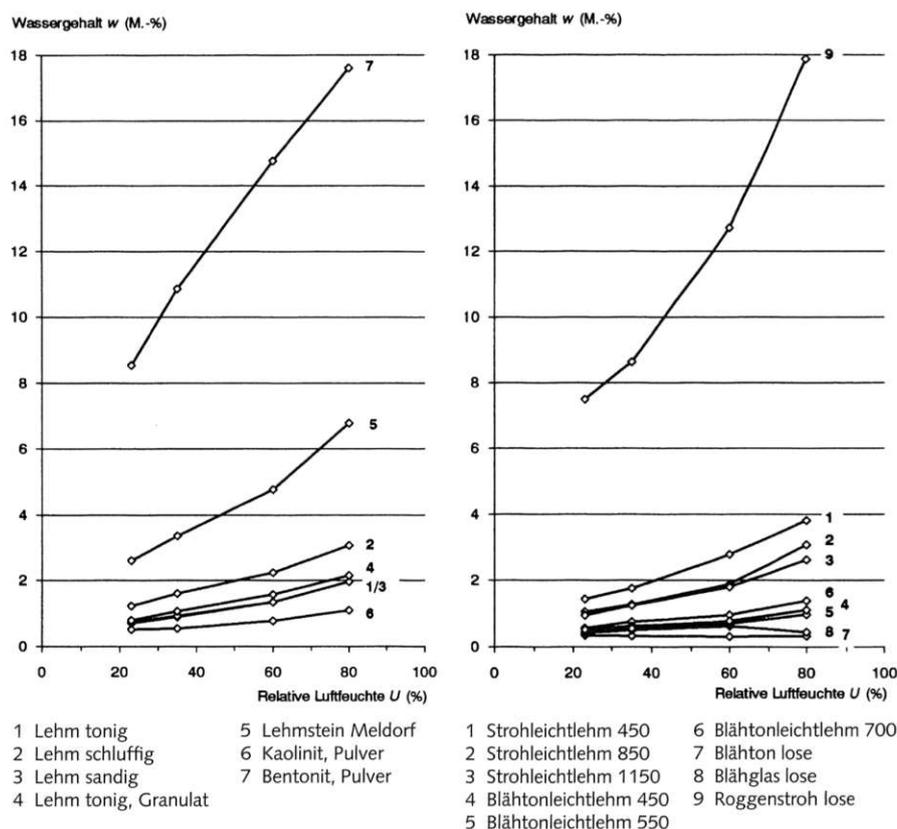


Abb. 2.4: Sorptionsisotherme: Wassergehalt von Lehmen, Tonen und Zuschlagstoffen in Abhängigkeit von der Luftfeuchte, [5]

Im Allgemeinen liegt die Gleichgewichtsfeuchte von Lehmstoffen unterhalb der anderer Baustoffe. Aufgrund dessen wird Lehm zu den trockenen Baustoffen gezählt. Zurückzuführen ist dies auf den geringen Volumenanteil an Mikroporen, die an der Bindung von Wassermolekülen aus der Luft beteiligt sind. Demgegenüber stellen sich bei organischen Materialien wie Stroh, Holz bzw. Holzfasern, Zellulose etc., wie aus Abbildung 2.4 ersichtlich, aufgrund ihrer Zell- und Faserstrukturen höhere Gleichgewichtsfeuchten ein. Grundsätzlich bewirkt auch die Vermischung von Lehm mit organischen Additiven eine Erhöhung der Gleichgewichtsfeuchten, die jedoch aufgrund der Kapillarität von Lehm reduziert wird. [30, 31]

2.7 Definition und Regelwerke zur Verwendung von Lehmplatten im Trockenbau

Die Lehmbau Regeln des Dachverbands Lehm e.V. beschreiben Begrifflichkeiten, Lehmstoffe sowie Lehmteile. Die Lehmbau Regeln definieren Lehmplatten als plattenförmige Baustoffe. Lehmplatten, die eine Rohdichte von unter 1200 kg/m^3 aufweisen, können auch als Leichtlehmplatten bezeichnet werden. Als Baustoffbezeichnung ist Lehmplatte, Leichtlehmplatte oder auch die Kurzbezeichnung LP anzugeben. [6]

Nach den Lehmbau Regeln finden Lehmplatten Verwendung, indem sie vermauert oder trocken miteinander verbunden und als nichttragende Wände, Ausfachungen von Balkendecken oder

Dachschrägen sowie Deckenauflagen eingesetzt werden. Dünne Lehmplatten können zudem als Bekleidungen und im Trockenbau bzw. als Putzträgerplatten eingesetzt verwendet werden. [6]

Lehmplatten können nach verschiedenen Verfahren, wie zum Beispiel dem Einzelpressverfahren oder in der Bandproduktion, hergestellt werden. Auch eine örtliche Fertigung von Lehmplatten ist möglich. Zusätzlich wird die Einarbeitung von Bewehrungen, wie z.B. Holzstäbe, Bambus oder Schilfrohr, zur Erhöhung der Biegefestigkeit und Transportsicherheit angeführt. [6]

Auf Basis der Lehmbau Regeln wurde im Dezember 2018 eine neue Norm für Lehmbaustoffe erarbeitet, die DIN 18948:2018-12, die den Anwendungsbereich von Lehmplatten (LP) in Bauwerken auf den Spritzwasserbereich von häuslichen Küchen und Bädern ausweitet, sofern ein entsprechend der Beanspruchung notwendiger Feuchteschutz in Form von Abdichtungen sicher gewährleistet ist. Die Verwendung von Lehmplatten in Räumen mit dauerhaft stark erhöhter Luftfeuchte, wie Schwimmbäder oder gewerbliche Küchen, ist nicht vorgesehen. [26]

Die Norm differenziert zwischen zwei Lehmplatten-Typen, nämlich

- Typ A – Lehmplatten für Beplankungen und
- Typ B – Lehmplatten für Bekleidungen,

wobei der jeweilige Typ vom Hersteller zu deklarieren ist. Der Einsatz von Lehmplatten zur Aussteifung von Bauteilen ist nicht erlaubt. Im Hinblick darauf kann eine Prüfung des Elastizitätsmoduls sowie der Scherfestigkeit somit entfallen. [26]

2.7.1 Ausgangsstoffe und Herstellung

Die Lehmplattennorm [26] sieht zur Herstellung einer der Norm entsprechenden Lehmplatte die Verwendung von Lehmbaustoff und gegebenenfalls Bewehrung vor. Der Lehmbaustoff ist aus Baulehm und gegebenenfalls unter Beimengung von Zusatzstoffen und Zusatzmitteln durch homogene Vermengung herzustellen. Alle zugefügten Stoffe müssen vollständig deklariert werden. Die Norm sieht die Verwendung folgender Zusatzstoffe vor:

- natürliche Gesteinskörnung nach DIN EN 13139,
- Ziegmehl 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).

Zusatzmittel, deren stabilisierenden Eigenschaften durch Wasserzugabe reversibel sind, können dem Lehmbaustoff zur Herstellung von Lehmplatten bis zu einem Masseprozent beigemischt werden. Verwendet werden dürfen Polysaccharide, wie zum Beispiel Methylzellulose oder Stärke. Ebenso ist die Zugabe von anorganischen Pigmenten nach DIN EN 12878 oder pflanzlichen Farbstoffen zulässig. Als Bewehrung, die ebenso vollständig zu deklarieren ist, führt die Norm Stäbe, Matten, Gitter oder Gewebe an. Die Herstellung der Lehmplatten erfolgt streichend, stampfend oder pressend und hat Einfluss auf die Eigenschaften der Lehmplatten.

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

Die Herstellung von gebrauchstauglichen Bauteilen geht Hand in Hand mit dem Anspruch an die Abdeckung unterschiedlichster Anwendungsbereiche. Die DIN 18948:2018-12 [26] legt diesbezüglich Mindestanforderungen fest, durch deren Einhaltung Handhabung und Verwendbarkeit der Lehmplatten garantiert werden sollen. Da sich die Forschungsfrage der gegenständlichen Arbeit auf die Untersuchung bestimmter bauphysikalischer Eigenschaften von Lehmstoffen für einen Einsatz im Trockenbau (wie Lehm- und Trockenputzplatten) bezieht, wird ein Vergleich zwischen der Prüfmethode sowie den Untersuchungsergebnissen in den Kapiteln 4 und 5 mit den nachstehend angeführten Anforderungen aufgestellt.

2.7.2.1 Form, Maße und Maßhaltigkeit

Die DIN 18948:2018-12 definiert Lehmplatten als ebene, plattenförmige, rechteckige Bauprodukte, die auch gelocht sein können. Längs- und Querränder können mit Nuten und Federn ausgestattet sein, die Seitenflächen mit einer Oberflächenprofilierung. Die Längen- und Breitenabmessung von Lehmplatten hat ein Vielfaches von 12,5 cm zu sein und die Plattendicke darf maximal $\frac{1}{5}$ der Breite betragen. Produktionsbedingte Abweichungen im Hinblick auf Form und Maße sind insoweit zulässig, als die Zuordnung in eine der in der Norm festgelegten Maßhaltigkeitsklassen möglich ist. [26]

2.7.2.2 Rohdichte

Die DIN 18948:2018-12 sieht in Kapitel 6.3, Tabelle 2 die Zuordnung von Lehmplatten in Rohdichteklassen vor. Lehmplatten mit einer Rohdichteklasse von 0,6 bis 1,2 können herstellerseitig als Leichtlehmplatten bezeichnet werden. Die Einteilung der Rohdichteklassen ist in der folgenden Abbildung dargestellt. [26]

Tabelle 2 — Rohdichteklassen von Lehmplatten

	1	2
	Rohdichteklasse	Mittelwert der Trockenrohichte 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. 2.5: Rohdichteklassen nach DIN 18948:2018-12, [26]

2.7.2.3 Bauphysikalische Eigenschaften von Lehmplatten nach DIN 18948:2018-12

Nachstehend werden die in der Lehmplattennorm angeführten bauphysikalischen Eigenschaften erläutert.

Wasserdampfdiffusionswiderstand

Die DIN 18948:2018-12 verweist zur Prüfung des Wasserdampfdiffusionswiderstands auf die Anwendung der DIN EN ISO 12572. Vereinfachend kann die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl auch durch Einstufung nach den Lehmbau Regeln 2009, Tabelle 5-5 [6] bestimmt werden. [26]

Die Prüfung des Wasserdampfdiffusionswiderstands ist in Kapitel 4.3 ausgeführt.

Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit ist nach DIN EN 12664 durch Messung zu bestimmen und deklarieren. Alternativ und vereinfachend kann sie auch auf Basis der auf volle 10 kg/m^3 gerundeten Trockenrohddichte durch Einstufung nach DIN 4108-4 oder nach den Lehmbau Regeln 2009, Tabelle 5-3 [6] bestimmt werden. [26]

Die dazu durchgeführte Versuchsreihe wird in Kapitel 4.4 beschrieben.

Feuchtetoleranz, Wärmespeicherkapazität, Brandverhalten

Bei Lehmplatten handelt es sich um nicht feuchtebeständige Bauteile. Je nach Prüfergebnis erfolgt eine Einteilung in Feuchtetoleranzklassen (FTK), wobei wenigstens die Mindestanforderungen der FTK III zu erreichen sind. Unabhängig von den Feuchtetoleranzklassen dürfen im Rahmen der Prüfung augenscheinlich keine Rissbildungen oder bleibende Quellverformungen erkennbar sein. [26]

Die Bestimmung der Wärmespeicherkapazität erfolgt nach DIN 18948:2018-12 anhand der auf volle 10 kg/m^3 aufgerundete Trockenrohddichte durch Einstufung nach den Lehmbau Regeln 2009, Tabelle 5-4 [6]. Die Zulässigkeit von anderen, dem Stand der Technik entsprechenden Verfahren wird explizit festgehalten. [26]

Die Überprüfung des Brandverhaltens von Lehmplatten hat nach DIN 4102-1 oder DIN EN 13501-1 zu erfolgen. Eine Prüfung entfällt bei Lehmplatten ohne organische Zusatzstoffe, organische Zusatzmittel oder organische Bewehrung bzw. bei einem maximalen Masseanteil von 1,0 % an homogen verteilten organischen Bestandteilen. Nach DIN 4102-4 erfolgt eine automatische Einstufung dieser Lehmplatten in die Baustoffklasse A1. [26]

Die Feuchtetoleranz, die Wärmespeicherkapazität und das Brandverhalten von Lehmplatten wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht überprüft und sind gegebenenfalls durch weiterführende Untersuchungen zu ermitteln.

Wasserdampfadsorption

Im Anhang A der Lehmplattennorm [26] sind einige zusätzliche Prüfungen von Lehmplatten vorgesehen. Punkt A.2 regelt die Überprüfung des Adsorptionsverhaltens von Wasserdampf. Demnach ist die Wasserdampfadsorption in Wasserdampfadsorptionsklassen einzuteilen. Lehmplatten sollen normkonform mindestens die Anforderungen der Wasserdampfadsorptionsklasse WS I erfüllen.

Die detaillierten Ausführungen zum Versuchsablauf nach Anhang A Punkt A.2 sind dem Kapitel 4.5.1 zu entnehmen.

2.7.3 Notwendigkeit ergänzender Regelwerke

Festzuhalten ist, dass in Österreich derzeit noch keine eigene Lehmplattennorm existiert und deshalb die DIN 18948:2018-12 heranzuziehen ist. Die deutsche Lehmplattennorm verweist bei der Prüfung der einzelnen bauphysikalischen und mechanischen Eigenschaften, wie bereits bei den obenstehenden Ausführungen ersichtlich, immer wieder auf weiterführende spezifische deutsche Normen. Dem Autor ist bewusst, dass im Hinblick auf die Überprüfung der bauphysikalischen Eigenschaften jeweils ein österreichisches Pendant vorliegt. Aufgrund der Vorreiterstellung von Deutschland in der gegenständlichen Thematik wurde im Rahmen der Versuchsreihe, nach Abgleich der jeweiligen österreichischen und deutschen Fassungen, auf die Verwendung der deutschen Normen zurückgegriffen. Diese Vorgehensweise führt im Hinblick auf die Versuchsausführung und Ergebnisauswertung zu gleichen Ergebnissen.

Nachdem die gegenständliche Arbeit das Sorptionsverhalten im Allgemeinen untersucht und dabei eine Differenzierung der Versuche in Absorptions- und Adsorptionsverhalten vorgenommen wird, wird zusätzlich zur Lehmplattennorm zur Bestimmung der Absorption auf die DIN EN ISO 12571 [32] zurückgegriffen, welche das wärme- und feuchtetechnische Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten (hygroskopische Sorptionseigenschaften) bestimmt. Die Norm nimmt in ihrer Fassung aus dem Jahr 2013 eine Änderung des Begriffs „Absorption“ in „Sorption“ vor, was in dieser Arbeit zur Förderung der Übersichtlichkeit nicht berücksichtigt wird und weiterhin die Begrifflichkeiten „Absorption“ und „Adsorption“ verwendet werden.

Ausführungen zur Überprüfung des Absorptionsverhaltens sind Kapitel 4.5.2 zu entnehmen.

3 Materialauswahl – Lehm, Additive und Beschichtungen

Vor dem Hintergrund der Grundlagenforschung zu den bauphysikalischen Eigenschaften von Lehmbaustoffen für einen Einsatz im Trockenbau wurde eine umfassende labortechnische Versuchsreihe durchgeführt. Ausgehend von eigens hergestellten Lehmprobekörpern, wie sie in Kapitel 4.1 beschrieben sind, wurden dem reinen Lehmprobekörper (Referenzprobekörper) diverse natürliche Additive beigefügt bzw. Beschichtungen aufgebracht. Die gewählten Additive und Beschichtungen basieren einerseits auf der Literaturrecherche und andererseits auf ökologischen, bauphysikalischen sowie mechanischen Überlegungen. Letztgenannte finden sich ausführlich beschrieben in der Arbeit von Philipp Ender (1).

Bevor die in der gegenständlichen Versuchsreihe konkret verwendeten Materialien – Lehm-mischung, Additive und Beschichtungen – erläutert werden, wird zum besseren Verständnis die Thematik von Zuschlägen und Zusätzen und deren bauphysikalischen und mechanischen Auswirkungen in Verbindung mit reinem Baulehm allgemein beschrieben.

3.1 Die Verwendung von Zuschlägen und Zusätzen

Baulehm in seiner reinen Form kann nur in den seltensten Fällen ohne Beimengung von Additiven als Baustoff eingesetzt werden. Zur Herstellung von Lehmbaustoffen werden dem Baulehm daher Zusätze und Zuschläge hinzugefügt, wobei Art und Menge der Beimengungen jeweils Einfluss auf die mechanischen und bauphysikalischen Eigenschaften sowie das Erscheinungsbild haben. Die Verwendung von Zusätzen und Zuschlägen dient der Optimierung und Modifizierung der bauphysikalischen und mechanischen Eigenschaften von Baulehm. Zuschläge, die mineralischen oder pflanzlichen Ursprungs sein können, sind Stoffe, die durch den Lehm gebunden bzw. von ihm eingehüllt werden. Zuschläge unterteilen sich wiederum in mineralische Zuschläge, mineralische Leichtzuschläge und pflanzliche Zuschläge. [19]

3.1.1 Zuschläge

Unter die **mineralischen Zuschläge** sind natürliche Gesteinskörnungen (z.B. Kies, Splitt und Sand) sowie zerkleinerte Ziegel zu subsumieren. Derartige „grobkörnige“ Zuschläge werden dem Lehm zur Magerung zugegeben. Lehm muss gemagert werden, wenn er zu viel Tonanteil enthält, d.h. er zu „fett“ ist. Mit sinkendem Anteil an Feinpartikeln aus der Schluff- und Tonfraktion nimmt die innere Oberfläche (spezifische Oberfläche) der Lehmmischung ab, die es im Zuge des Anmischens mit Wasser (Plastifizierung) zu umhüllen gilt. Magern bewirkt sohin die Abnahme des Tonanteils im Lehm und somit auch des Wasseranteils, der dem Lehm im Zuge der Verarbeitung zugesetzt werden muss. Damit einhergehend werden das Trockenschwindmaß und die Rissbildung beim Trocknungsvorgang vermindert. Neben der Verringerung der Trockenschwindrissbildung wird durch die Magerung auch die Wärmedämmfähigkeit erhöht. Lehmbaustoffe erreichen ihre größte Festigkeit, wenn die einzelnen Kornfraktionen in einem möglichst idealen Verhältnis

zueinander stehen. Werden mineralische Zuschläge in einem zu großen Maße beigelegt, wird der Bindemittelanteil, d.h. der Tonanteil, zu gering und die Festigkeit sinkt. Das Verhältnis der Kornfraktionen wird durch die bereits im Kapitel 1.2 beschriebenen Sieblinien abgebildet. Durch die Zugabe von Sanden verbessert sich die Verarbeitbarkeit von zähklebrigem, bindekräftigem Lehm. Die Herabsetzung der Wasserempfindlichkeit und Frostempfindlichkeit resultiert ebenso aus einer optimalen Zusammensetzung (Verhältnis der Kornfraktionen) des Lehms. Bestehen Lehmstoffe ausschließlich aus feinem Korn, werden diese bei Frost eher aufgesprengt als grobkörnig zusammengesetzte Lehmstoffe. Die Rohdichte lässt sich durch die Art der Steinzuschläge beeinflussen und nimmt mit der Zugabe von dichtem, wenig porösem Gestein zu. [5, 19]

Mineralische Leichtzuschläge, nämlich geblähte Gesteine wie Blähperlit und Naturbims und geblähte mineralische Stoffe wie Blähton und Blähglas, werden dem Lehm vordergründig zur Reduktion der Rohdichte beigelegt. Daneben reduzieren mineralische Leichtzuschläge die Wärmeleitfähigkeit. Die Verarbeitbarkeit von Lehm wird durch die Zugabe von feinen Perliten beeinflusst, da sie das Wasserrückhaltevermögen von Mörteln erhöhen. Auf die Festigkeit von Lehmstoffen wirkt sich die Befügung mineralischer Leichtzuschläge hingegen negativ aus. [19]

Pflanzliche Zuschläge, bestehend aus Pflanzenteilen und -fasern wie Stroh und Flachs werden ebenso wie mineralische Zuschläge zur Magerung eingesetzt und wirken sich positiv auf die Trockenschwindung, die Verarbeitbarkeit, das Wasserrückhaltevermögen, die Festigkeit und die Wasserempfindlichkeit aus. Auf die Trockenschwindung wirken sich pflanzliche Zuschläge dahingehend aus, dass diese durch die Aufnahme von Zugkräften herabgesetzt wird. Zusätzlich wird durch die Zugabe von Pflanzenteilen und -fasern die Verarbeitbarkeit verbessert. Feine Fasern erhöhen zudem das Wasserrückhaltevermögen. Die Pflanzenfasern erzeugen im Lehm einen Verbund mit den mineralischen Bestandteilen, aus dem ein stabiles Gesamtgefüge resultiert, was sich positiv auf dessen Festigkeit auswirkt. Neben Glasfaserarmierungen erhalten Trockenbauplatten ihre Festigkeit größtenteils durch Pflanzenfaserbewehrungen. Die Zugabe von pflanzlichen Zuschlägen hat ebenso eine Herabsetzung der Wasserempfindlichkeit zur Folge, was bedeutet, dass sich mit Pflanzenfasern versetzte Lehmsteine im Wasser langsamer auflösen als Lehmsteine, die ausschließlich mit mineralischen Zuschlägen versetzt sind. Im Verhältnis zu ausschließlich feinkörniger Lehmzusammensetzung, die bei Frost aufgesprengt werden kann, hat die Zugabe von pflanzlichen, weichen Fasern „puffernde“ Wirkung, weshalb die Frostempfindlichkeit gemindert wird. Durch die Zugabe von Pflanzenfasern verringern sich sowohl die Rohdichte als auch die Wärmeleitfähigkeit, was u.a. bei der Herstellung von Leichtlehmsteinen erwünscht ist. Sowohl Magerung als auch Bewehrung ermöglichen Gemische mit einem hohen Anteil an sorptionsfähigen Tonmineralen, wodurch die Zugabe pflanzlicher Zuschläge die Sorptionsfähigkeit von Lehmstoffen indirekt beeinflussen kann. Pflanzenfasern wirken sich auf die Raumakustik insofern aus, als durch die weiche Fläche weniger Schall reflektiert wird, woraus eine dämpfende Wirkung resultiert. Auch der Brandschutz wird durch die Zugabe von Pflanzenfasern positiv beeinflusst, da das durch Pflanzenfasern gefestigtere Gefüge eine höhere mechanische Belastbarkeit aufweist. Die herabgesetzte Wärmeleitfähigkeit wirkt sich im Brandfall zusätzlich positiv aus. Die Mikroorganismen im Lehm sowie in dessen mineralischen als auch pflanzlichen Zuschlägen haben negative Auswirkungen auf die Schimmelbildung in Lehmstoffen. In der Regel werden traditionell hergestellte Lehmstoffe erdfeucht gemischt und gelagert, wodurch das Schimmelpilzrisiko deutlich erhöht ist. Durch die Trocknung der einzelnen Bestandteile vor dem Mischen kann dieses Risiko bzw. die Konzentration an Schimmelpilzen und Bakterien im Lehmstoff erheblich gesenkt werden. Werden Lehmstoffe feucht verbaut, so ist die Schimmelfähigkeit von pflanzlichen Zuschlägen, allerdings unter Berücksichtigung von Trocknungsdauer, Luftfeuchte und Temperatur, tendenziell erhöht. Auf das Erscheinungsbild wirkt sich sowohl die Zugabe von

farbigen Gesteinskörnungen als auch von Pflanzenfasern, durch deren Zugabe verschiedenste Strukturputzoberflächen erzielt werden, aus. [19]

Holzzuschläge, darunter ist zerkleinertes, unbehandeltes Holz wie Holzfasern, Hobel- oder Sägespäne, Sägemehl oder Hackschnitzel zu verstehen, werden dem Lehm ebenfalls zur Magerung und Erhöhung der Festigkeit beigemischt. Die Wasser- und Frostempfindlichkeit wird ebenso herabgesetzt. Im Hinblick auf die Auswirkungen auf die Rohdichte und die Wärmeleitfähigkeit, die Sorptionsfähigkeit, die Raumakustik sowie den Brandschutz ist auf die obenstehenden Ausführungen zu den pflanzlichen Zuschlägen zu verweisen. [19]

3.1.2 Zusätze

Zusätze werden dem Lehm aufgrund ihrer Auswirkungen auf das Erhärtungsverhalten nur in einem geringen Ausmaß beigemischt. Als Zusätze dienen Tonmehl, mineralische Bindemittel wie Kalk und Zement und pflanzliche Bindemittel wie Dung, Zellulose und Stärke. [19]

Lehm enthält bereits von Natur aus Ton als Bindemittel, welches durch die Zugabe von **Tonmehl** angereichert wird. Durch Tonmehlzugabe erhöht sich einerseits die Festigkeit, andererseits wird durch eine zu hohe Zugabe an Tonmehl die Trockenschwindung negativ beeinflusst, nämlich erhöht. Dreischichttonminerale steigern zudem die Sorptionsfähigkeit von Lehmbaustoffen. Werden Tonmehle in unterschiedlichen Farbnuancen zugefügt, so wirkt sich dies auf das Erscheinungsbild von Farbputzen und Stampflehm aus. [19]

Detaillierte Ausführungen zu Ton als Bindemittel finden sich im Kapitel 1.3 der gegenständlichen Arbeit.

Zur Erhöhung der Festigkeit und Reduktion der Feuchteempfindlichkeit werden Lehmbaustoffe mit **mineralischen Bindemitteln** versetzt. Im Gegensatz zu Ton, dessen Aushärtung auf natürlichem Weg erfolgt und durch die Versetzung mit Wasser wieder rückgängig gemacht werden kann, erhärten mineralische Zusätze wie Kalk und Zement durch chemischen Vorgang. Von stabilisierten Lehmbaustoffen spricht man, wenn die Festigkeit und Wasserlöslichkeit von Lehmbaustoffen durch andere Bindemittel oder die Zugabe chemisch wirksamer Stoffe verändert wird. [19]

Die Verwendung von Kuhdung als pflanzlicher Zusatz reicht weit in die Geschichte des Lehmbaus zurück. Dung verbessert die Verarbeitungsfähigkeit und die Festigkeit von Lehmbaustoffen und hat äußerst positive Auswirkungen auf die Feuchteempfindlichkeit. Zellulose und Stärke sind **pflanzliche Bindemittel**, die eigens produziert werden, weshalb mit ihnen versetzte Lehmbaustoffe ebenso als stabilisierte Lehmbaustoffe bezeichnet werden. Kleister bilden sich aus pflanzlichen Fasern im Wasser und anderen Flüssigkeiten. Sie bestehen aus langen natürlichen Polymerketten, erhöhen die Festigkeit und reduzieren die Feuchteempfindlichkeit. [19]

3.2 Materialauswahl und Erwartungshaltung im Hinblick auf bauphysikalische Eigenschaften

Die folgenden Ausführungen liefern einen Überblick über die im Zusammenhang mit den durchgeführten Versuchsreihen verwendeten Materialien und beschreiben die erwarteten Auswirkungen im Hinblick auf die bauphysikalischen Eigenschaften.

3.2.1 Lehm

Als Ausgangsmaterial dient S&L Lehmfeinputz 0/2 der Andreas Zöchbauer GmbH, der direkt vor Ort im Sand & Lehm Werk Winzing in Niederösterreich abgebaut und für seine Einsatzbereiche aufbereitet wird. Zusammengesetzt aus Lehm, Ton und Quarzsanden, mit einer Korngröße von max. 2 mm, ist er zu 100% naturbelassen.

3.2.2 Flachsgewebe

Das Flachsgewebe wurde ebenso von der Andreas Zöchbauer GmbH bezogen. Als spezielle, ökologische Armierung wurde es in Form von Gewebematten zur Bewehrung von Lehmputzen entwickelt. Das Drehergewebe aus Flachsgarn erhält seine Stabilität durch die Verstärkung mit Naturstärke. Seine Maschenweite beträgt 5×5 mm und sein Flächengewicht 48 g/m^2 . [33]

Die Verwendung der Flachsgewebematte liefert verwertbare Ergebnisse im Rahmen der mechanischen Prüfung (siehe Kapitel 5.3.2 der Diplomarbeit von Philipp Ender (1)). Hingegen sind die zu erwartenden Ergebnisse bzw. die Überprüfungen der bauphysikalischen Eigenschaften ohne Aussagekraft, da die Gewebematte keinerlei Auswirkungen im Vergleich zu den Referenzproben hervorbringt. Aus diesem Grund wurden die Probekörper mit Flachsgewebe nicht in die gegenständliche Versuchsreihe aufgenommen, sondern nur an dieser Stelle der Vollständigkeit halber angeführt.

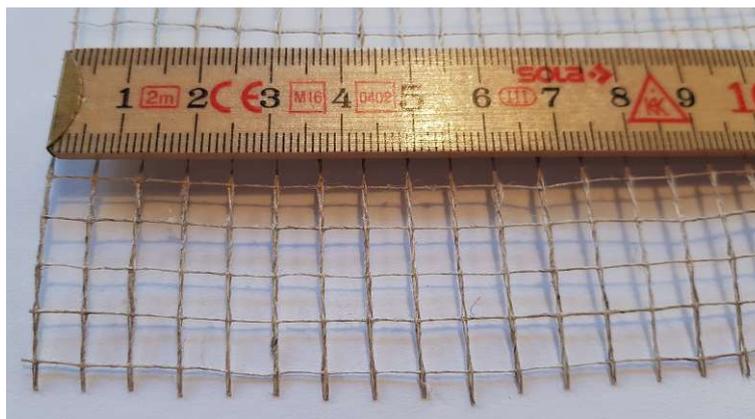


Abb. 3.1: Ausgangsmaterial Flachsgewebematte

3.2.3 Filz

Verwendet wird eine Filzeinlage aus reiner Schafschurwolle vom Werdenfelser Bergschaf mit einer Materialstärke von 5 mm und einem spezifischen Gewicht von 960 g/m^2 (ungelocht und

unkomprimiert). Eine der wesentlichsten Materialeigenschaften von Schafwolle als Naturfaser stellt deren außergewöhnliche Eigenschaft als Wasserspeicher dar. Obwohl die Wolloberfläche hydrophobe Eigenschaften besitzt, können Wollfasern im Faserinneren bis zu 33 % ihres Eigengewichtes an Feuchtigkeit aufnehmen, über einen längeren Zeitraum speichern und gleichmäßig wieder an die Umgebung abgeben. [34, 35]

Zudem ist Schafwolle biologisch abbaubar. Diese Eigenschaften von Filz sind deshalb interessant, da Lehm in seinem Rohzustand bereits eine sehr gute feuchteregulierende Wirkung hat und davon auszugehen ist, dass diese durch die Kombination beider Materialien noch verstärkt werden kann.



Abb. 3.2: Ausgangsmaterial Filz

3.2.4 Kasein

Die Kaseingrundierung der Kreidezeit Naturfarben GmbH setzt sich zusammen aus Kasein und Soda. Sie liegt in Pulverform vor und ist mit Wasser anzurühren. Der dadurch entstehende Eiweißleim wirkt als Bindemittel für den im Lehm enthaltenen Sand und Schluff. Sie hat keinen reduzierenden Einfluss auf die Dampfaufnahme von Putzen (s_d -Wert $< 0,01$ m) und stellt somit eine ideale Grundierung, insbesondere für Lehmputze, dar. Darüber hinaus dient sie der transparenten Verfestigung von Lehmputzen und ist hoch diffusionsfähig. [36]

Als Milcheiweiß ist Kasein frei von Konservierungsstoffen, kompostier- und somit biologisch abbaubar. Durch die Zugabe von Kasein in die Lehmmischung mit unterschiedlichen Masseverhältnissen sollen in erster Linie die mechanischen Eigenschaften erhöht und zugleich die positiven Lehmeigenschaften auf bauphysikalischer Ebene nicht beeinträchtigt werden.

3.2.5 Kalk gelöscht

Kalk ist ein Produkt mineralischer Herkunft und weltweit verbreitet. Beim Sumpfkalk der Baumit GmbH handelt es sich um einen pastösen (d.h. teigartigen), gelöschten Kalkteig CL 90-S PL gemäß ÖNORM EN 459-1, der laut Hersteller zur Herstellung von Mauer- und Putzmörtel sowie Anstrichen geeignet ist. Das verwendete Gebinde besteht aus Weißkalkhydrat (= Calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$) in Wasser mit einem Festkörpergehalt von 40%. Die Teigdichte des abgelagerten gelöschten Weißkalks beträgt ca. 1300 kg/m^3 . [37]

Kalk bzw. Kalkputze weisen, ähnlich wie Lehm, eine gute feuchteregulierende Wirkung auf, weshalb davon auszugehen ist, dass die Diffusions- und Sorptionseigenschaften verstärkt werden.

3.2.6 Holzfasern

Verwendet wird die Holzfaser-Einblasdämmung STEICO_{zell} der Firma STEICO SE. Neben den reinen, biologisch abbaubaren, Holzfasern wurde das Produkt mit Ammoniumsulfat als Flammschutzmittel versetzt. Trotzdem ist es in Deutschland lt. Abfallschlüssel der Europäischen Abfallverzeichnisverordnung in die Kategorie EAK/AVV 170201 eingeteilt, was eine Entsorgung wie bei Holz und Holzwerkstoffen erlaubt. Gemäß DIN 18948:2018-12 ist die Verwendung von chemisch behandelten Additiven nicht zulässig. Dieser Umstand war dem Autor im Stadium der Versuchsvorbereitungen bewusst. Die Produktion von Holzfasern ohne Zusatz eines Flammschutzmittels war jedoch in der Kürze der Zeit nicht möglich. Allerdings wurde die Möglichkeit der Produktion von flammenschutzmittelfreier Holzfaser durch einen Vertreter der Firma STEICO SE für die Zukunft in Aussicht gestellt. Aufgrund der Art und Weise der Durchmischung der Holzfasern mit dem Ammoniumsulfat hat sich der Autor trotzdem für die Durchführung der geplanten Versuche entschieden.

Die Faserlänge variiert zwischen einigen wenigen Millimetern bis hin zu ca. 1 cm. Der Bemessungswert für die Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK] beträgt 0,039 bei einer spezifischen Wärmekapazität von 2100 J/kgK. [38]

Es wird erwartet, dass durch die Zumischung von Holzfasern die Wärmeleitfähigkeit sinkt, was zugleich die Dämmwirkung erhöht. Hinsichtlich des Sorptionsverhaltens wird davon ausgegangen, dass sich durch die guten hygroskopischen Eigenschaften von Holz bzw. Holzfasernstoffen ebenso eine Erhöhung einstellen wird.



Abb. 3.3: Ausgangsmaterial Holzfasern

3.2.7 Kaliwasserglas

Als Beschichtung dient Kaliwasserglas der Kreidezeit Naturfarben GmbH. Dieses besteht aus Wasser und Kaliumsilikat. Ganz allgemein bezeichnet Wasserglas aus einer Schmelze erstarrte, wasserlösliche Alkalisilikate. Bei der Herstellung von Kaliwasserglas werden reiner Quarzsand und Kaliumcarbonat unter CO_2 -Entwicklung geschmolzen und in abgekühltem Zustand zu Pulver gemahlen [39]. Vor der Verarbeitung ist das Pulver der Kreidezeit Naturfarben GmbH mit Wasser mindestens im Verhältnis 1:1 zu verdünnen. Kaliwasserglas hat ein gutes Benetzungs- und Eindringvermögen, ist diffusionsfähig, wasser- und säurebeständig, nicht brennbar, aber stark alkalisch (pH 12). [40]

Als anorganischer Stoff ist Kaliwasserglas nicht biologisch abbaubar. Trotzdem ist eine Entsorgung über den Hausmüll zulässig. Der Einsatz von Kaliwasserglas dient als Vergleichswert zu der mit Carnaubawachs durchgeführten Versuchsreihe. Durch die Beschichtung mit Kaliwasserglas soll die Lehmoberfläche einerseits stabilisiert sowie abriebfest gemacht werden und andererseits gleichzeitig gegen Spritzwasser geschützt werden, um den Einsatzbereich von Lehmstoffen zu erweitern, ohne dass es zu wesentlichen Beeinträchtigungen des Diffusionswiderstandes sowie des Sorptionsverhaltens kommt.

3.2.8 Carnaubawachs

Verwendet wird eine Carnaubawachs-Emulsion der Kreidezeit Naturfarben GmbH. Carnaubawachs wird aus den Blättern einer brasilianischen Palmenart gewonnen. Die Emulsion setzt sich zusammen aus Wasser, Carnaubawachs, einem Emulgator auf Basis natürlicher Fettsäuren und Kaliumsorbat als Lebensmittelkonservierungsstoff. Es ist ein sehr gehaltvolles Konzentrat, das primär zur Verdünnung mit Wasser bestimmt ist. Carnaubawachs ist für Mensch und Tier gesundheitlich unbedenklich, wirkt unter anderem schmutz- und wasserabweisend, ist diffusionsfähig, antistatisch, schnelltrocknend und leicht zu verarbeiten. [41]

Die Verwendung von Carnaubawachs soll eine Alternative zu Kaliwasserglas darstellen. Carnaubawachs soll ebenso die Oberfläche von Lehmstoffen stabilisieren, zugleich wasserabweisend wirken und darüber hinaus die bauphysikalischen Eigenschaften möglichst nicht beeinträchtigen.

4 Vorgehensweise und Prüfmethodik

Die nachstehenden Ausführungen beschreiben die Herstellung der in der Versuchsreihe verwendeten Probekörper und die Findung der optimalen Mischungsverhältnisse im Rahmen von Vorversuchen sowie die Anforderungen und den Ablauf der durchzuführenden Versuche zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit, des Wasserdiffusionswiderstandes sowie des Sorptionsverhaltens anhand der geltenden Normen.

4.1 Herstellung der Probekörper

Die Herstellung der Probekörper basiert betreffend Wassergehalt, Plastizität und Konsistenz auf Werten aus der Literatur, Erfahrungswerten des betreuenden Institutes für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie (Forschungsbereich Ökologische Bautechnologien) und dem unter Kapitel 4.1.1.1 beschriebenen Kugelfalltest. Nach dem Anmischen wird die Ausgangsmasse aller Probekörper – mit und ohne Additive und Beschichtungen – für mindestens zwölf Stunden gemaukt. Das Mauken, d.h. Lagern der feuchten Masse in diesem Fall über Nacht, bewirkt eine Erhöhung der Bindekraft [5].

4.1.1 Mischungsverhältnis und Vorversuche

Als Ausgangsmaterial dient eine Mischung aus S&L Lehmfeinputz (kurz: LFP), S&L Trockenlehm-pulver gemahlen 0/2 (kurz: TLP) und Leitungswasser. Zur Herstellung der Referenzprobekörper aus reinem Lehm wird im Zuge von Vorversuchen das optimale Verhältnis zwischen Wasser und Lehmfeinputz ermittelt. Im ersten Vorversuch wird ein Wasser zu Lehm (W/L)-Verhältnis von 0,25 verwendet, wobei der Wassergehalt bereits zu Beginn hoch erscheint. Die Bestimmung der optimalen Konsistenz erfolgt iterativ, siehe Tabelle 4.1, wobei sich ein W/L-Verhältnis von 0,15 dabei als ideal erweist. Zudem werden erste Probekörper mit den jeweiligen W/L-Gehalten hergestellt und über Nacht (ca. 15 Stunden) im Klimaschrank bei 23 °C/50 % rel.LF gelagert.

Tab. 4.1: W/L-Gehalt der Vorversuche aus reinem Lehm

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 zeigt sich bei den nach Tabelle 4.1 hergestellten und über Nacht gelagerten Probekörpern, dass die Oberfläche stark absandet. Darunter ist das Ablösen feiner Gesteinskörner von der

Oberfläche aufgrund einer zu geringen Verbindung im Lehmgefüge zu verstehen, was darauf schließen lässt, dass die Lehmmischung zu mager ist bzw. gefettet werden muss. Dies bestätigt auch der Kugelfalltest nach Minke [5], detailliert erläutert im Kapitel 4.1.1.1, bei dem die Kugeln der Mischungen komplett zerstört werden und in kleine Teile („Streubruch“) zerbrechen. Um den Feinstkornanteil in der Mischung zu erhöhen, wird der Lehm durch Beimengung von Trockenlehm-pulver gefettet. Wie bereits in Kapitel 1.2 ausgeführt, erhöht sich dadurch die Bindung im Lehm und verbessert sich die Plastizität der Mischung. Durch weitere Kugelfallprüfungen kann ein optimales Verhältnis von TLP:LFP von 0,05:1,0 ermittelt werden, wobei zu erwähnen ist, dass sich der TLP-Anteil nur auf die LFP-Masse exklusive Wasser bezieht.

Die Durchmischung der Bestandteile erfolgt mit Hilfe eines elektrischen Handrührgerätes. Um eine homogene Mischung von Lehmfeinputz, Trockenlehm-pulver und Wasser zu erreichen, wird das Trockenlehm-pulver erst nach Vermengung von Wasser und Lehmfeinputz unter ständigem Rühren langsam beigemischt und weitere zehn Minuten durchgemischt. Aufgrund der Vielzahl an durchzuführenden Versuchen bzw. der Anzahl an erforderlichen Probekörpern sind mehrere Chargen anzumischen, wobei eine Charge nach dem oben erläuterten Mischungsverhältnis aus

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

besteht.

4.1.1.1 Kugelfalltest

Der Kugelfalltest ermöglicht als Handprüfverfahren eine Abschätzung der Lehmzusammensetzung bzw. Bindekraft des Lehms ohne den Einsatz von Geräten. Der Lehm soll in seiner Konsistenz so trocken sein, dass das Formen zu einer Kugel von etwa 4 cm Durchmesser gerade noch möglich ist. Die Kugel wird anschließend aus einer Höhe von 1,5 m auf eine harte Oberfläche fallen gelassen. Zerfällt die Probe nach dem Fall komplett, handelt es sich um einen zu mageren Lehm, der gefettet werden muss. Verformt sich die Kugel hingegen zu einem flachen Fladen mit kleinen oder keinen Rissen, ist der Lehm sehr tonhaltig (d.h. zu fett) und muss, um als Baulehm verwendet werden zu können, entsprechend abgemagert werden. Bildet die Probe nach dem Fall etwas größere Risse, ist die Bindekraft in der Masse nicht mehr so stark vorhanden. Der Lehm kann somit als Baulehm verwendet werden. [5]

Die nachstehenden Abbildungen zeigen eine sehr magere Lehmmischung und die für die Versuchsreihe verwendete Mischung mit 5 Ma% TLP (bezogen auf LFP) und 15 Ma% Wasser (bezogen auf die Summe von LFP & TLP).



Abb. 4.1: Mischung ohne TLP (links), optimierte Mischung mit 5 Ma% TLP (rechts)



Abb. 4.2: Ausgewählte Mischung mit 5 Ma% TLP (bez. auf LFP) und 15 Ma% Wasser (bez. auf Summe von LFP & TLP)

4.1.1.2 Verdichtung

Zur Verdichtung der in die Schalung eingefüllten Lehm- oder Tonmasse stehen grundsätzlich zwei verschiedene Verdichtungsarten zur Auswahl, die statische und die dynamische Verdichtung.

Im Stadium der Vorversuche werden beide nachstehend kurz erläuterten Verdichtungsverfahren bei der Erstellung der Vorversuchsprobekörper angewendet, um die bessere Wahl im Hinblick auf die Festigkeitseigenschaften der Masse treffen zu können.

Dynamische Verdichtung

Bei der dynamischen Verdichtung wird ein Fallgewicht aus einer definierten Höhe vertikal wiederholt auf den Probekörper fallen gelassen. Mittels dadurch freigesetzter Energieimpulse wird der Probekörper verdichtet. Um die Reproduzierbarkeit der Probekörper betreffend Energieeintrag gewährleisten zu können, wird der Proctorhammer – ein in der Bodenmechanik bewährtes Verdichtungsgerät – mit einer Fallgewichtsmasse von 2,5 kg und einer Fallgewichtshöhe von 305 mm verwendet.

Für die Probekörperherstellung in der gegenständlichen Versuchsreihe wird die Masse in die Schalung gefüllt und mit einer Lastverteilerplatte waagrecht abgedeckt. Anschließend werden die Probekörper mit fünf zentrischen Schlägen durch den Proctorhammer verdichtet. Der spezifische Energieeintrag nach DIN EN 13286-2 [42] in die Probekörper wurde für die Probekörperabmessungen von $150 \times 150 \times 15$ mm mit einem Wert von $0,1090 \text{ MJ/m}^3$ berechnet.



Abb. 4.3: Verdichtung: Lastverteilerplatte mit Zentriereinheit; Fallgewicht unten

Statische Verdichtung

Allgemein wird bei der statischen Verdichtung mit Hilfe einer Presse der Anpressdruck auf den Probekörper langsam gesteigert und bei einem definierten Wert eine bestimmte Zeit lang gehalten, wodurch es zur Stauchung des Probekörpers kommt. In der Vorversuchsreihe der gegenständlichen Arbeit werden die Probekörper mit einer hydraulischen Presse, deren Druck langsam auf 100 bar gesteigert wird, verdichtet. Beim Verdichtungsprozess konnte beobachtet werden, dass neben Luft auch ein Teil des in der Lehm- oder Tonmasse befindlichen Wassers aus den Probekörpern gepresst wird.

In den Abbildungen 4.4 und 4.5 ist eine Gegenüberstellung beider Verdichtungsvarianten zu sehen.



Abb. 4.4: Probekörper dynamisch (links) und statisch (rechts) verdichtet



Abb. 4.5: Seitenansicht: Probekörper dynamisch (links) und statisch (rechts) verdichtet

Dem Handbuch Lehmabau von Minke [5] ist zu entnehmen, dass dynamische Verdichtungsverfahren grundsätzlich erfolgsversprechender betreffend die Bindekraft und somit die Festigkeit des Lehms sind. Bei der Gegenüberstellung der dynamisch und statisch verdichteten Probekörper in Abbildung 4.4 und 4.5 zeigt sich bereits visuell, dass die dynamisch verdichteten Probekörper eine bessere Verdichtung aufweisen, weshalb die Probekörperherstellung für alle weiteren Versuche nach der dynamischen Verdichtung erfolgt. Detaillierte Ausführungen zu beiden Verdichtungsverfahren sowie deren mechanische Auswertung sind der Arbeit von Philipp Ender (1) zu entnehmen.

4.1.2 Schalungsherstellung

Aufgrund der hohen Anzahl zu fertigender Probekörper ist die Entscheidung auf eine eigene Herstellung der Schalungen (siehe Abbildung 4.6) gefallen. Um eine möglichst wiederverwendbare Schalung anzufertigen, welche einfach in der Produktion und zugleich leicht sein soll, wird ein Holzwerkstoff als Ausgangsmaterial festgelegt.

Damit sich die Lehmkörper nach der Trocknung gut aus der Schalung lösen lassen, ist eine möglichst glatte Oberfläche von großer Bedeutung. Der Holzwerkstoff soll idealerweise keine Feuchtigkeit aus den feuchten Probekörpern aufnehmen und leicht zu reinigen sein.

Aus den genannten Gründen kommt eine Siebdruckplatte zum Einsatz. Die $150 \times 150 \times 15$ mm großen Probekörper werden von Streifen aus Plattenabschnitten, eingewickelt in Frischhaltefolie, begrenzt. Um das Auslösen der einzelnen Probekörper zu erleichtern und ein Verrutschen bei der Verdichtung zu verhindern, werden die Streifen mit der Grundplatte verschraubt. Auf die Trägerplatte wird ebenso eine PE-Folie angebracht, um im Falle eines etwaigen Festklebens

trotzdem eine Möglichkeit für das Herauslösen der Probekörper zu haben. Zusätzlich wird eine Wiederverwendung der Schalung durch eine vereinfachte Reinigung mit Wasser ermöglicht. An dieser Stelle ist anzumerken, dass es während der Probekörperherstellung zu keinem Festkleben der Proben gekommen ist und die Verwendung der PE-Folie sohin nicht zwingend erforderlich gewesen wäre.



Abb. 4.6: Fertige Schalung aus Siebdruckplatte für 12 Probekörper

4.1.3 Probekörper mit Additiven und Beschichtungen

Die Referenzprobekörper (aus reinem Lehm) werden nach der oben beschriebenen Vorgehensweise hergestellt und dem festgelegten Mischungsverhältnis, siehe Kapitel 4.1.1, die in Kapitel 3.2 beschriebenen Additive beigemischt und Beschichtungen aufgetragen.

4.1.3.1 Lehm mit Filz

Zur Stärkung der Verbundwirkung des Filzes mit dem Lehm wird der Filz mit einem Stanzeisen, Lochdurchmesser 6 mm, mit einem horizontalen und vertikalen Lochabstand von je 20 mm gelocht, der Filz mit Schleifpapier (Körnung P60) aufgeraut und dadurch die oberflächlichen Wollfasern aus der Verfilzung „ausgezogen“. Anschließend werden die Filzmatten in die vorbereitete Schalung eingelegt. Nach dem Einlegen wird die Filzmatte mit einigen Sprühstößen Wasser befeuchtet, um zu verhindern, dass der Filz aufgrund seines Wasseraufnahmevermögens beim Trocknungsvorgang der Lehmmischung nicht so schnell deren Feuchte entzieht. Die vorbereitete Lehmmasse wird daraufhin in die Schalung gefüllt und die Probekörper entsprechend verdichtet.

In Abbildung 4.7 ist eine Gegenüberstellung von mit Schleifpapier aufgerautem und unbearbeiteten Filz zu sehen, in Abbildung 4.8 ist der Stanzvorgang abgebildet. Die Abbildung 4.9 zeigt den fertigen Probekörper.

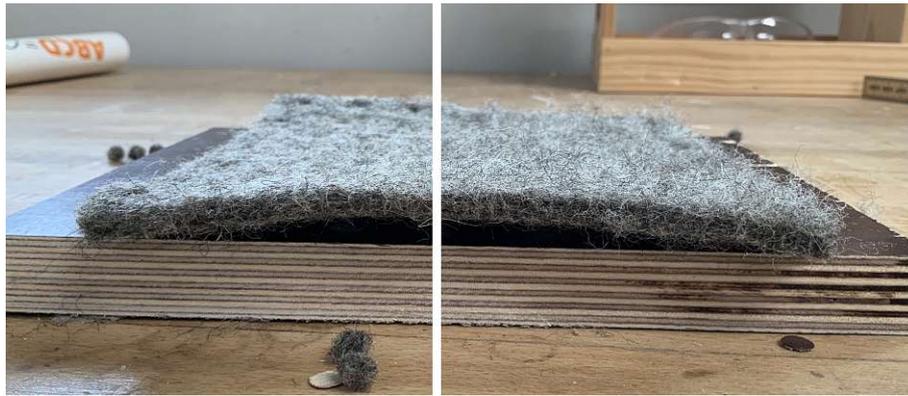


Abb. 4.7: Gegenüberstellung Filz unbearbeitet (links), Filz aufgeraut (rechts)

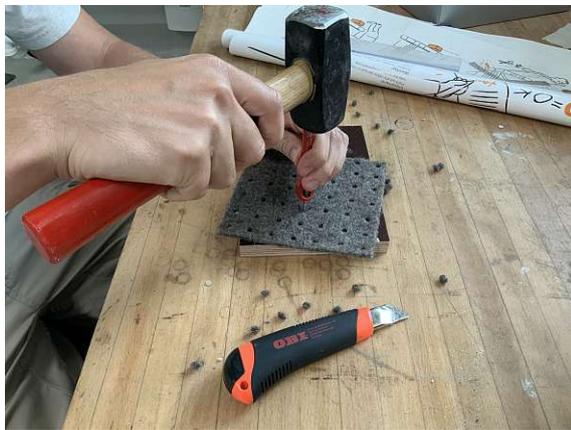


Abb. 4.8: Stanzvorgang



Abb. 4.9: Probekörper mit gelochtem Filz

4.1.3.2 Lehm mit Kasein

In Vorversuchen werden unterschiedliche Kaseingehalte, bis maximal 10 Ma% Kasein, getestet, wobei sich die Konsistenz aufgrund der Eiweißklebewirkung von Kasein bei 10 Ma% als viel zu viskos herausstellt. Aufgrund dieser Erkenntnisse hat man sich auf die folgenden drei Kaseingehalte, bezogen auf die Summe von LFP & TLP, geeinigt, die in die Lehmmischung eingemischt werden:

- 1,0 Ma% Kasein
- 3,0 Ma% Kasein
- 5,0 Ma% Kasein

Die einzelnen Kaseingehalte werden der Grundlehmischung mit einem W/L-Wert von 0,15 zugemischt, wobei sich das Mischungsverhältnis als zu trocken herausstellt. Deshalb wird der W/L-Wert bei 1 Ma% Kasein auf 0,20 angehoben, um eine annähernd gleiche Konsistenz im Vergleich zum Ausgangsmaterial zu erhalten. Mit steigendem Kaseinanteil ist auch der Wasseranteil entsprechend zu erhöhen. Bei 3 Ma% Kasein erweist sich ein W/L-Verhältnis von 0,23 und bei 5 Ma% Kasein ein W/L-Verhältnis von 0,25 als praktikabel.

Während des Trocknungsprozesses beginnen durch das Kaseineiweiß die Probekörper zu schimmeln. Es zeigt sich, dass sich mit steigendem Kaseingehalt die Schimmelbildung erhöht. Nachdem die Prüfkörper mit 5 Ma% Kaseingehalt völlig verschimmelt waren (siehe Abbildung 4.10), wurden

diese aus der weiteren Versuchsreihe komplett ausgeschlossen. Zudem führt Riss- bzw. Schwindrissbildung in den Prüfkörpern, die ebenso mit steigendem Kaseingehalt zunimmt, zu einem weiteren Ausscheiden von Probekörpern, sodass zuletzt nur noch einige wenige Probekörper mit Kasein als Zusatz von 1 und 3 Ma% für die Beprobung zur Verfügung stehen. Dem Rissbild zufolge könnte ein Grund für die Schwindrissbildung die aufgrund des Kaseineiweiß herabgesetzte einseitige Trocknung sein, worauf auch die in Abbildung 4.10 ersichtliche leichte Wölbung hindeutet.



Abb. 4.10: Schimmelbildung im Probekörper mit 5 Ma% Kasein

4.1.3.3 Lehm mit Kalk gelöscht

In die Grundlehmischung werden in Vorversuchen nachstehende Kalkgehalte, wiederum bezogen auf die Summe von LFP & TLP, untergemischt:

- 4,0 Ma% Kalk gelöscht
- 6,0 Ma% Kalk gelöscht
- 8,0 Ma% Kalk gelöscht

Die verwendeten Werte orientieren sich an der Literatur von Minke [5], der angibt, dass die richtigen Kalkgehalte je nach Lehmzusammensetzung in Form von Laborversuchen zu bestimmen sind. Das W/L-Verhältnis zum jeweiligen Kalkgehalt wird mittels Kugelfalltest ermittelt und bezieht sich auf die Gesamtmasse von LFP, TLP und Kalk. Um dieselbe Plastizität und Konsistenz der Mischungen zu erhalten, muss der Wassergehalt leicht angepasst werden. Für 4 Ma% ergibt sich ein W/L-Gehalt von 0,15, für 6 Ma% ein W/L-Gehalt von 0,16 und für 8 Ma% ein W/L-Gehalt von 0,17.

Die Probekörpercharge mit 4 Ma% Kalkgehalt ist augenscheinlich gut gelungen. Beim Kalkgehalt vom 6 Ma% zeigen sich schon vermehrt Trockenschwindrisse. Diese erhöhen sich bei einem Kalkgehalt von 8 Ma% derart, dass kein Probekörper zur Beprobung herangezogen werden kann. In engem Zusammenhang mit der Schwindrissbildung steht neben der Lehmzusammensetzung

(Tongehalt) der Wassergehalt der Probe. Bei der Zugabe von Kalk ist zu beobachten, dass der Trocknungsvorgang wesentlich schneller vonstatten geht und die Probekörper spröder werden, was die Rissbildung zusätzlich negativ beeinflusst. Die Abbildung 4.11 zeigt einen Probekörper mit einem Anteil von 4 Ma% gelöschtem Kalk.



Abb. 4.11: Probekörper mit 4 Ma% Kalk gelöscht

4.1.3.4 Lehm mit Holzfasern

Die Holzfasern befinden sich zum Zeitpunkt der Lieferung in Säcken zu 15 kg abgepackt in stark komprimiertem Zustand. Da sie nach dem Öffnen der Verpackung sehr verklumpt sind, ist es erforderlich, die Holzfasern für die Weiterverwendung zu entklumpen, um bei der Probekörperherstellung eine homogene Durchmischung zu erreichen. Für den Trennvorgang wird ein Gefäß mit einer durchsichtigen PE-Folie verschlossen und in die Folie zwei gegenüberliegende kleine Öffnungen geschnitten. Durch eine Öffnung wird mittels Druckluftlanze Luft in das Gefäß eingeblasen. Die zweite Öffnung hat die Funktion eines Überdruckventils. Das Überdruckventil wird mit dem Stück einer Atemschutzmaske zugeklebt, um zu gewährleisten, dass die feinen Holzfasern beim Einblasen von Luft durch die Filterwirkung im Gefäß verbleiben. Durch das Einblasen von Luft trennen sich die einzelnen Fasern und die im Gefäß befindliche Masse gewinnt enorm an Volumen. Abbildung 4.12 zeigt die Faserklumpen nach der Entnahme aus der Verpackung, in Abbildung 4.13 sind die mit Druckluft voneinander getrennten Holzfasern zu sehen.



Abb. 4.12: Holzfaserklumpen im Lieferzustand



Abb. 4.13: Mittels Druckluft gelöste Holzfasern

Der Lehmischung werden drei verschiedene Holzfaseranteile untergemischt. Die Größenordnung der gewählten Anteile basiert auf der Literaturrecherche, konkret auf der Masterarbeit von Erich Streit [30], der in seiner Versuchsreihe dem Lehm 2,5 Ma% Holzfaseranteil beigemischt hat, und auf der Dissertation von Dirk Schubert [11], dessen Probekörper aus Ton und Holzfasern in Form von Pressagglomeration mit bis zu 60 % Holzfaseranteil hergestellt wurden. Der große Unterschied an verwendeten Holzfaseranteilen gründet in den divergierenden Herstellungsprozessen der Probekörper.

Zunächst soll ein Holzfaseranteil von 3 Ma% der Lehmischung beigefügt werden. Dieser Versuch scheitert jedoch an einer homogenen Durchmischung und es stellt sich ein maximal mit dem elektrischen Handrührgerät in den Lehm einmischbarer Anteil von 2,5 Ma% heraus.

Die Größenordnung der Holzfasergehalte wird daher wie folgt vorgenommen:

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

Aufgrund der hygroskopischen Eigenschaften von Holz ist der ermittelte Ausgangswassergehalt der Referenzlehmischung von 0,15 mit steigendem Holzfasergehalt anzupassen, damit die Plastizität, Konsistenz und Bindekraft der Lehmischung nach dem Kugelfalltest mit jenen des Referenzprobekörpers annähernd vergleichbar sind. Bei einem Holzfasergehalt von 1 Ma% ist ein W/L-Anteil von 0,16, bei einem Fasergehalt von 2 Ma% ein W/L-Anteil von 0,17 und bei einem Wert von 2,5 Ma% ein W/L-Anteil von 0,18, bezogen auf die Gesamttrockenmasse (LFP, TLP und Holzfasern), erforderlich.

Bei der Probekörperherstellung ist darauf zu achten, dass der Lehm zuerst nur „angefeuchtet“ (ca. $\frac{1}{3}$ – $\frac{1}{2}$ der Wassermenge) und nicht sofort mit der gesamten Wassermenge vermischt wird. Die mittels Druckluft voneinander gelösten Holzfasern werden anschließend mit dem Handmischgerät unter permanentem Rühren bei hoher Drehzahl der vorbereiteten Lehm Masse langsam untergemischt bzw. mit Hilfe von Druckluft in die Mischung „eingeblassen“. Dieser Vorgang stellt einen heiklen und zeitintensiven Prozess dar, da eine gleichzeitig eingebrachte, zu große Faser Menge zu einer Verklumpung führen würde und es somit zu Beeinträchtigungen der Festigkeit kommen könnte. Im Anschluss wird das restliche Zugabewasser in die Mischung eingerührt. In der nachstehenden Abbildung 4.14 ist ein Probekörper mit 2 Ma% Holzfasergehalt zu sehen.

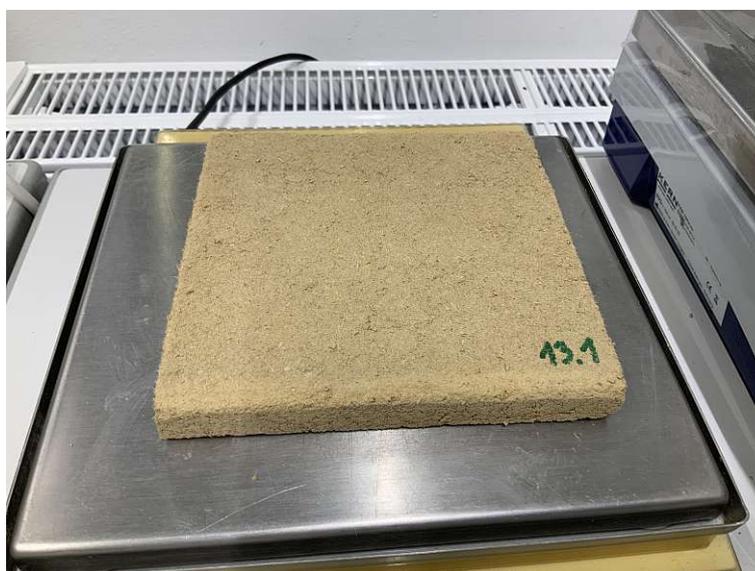


Abb. 4.14: Probekörper mit 2 Ma% Holzfasern

4.1.3.5 Lehm mit Kaliwasserglas

Die Probekörper mit Wasserglasbeschichtung werden kongruent zu jenen der Referenzprobekörper hergestellt, getrocknet und konditioniert. Das Wasserglas wird einseitig unverdünnt mittels Malerrolle auf den Probekörper satt aufgetragen. Das Beschichten erfolgt mit gleichmäßigem Druck in beide Richtungen (von oben nach unten und nach einer kurzen „Anziehphase“ von links nach rechts). Nach einer Wartezeit von etwa zwei Stunden wird der Vorgang wiederholt. Der beschichtete Probekörper, siehe Abbildung 4.15, ist anschließend unter Normklimabedingungen zu trocknen und konditionieren.



Abb. 4.15: Probekörper mit Wasserglasbeschichtung

4.1.3.6 Lehm mit Carnaubawachs

Die Herstellung der Probekörper mit Carnaubawachsbeschichtung erfolgt analog zu den Lehmkörpern mit Kaliwasserglas. Die milchige Carnaubawachs-Emulsion wird ebenfalls zweimal in ihrer Reinform einseitig auf den Prüfkörper in beide Richtungen aufgetragen und der beschichtete Probekörper im Anschluss in der Klimakammer getrocknet und normkonform konditioniert. Die nachstehende Abbildung 4.16 zeigt den Beschichtungsvorgang mit Carnaubawachs.



Abb. 4.16: Probekörper mit Carnaubawachsbeschichtung

4.1.4 Trocknung und Konditionierung

Die DIN 18948:2018-12 [26] verlangt zur Durchführung der gegenständlichen Versuche die Konditionierung der Probekörper bei $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ / $(50 \pm 5)\%$ rel.LF bis zur Erreichung der Massekonstanz. Nach der Norm gilt diese als erreicht, wenn die Ergebnisse von zwei aufeinander folgenden Wägungen im Abstand von 24 Stunden um höchstens 0,05 % der Masse, bezogen auf den kleineren Messwert, voneinander abweichen. Vor Durchführung der Prüfungen sind die Probekörper entsprechend der Norm mindestens sieben Tage lang unter den genannten klimatischen Bedingungen und Anforderungen zu lagern. [26]

Die Beprobung des Sorptionsverhaltens nach DIN EN ISO 12571 [32] sieht eine Trocknung der Probekörper in einem Wärmeschrank nach ISO 12570 vor. Die ISO 12570 [43] regelt die Trocknung unterschiedlicher Materialgruppen mit unterschiedlichen Temperaturen. Für einige mineralische Materialien ist eine Trocknung bei $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$ vorgesehen. Grundsätzlich ordnet die Norm den Baustoff Holz in seiner ursprünglichen Form auch dieser Kategorie zu. Die thermische Zersetzung von Holz setzt bei Temperaturen über 105°C ein. Bei längerer Exposition kann sie aber auch schon bei Temperaturen von unter 100°C einsetzen [44].

Für die weitere Versuchsreihe werden alle Probekörper, die der Beprobung des Absorptionsverhaltens zugeordnet werden, bei einer Temperatur von 90°C bis zur Massekonstanz getrocknet. Die Massekonstanz gilt nach DIN EN ISO 12571 [32] erreicht, wenn die Änderung der Masse bei drei aufeinander folgenden Wägungen (im Abstand von jeweils mindestens 24 Stunden durchgeführt) weniger als 0,1 % der Gesamtmasse beträgt.

4.2 Rohdichte

Um eine Zuordnung der einzelnen Probekörper in die Rohdichteklassen nach Tabelle 2 der DIN 18948:2018-12 [26] (siehe Abbildung 2.5) vornehmen zu können, ist zunächst die Rohdichte der einzelnen Probekörper zu ermitteln. Dafür ist es erforderlich, die Massen der Probekörper mittels Präzisionswaage (verwendet wird die Waage Sartorius LP 5200 P mit einer Ablesegenauigkeit von 0,01 g) nach Erreichen der Massekonstanz bei $(23 \pm 2)^\circ\text{C} / (50 \pm 5)\%$ rel.LF zu wiegen. Zur Bestimmung der Abmessungen wird ein Messschieber mit einer Messgenauigkeit von 0,01 mm verwendet. Die Norm fordert Genauigkeiten von 0,1 mm bzw. mindestens 0,1 g.

Um ein repräsentatives Ergebnis zu erzielen, werden vier intakte Versuchskörper (in Bezug auf Ebenheit und Randausbrüche) je Material herangezogen, vermessen und gewogen. Die Norm [26] fordert demgegenüber je zwei repräsentative Plattenstücke mit mindestens 10 cm Länge und Breite aus drei Lehmplatten. Die Länge der Versuchskörper wird genauso wie die Breite an den jeweils gegenüberliegenden Seiten gemessen und gemittelt. Die Dicke der Probekörper wird aus dem Mittelwert an je vier Messpunkten pro Probe gebildet.

Die Ermittlung der Rohdichte erfolgt aus der Masse bezogen auf das äußere Volumen der Probekörper. Aus den Ergebnissen der Einzelmessungen ist der Mittelwert zu bilden und auf volle 10 kg/m^3 gerundet anzugeben, wobei die Einzelwerte der Rohdichte nicht mehr als $\pm 10\%$ vom Mittelwert abweichen dürfen. [26]

4.3 Wasserdampfdiffusion

Zur Ermittlung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl ist nach DIN 18948:2018-12 [26] die DIN EN ISO 12572 [45] zu verwenden.

4.3.1 Anforderungen an die Prüfung

Kapitel 6 der Norm [45] fordert mindestens fünf zu prüfende Probekörper, wenn deren Fläche kleiner als $0,05\text{ m}^2$ ist, andernfalls mindestens drei zu prüfende Probekörper. Sofern nicht nur die Beschichtung, sondern auch das Kernmaterial beprobt wird, muss die Dicke der Probe zumindest 20 mm betragen. In Anlehnung an die Norm werden drei Prüfkörper je Material mit einer Soll-Fläche von $0,0225\text{ m}^2$ und einer Soll-Dicke von 15 mm beprobt. Die Konditionierung hat bei $(23 \pm 5)^\circ\text{C} / (50 \pm 5)\%$ rel.LF über einen ausreichend langen Zeitraum zu erfolgen. Die an drei aufeinander folgenden Tagen durchzuführenden Messungen zur Bestimmung der Masse dürfen um nicht mehr als 5 % voneinander abweichen, um Massekonstanz zu erreichen. Die für die Wägung heranzuziehende Waage soll eine Genauigkeit von 0,001 g aufweisen. Mangels Verfügbarkeit wird auf die geeichte Messwaage Sartorius LP 5200 P mit einer Genauigkeit von 0,01 g zurückgegriffen.

Nach der Konditionierung im Klimaschrank und Erreichen der Massekonstanz werden die Prüfkörper in die offene Seite eines durchsichtigen Prüfgefäßes aus chemisch nicht angreifbarem Material, welches eine wässrige gesättigte Lösung aus Wasser und Kaliumhydroxid (KOH) enthält, eingesetzt und mithilfe von Silikon eingedichtet. Der Prüfaufbau nach DIN EN ISO 12572 ist der untenstehenden Abbildung 4.17 zu entnehmen. Die KOH-Lösung wird im Vorfeld in einen gesättigten Zustand gebracht. Zusätzlich zur gesättigten KOH-Lösung (ca. 430 g Lösung) wird der Boden des Prüfgefäßes mit weiteren KOH-Flocken (ca. 100 g) bedeckt, um gegebenenfalls ein

Nachsättigen in der eingedichteten Probe zu ermöglichen. Das Sättigungs-Mischungsverhältnis Wasser zu KOH-Lösung beträgt in etwa 1:1,7. Die Mindestfüllhöhe der KOH-Lösung im Gefäß beträgt 15 mm, wobei ein Luftraum zum Probekörper von (15 ± 5) mm einzuhalten ist. Im Luftraum zwischen eingedichteter Probe und KOH-Lösung stellt sich eine relative Luftfeuchte von 9 % (siehe Tabelle 1 der DIN EN ISO 12571 [32]) ein. Ein fertig eingedichteter Prüfkörper ist in Abbildung 4.18 dargestellt.

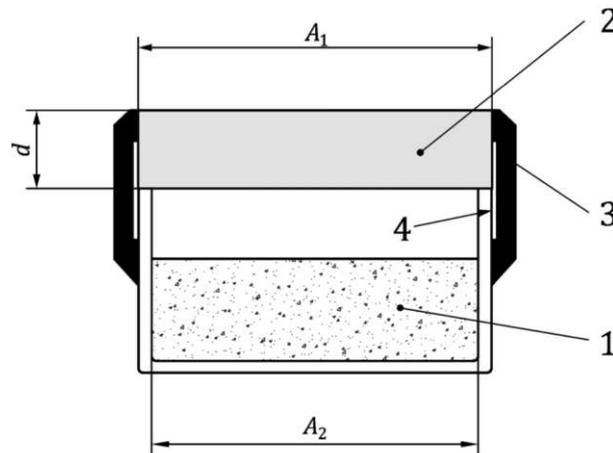


Abb. 4.17: Prüfaufbau nach DIN EN ISO 12572, [45]

- 1 ... gesättigte KOH-Lösung
- 2 ... Probekörper der Stärke $d = 15$ mm
- 3 ... Dichtmasse (Silikon)
- 4 ... ggf. Dichtband
- A_1 ... obere Prüffläche
- A_2 ... untere Prüffläche



Abb. 4.18: Fertig eingedichteter Probekörper

4.3.2 Ermittlung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl

Nach der Referenzwägung werden die eingedichteten Proben im Klimaschrank bei 23 °C / 50 % rel.LF gelagert und in zeitlichen Abständen (in der vorliegenden Arbeit ca. zwei bis vier Tage) gewogen. Der Prozess wird so lange wiederholt, bis bei fünf aufeinanderfolgenden Bestimmungen der Masseänderung je Zeiteinheit Δm_{12} [kg/s] (für jeden Probekörper) die maximale Abweichung innerhalb von $\pm 5\%$ des Mittelwertes erreicht ist. Dieser Mittelwert bezeichnet den Wasserdampfdiffusionsstrom G [kg/s]. Der Wasserdampfdiffusionsstrom ergibt sich aus der Differenz (Dampfdruckgefälle) der sich einstellenden relativen Luftfeuchte zwischen Gefäßinnerem und der Klimakammer. Die relative Luftfeuchte im Prüfzeitraum ist dabei kontinuierlich zu überwachen, was durch die Klimakammer sichergestellt ist. Zusätzlich ist der barometrische Druck im Prüflabor entweder selbst zu messen oder bei einer meteorologischen Station zu erfragen. [45]

Zur Ermittlung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl ist im Vorfeld die Bestimmung mehrerer Parameter erforderlich.

Klimakammer:

Temperatur θ :	23 °C
rel. Luftfeuchte Φ :	50 %
Dampfdruck p_a :	1403,90 Pa

Klimabedingungen im Prüfgefäß:

Temperatur θ :	23 °C
rel. Luftfeuchte Φ :	9 %
Dampfdruck p_i :	252,70 Pa

barometrischer Druck:

mittlerer Luftdruck über Prüfzeitraum p :	989,63 hPa
normaler Luftdruck über Prüfzeitraum p_0 :	1013,25 hPa*

* gemittelt über den Prüfzeitraum vom 27.08.2021 bis 15.09.2021 (Quelle: BOKU-Met [46])

Der Dampfdruck in der Klimakammer p_a und im Prüfgefäß p_i ergibt sich nach Gleichung 4.1:

$$p = \Phi \cdot 610,5 \cdot e^{\frac{17,269 \cdot \theta}{237,3 + \theta}} \quad (4.1)$$

Die Dampfdruckdifferenz Δp nach Gleichung 4.2 ergibt sich zu:

$$\Delta p = p_a - p_i = 1151,2 \text{ Pa} \quad (4.2)$$

Der Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient der Luft δ_a ermittelt sich wie folgt 4.3:

$$\delta_a = \frac{0,086 \cdot p_0}{R_D \cdot T \cdot p} \cdot \left(\frac{T}{273} \right)^{1,81} \quad (4.3)$$

mit

- R_D ... Gaskonstante von Wasserdampf: 462,10 Nm/(kgK)
 T ... thermodynamische Temperatur (Prüfumgebung-Klimaschrank) [K]

Für die Prüfung ergibt sich somit:

$$\delta_a = \frac{0,086 \cdot 1013,25}{462,10 \cdot 296,15 \cdot 989,63} \cdot \left(\frac{296,15}{273}\right)^{1,81} \cdot \frac{1}{3600} = 2,071 \cdot 10^{-10} \text{ kg}/(\text{msPa})$$

Die Norm [45] fordert in Vorbereitung der weiteren Auswertung, die Probekörperdicke an vier gleichmäßig über den Rand des Probekörpers verteilten Punkten zu messen. Die Stärke fester Probekörper kann mit einer Mikrometerschraube (Genauigkeit von 0,5 % oder besser) gemessen werden. Zur Bestimmung der Probekörperdicke wird, wie bereits in Kapitel 4.2 beschrieben, ein Messschieber mit einer Ablesegenauigkeit von 0,01 mm verwendet. Die mittlere Dicke ergibt sich aus dem Mittelwert der Einzelmessungen.

Mithilfe der bereits ermittelten Parameter kann der nachstehende Formelapparat tabellarisch ausgewertet und die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ sowie die äquivalente Luftschichtdicke s_d bestimmt werden:

$$g = \frac{G}{A} \qquad W = \frac{G}{A \cdot \Delta p} \qquad (4.4 \text{ a,b})$$

$$Z = \frac{1}{W} \qquad \delta = W \cdot d \qquad (4.5 \text{ a,b})$$

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta} \qquad s_d = \mu \cdot d \qquad (4.6 \text{ a,b})$$

mit

- A ... mittlere Prüffläche nach Abbildung 4.17: $A = (A_1 + A_2)/2$ [m²]
 G ... Wasserdampfdiffusionsstrom [kg/s]
 g ... Wasserdampfdiffusionsstromdichte [kg/(m²s)]
 W ... Wasserdampfdiffusionsdurchlasskoeffizient [kg/(m²sPa)]
 Z ... Wasserdampfdiffusionsdurchlasswiderstand [m²sPa/kg]
 δ ... Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient [kg/(msPa)]
 μ ... Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [-]
 s_d ... wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke [m]

4.4 Wärmeleitfähigkeit

Die DIN 18948:2018-12 [26] fordert zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit die Anwendung der DIN EN 12664 [47], alternativ eine Einstufung der auf volle 10 kg/m^3 gerundeten Trockenroh-dichte nach DIN 4108-4 oder nach den Lehmbau Regeln 2009, Tabelle 5-3 [6].

Die DIN EN 12664 [47] regelt die Überprüfung des wärmetechnischen Verhaltens von Baustoffen und Bauprodukten unter Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät. Konkret beziehen sich die Regelungen der Norm auf die Überprüfung von Probekörpern in trockenem Zustand bzw. auf jene, die auf einen Gleichgewichtszustand zu feuchter Luft eingestellt wurden und einen Wärmedurchlasswiderstand von zumindest $0,02 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ und eine feuchtebezogene spezifische Wärmedurchlässigkeit oder eine Wärmeleitfähigkeit bis zu $2,00 \text{ W/mK}$ besitzen.

Der Wärmeleitfähigkeit von Lehmplatten kommt im Vergleich zum Diffusions- und Sorptionsverhalten eine nicht so große Aufmerksamkeit zu. Im Zuge der Grundlagenforschung sind hauptsächlich die Abweichungen zum Referenzprobekörper von Bedeutung. Abweichend von den in der Norm angeführten Verfahren wird zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit das Heizdrahtverfahren angewendet.

4.4.1 Anforderungen an die Prüfung

Die zu beprobenden drei Prüfkörper je Material werden unter der Voraussetzung ausgewählt, dass deren Oberfläche eine möglichst ebene Beschaffenheit aufweist, um den Prüfkopf des Messgerätes vollflächig aufsetzen zu können. Die Probekörper werden im Vorfeld der Prüfung analog zu den anderen Versuchen, wie in Kapitel 4.1.4 beschrieben, bei $23 \text{ °C} / 50 \% \text{ rel.LF}$ konditioniert. Zur Durchführung der Versuche wird das Quick Thermal Conductivity Meter (QTM-500) der Firma KYOTO ELECTRONICS verwendet, welches vor der Verwendung zu kalibrieren ist. Hierfür gibt es dem Gerät zugehörige Kalibrierungsproben. Zusätzlich verfügt es über unterschiedliche Sonden zur Messabnahme. In der vorliegenden Prüfung gelangt die Sonde PD-13 zur Anwendung, welche zur Messung von wasserhaltigen oder sondenelektrisch leitfähigen Materialien wie Rohstoffen, Beton etc. vorgesehen ist. Das Messgerät ermöglicht die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit λ im Bereich von $0,023$ bis 12 W/mK im Temperaturmessbereich von -10 bis 200 °C . [48, 49]

4.4.2 Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit

Ein auf einer isolierten Platte befindlicher Draht wird bei konstanter Energiezufuhr maximal 60 Sekunden lang auf die Probekörper gelegt und die Messung abgenommen. Je nach Wärmeleitfähigkeit der Probe wird dem Heizdraht während der Messung Wärme entzogen und die Temperatur des Drahtes so lange gemessen, bis diese konstant bleibt. Aus dem Verlauf der Temperatur in Abhängigkeit der Zeit (im logarithmischen Maßstab) wird aus der Steigung des Graphen auf die Wärmeleitfähigkeit geschlossen. [48]

Der Graph sowie die Wärmeleitfähigkeit können auf dem Display des Messgerätes abgelesen werden. Im Anschluss werden die Mittelwerte aus den abgelesenen Wärmeleitfähigkeiten je Material bestimmt. In der nachstehenden Abbildung 4.19 ist die Prüfsonde PD-13 bei der Messabnahme zu sehen.



Abb. 4.19: Prüfsonde PD-13 auf Lehmkörper

4.5 Sorptionsverhalten

In Kapitel 2.7.3 wurde bereits darauf eingegangen, dass die vorliegende Arbeit im Rahmen der Untersuchung des Sorptionsverhaltens weiterhin an der Unterscheidung zwischen Absorptions- und Adsorptionsverhalten festhält.

4.5.1 Adsorption

Die Bestimmung des Adsorptionsverhaltens von Lehmplatten nach Anhang A.2 der DIN 18948:2018-12 [26] dient grundsätzlich der Beprobung von (Platten-) Oberflächen. Aufgrund der Probekörperabmessungen wird in Anlehnung an die Norm vorgegangen, die weitere Versuchsausführung erfolgt normkonform.

4.5.1.1 Anforderungen an die Prüfung

Die DIN 18948:2018-12 [26] erfordert zur Bestimmung der Wasserdampfadsorption drei Plattenausschnitte mit einer Prüffläche von je 1000 cm^2 und voller Plattenstärke. Abweichend von der Norm werden Prüfkörper mit einer Fläche von 225 cm^2 ($150 \times 150 \times 15 \text{ mm}$) verwendet. Die Prüfkörper sind fünfseitig dampfdicht zu versiegeln, sodass eine Sorption nur noch über die (beschichtete) freie Oberfläche des Prüfkörpers erfolgen kann. In der Versuchsvorbereitung werden die Prüfkörper mit einer dampfdichten PE-Folie umschlossen. Für die Klebewirkung zwischen Folie und den Rändern der Lehmkörper wird Silikon verwendet. Die Konditionierung erfolgt unter den bereits in Kapitel 4.1.4 beschriebenen klimatischen Bedingungen ($23 \text{ }^\circ\text{C}$ / 50 \% rel.LF) bis zur Massekonstanz mit dem Unterschied, dass die Ergebnisse der Wägungen um maximal $0,02 \text{ \%}$ der Masse, bezogen auf den kleineren Messwert, abweichen dürfen. Die für die Wägung heranzuziehende Waage soll eine Genauigkeit von $\leq 0,01 \text{ g}$ aufweisen. Die im Zuge der Überprüfungen verwendete Messwaage entspricht diesen Anforderungen.

Die Abbildungen 4.20 und 4.21 zeigen das Anbringen der Versiegelung (PE-Folie dampfdicht) an den Probekörper sowie einen fertig vorbereiteten Probekörper bei der Wägung.



Abb. 4.20: Anbringung Versiegelung



Abb. 4.21: Versiegelter Probekörper

4.5.1.2 Ermittlung der Adsorption

Bei gleichbleibender Temperatur 23 °C (50 % rel.LF) wird die relative Luftfeuchte auf $(80 \pm 5)\%$ angehoben. In vordefinierten Zeitintervallen, nämlich nach 0,5 h, 1 h, 3 h, 6 h und 12 h (hier: zusätzlich 24 h), wird die Massezunahme der Prüfkörper ermittelt. Die Massezunahme entspricht der Wasseraufnahme und ist auf eine Fläche von einem Quadratmeter hochzurechnen. Der Mittelwert ist aus den Werten der drei Prüfkörper zu bilden, wodurch anschließend die Einordnung in die Wasserdampfadsorptionsklassen WS I–WS III, siehe Abbildung 4.22, vorgenommen werden kann.

Tabelle A.2 — Wasserdampfadsorptionsklassen von Lehmplatten

	1	2	3	4	5	6
	Wasserdampf- adsorptionsklasse	Wasserdampfadsorption nach				
		0,5 h g/m ²	1 h g/m ²	3 h g/m ²	6 h g/m ²	12 h g/m ²
1	WS I	≥ 3,5	≥ 7,0	≥ 13,5	≥ 20,0	≥ 35,0
2	WS II	≥ 5,0	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 30,0	≥ 47,5
3	WS III	≥ 6,5	≥ 13,0	≥ 26,5	≥ 40,0	≥ 60,0

Abb. 4.22: Wasserdampfadsorptionsklassen nach DIN 18948:2018-12, [26]

4.5.2 Absorption

Das Absorptionsverhalten der Versuchskörper wird nach DIN EN ISO 12571 [32] bestimmt und liefert als Ergebnis Sorptionsisotherme, die den Gleichgewichtszustand der Proben bei konstanter Temperatur und verschiedenen Luftfeuchtigkeitsgehalten beschreiben.

4.5.2.1 Anforderungen an die Prüfung

Zur Bestimmung der Wasserdampfabsorption sind lt. DIN EN ISO 12571 [32] jeweils mindestens drei repräsentative Prüfkörper mit einer Masse von mindestens 10 g zu beproben. Die Probekörperabmessungen müssen bei einer Rohdichte von unter 300 kg/m^3 mindestens $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ haben. Diesen Anforderungen wird durch die im Rahmen der Prüfung verwendeten Probekörper entsprochen. Die Trocknung der Probekörper bis zur Massekonstanz erfolgt, wie unter Kapitel 4.1.4 beschrieben, nach ISO 12570. Wenn die Änderung der Gesamtmasse bei drei aufeinanderfolgenden Wägungen, die in einem Mindestabstand von 24 Stunden durchgeführt werden, weniger als 0,1 % der Gesamtmasse beträgt, gilt die Massekonstanz als erreicht. Die für die Wägung heranzuziehende Messeinrichtung lässt eine Fehlergrenze von $\pm 0,01 \%$ der Gesamtmasse zu. Durch die Verwendung der Sartorius LP 5200 P wird man dieser Forderung gerecht.

Die Absorptionskurven können anhand zweier unterschiedlicher Verfahren, nach dem Exsikkator- oder dem Klimakammer-Verfahren, ermittelt werden. Im Rahmen der gegenständlichen Prüfung wird das Klimakammer-Verfahren angewendet. Unter Verwendung des geeichten Klimaschranks der TU Wien sind die (Referenz-) Sorptionskurven bei einer Temperatur von $(23 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ zu bestimmen.

4.5.2.2 Ermittlung der Absorption

Zur Ermittlung der Sorptionskurve wird zu Beginn die bei 23°C am niedrigsten zu erreichende Luftfeuchtigkeit in der Klimakammer ausgewählt und anschließend die Probekörper eingelegt. Anschließend sind die Proben in periodischen Abständen zu wiegen, bis diese die Massekonstanz erreicht haben. Der Prozess ist für mindestens vier relative Luftfeuchten mit etwa gleichem Abstand (aufsteigende Folge), die zwischen 30 % und 95 % liegen müssen, zu wiederholen. In der vorliegenden Arbeit wird der Gleichgewichtszustand der Prüfkörper anhand von sechs aufsteigenden relativen Luftfeuchtstufen (20 %, 35 %, 50 %, 65 %, 80 % und 90 %) ermittelt. Nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes ist der Feuchtegehalt u (absolut bzw. relativ [%]) mit der nachstehenden Formel 4.7 für jeden Probekörper zu berechnen. Für die Erstellung der Sorptionskurve ist der Mittelwert (mindestens drei Probekörper) aus den berechneten Feuchtegehalten bei jeder relativen Luftfeuchte zu bilden.

$$u = \frac{m - m_0}{m_0} \quad (4.7)$$

mit

m ... Masse im Gleichgewichtszustand [g]

m_0 ... Trockenmasse [g]

4.5.3 Sorptionsverhalten in zeitlicher Abhängigkeit

Das Sorptionsverhalten in Abhängigkeit von der Zeit (Absorption) wird im Rahmen dieser Arbeit als zusätzliche Prüfung, zu den in den Normen geregelt, untersucht, welche im Gegensatz zur Absorption, die bei der graphischen Darstellung den Feuchtegehalt mit der Luftfeuchtigkeit in Verbindung setzt, die Feuchtaufnahme mit der Zeit in Verbindung setzt. Durch diese Untersuchung soll eine Basis für eine Vergleichbarkeit der Feuchtaufnahme in zeitlicher Abhängigkeit von einseitig und allseitig den klimatischen Bedingungen im Klimaschrank ausgesetzten Probekörpern geschaffen werden. Die Versuchsdurchführung ist ähnlich jener der Überprüfung des Adsorptionsverhaltens, mit dem Unterschied, dass die Probekörper vollflächig den Bedingungen im Klimaschrank ausgesetzt sind. Die zeitliche Abhängigkeit des Absorptionsverhaltens wird einmal mit plötzlich von 50 % auf 80 % erhöhter relativer Luftfeuchte (Sorption) und einmal mit schlagartig von 80 % auf 50 % gesenkter relativer Luftfeuchte (Desorption) gemessen und ausgewertet.

5 Ergebnisauswertung und Resümee

Im vorliegenden Kapitel werden die Versuchsauswertungen aller Prüfkörper dargestellt und deren Ergebnisse interpretiert. Dabei wird jede mit einem Additiv bzw. einer Beschichtung versetzte Probe mit der Referenzprobe verglichen. Das Resümee bildet den Abschluss dieser Arbeit.

5.1 Rohdichte

Die auf 10 kg/m^3 gerundeten Werte der normkonform ermittelten Rohdichten der Lehmprobekörper sind der nachstehenden Tabelle 5.1 zu entnehmen:

Tab. 5.1: Rohdichte der Probekörper bei Massekonstanz (23 °C / 50 \% rel.LF)

Material	Rohdichte gerundet [kg/m^3]
M1 Referenzprobekörper Lehm	1850
M2 Lehm mit Armierung aus Flachsgewebe*	-
M3 Lehm mit Filz**	1840
M4 Lehm mit Beschichtung aus Wasserglas	1860
M5 Lehm mit Beschichtung aus Carnaubawachs	1850
M6 Lehm mit Kasein (1 Ma%)	1710
M7 Lehm mit Kasein (3 Ma%)	1630
M8 Lehm mit Kasein (5 Ma%)***	-
M9 Lehm mit Kalk gelöscht (4 Ma%)	1780
M10 Lehm mit Kalk gelöscht (6 Ma%)	1730
M11 Lehm mit Kalk gelöscht (8 Ma%)***	-
M12 Lehm mit Holzfasern (1,0 Ma%)	1790
M13 Lehm mit Holzfasern (2,0 Ma%)	1740
M14 Lehm mit Holzfasern (2,5 Ma%)	1720
D Vorversuch dynamische Verdichtung	1920
S Vorversuch statische Verdichtung	1900

* Für die bauphysikalischen Eigenschaften nicht relevant (siehe Kapitel 3.2.2).

** Die Dichte bezieht sich ausschließlich auf den Lehmkörper (exkl. gelochte Filzmatte).

*** Während der Probekörpererstellung ausgeschieden (siehe dazu Kapitel 4.1.3.2 und 4.1.3.3).

Anhand der ermittelten Werte lässt sich eine Zuordnung in die Rohdichteklassen nach DIN 18948:2018-12 (siehe Abbildung 2.5) vornehmen. Es zeigt sich, dass die ermittelten Rohdichten alle über einem Wert von über 1200 kg/m^3 liegen und somit in die Rohdichteklassen 1,8 und 2,0 einzuordnen sind. Würden die Materialkombinationen zur Herstellung von Lehmbauplatten verwendet werden, so wäre eine Bezeichnung als „Leichtlehmplatte“, die für Rohdichteklassen von 0,6 bis 1,2 vorgesehen ist, sohin nicht möglich. Die Referenzprobekörper mit einer Dichte

von 1850 kg/m^3 weisen auf eine hinreichende Verdichtung des Lehms hin. Nach Ziegert [19] liegt der für die Referenzprobekörper ermittelte Wert von 1850 kg/m^3 in der Größenordnung von „Stampflehm“ (1700 bis 2400 kg/m^3).

Zur Bestimmung der Rohdichte der Lehmkörper mit gelochtem Filz wurde der Lehmkörper exklusive Filz herangezogen. Der Tabelle 5.1 ist zu entnehmen, dass die Probekörper mit Filz mit einer Rohdichte von 1840 kg/m^3 eine Abweichung von $0,5 \%$ zum Referenzprobekörper aufweisen. Diese vernachlässigbare, geringe Abweichung kann einerseits auf eine Messtoleranz und andererseits auf eine theoretische Dämpfung der Verdichtungsenergie infolge des Masse-Feder-Masse-Systems (Lehm-Filz-Schalung) beim Herstellungsprozess zurückgeführt werden. Bei den Materialien M6 bis M14 (Kasein, Kalk gelöscht und Holzfasern) ist zu beobachten, dass mit zunehmendem Anteil an Beimengungen die Rohdichte abnimmt. Dieser Umstand kann darauf zurückgeführt werden, dass die Dichten aller Additive geringer sind als jene der Lehmmischung. Die Beimischung von Kasein mit $1 \text{ Ma}\%$ führt zu einer Reduktion von 8% und steigert sich bei einem Kaseinanteil von $3 \text{ Ma}\%$ auf 12% , bezogen auf die Referenzprobekörper. Bei der Kalkzugabe von 4 und $6 \text{ Ma}\%$ ergeben sich Verringerungen von 4 bis $6,5 \%$. Für die Beimischung von Holzfasern ergeben sich Reduzierungen der Rohdichte von $3,5$ bis 7% . Bei den Beschichtungen kommt es zu keinen bzw. kaum nennenswerten Abweichungen von maximal $0,5 \%$, was ebenso auf Messungenauigkeiten zurückzuführen sein kann. Anzumerken ist, dass bei einer Messungenauigkeit der Probekörperstärke von $0,05 \text{ mm}$ sich bereits eine prozentuelle Abweichung von $0,3 \%$ ergibt.

Aus dem Vorversuch zur Verdichtungsmethode resultiert eine Abweichung von dynamischer zu statischer Verdichtung von 1% . Die Messungenauigkeiten in Relation zur Differenz der Dichten sind verhältnismäßig groß, weshalb diese auch als gleich groß angegeben werden können. Ausführungen zur Auswahl der Verdichtungsmethode finden sich in Kapitel 4.1.1.2.

5.2 Auswertung der Probekörper mit Additiven und Beschichtungen

Für die Versuchsauswertung wird eine Einteilung in vier Gruppen vorgenommen. Dabei werden die Materialien Filz, Wasserglas und Carnaubawachs unter dem Überbegriff „Beschichtungen“ beschrieben. Die einzelnen Additive (Kasein, Kalk und Holzfasern) werden in jeweils eigenen Unterkapiteln bzw. zusammengefasst unter „Additive“ behandelt. Bei der Auswertung werden die einzelnen Ergebnisse jeweils dem Referenzwert gegenübergestellt.

5.2.1 Adsorptionsverhalten

Bei der Überprüfung des Adsorptionsverhaltens erfolgt der Feuchteeintrag lediglich durch eine (beschichtete) freie Oberfläche. Die verbleibenden fünf Flächen sind dampfdicht versiegelt. Durch das Anheben der relativen Luftfeuchte von 50 auf 80% bei gleichbleibender Temperatur (23°C), kann die Feuchteaufnahme ermittelt und graphisch dargestellt werden. Anzumerken ist, dass bei der graphischen Auswertung die Werte zwischen den einzelnen Messpunkten durch das Programm Excel interpoliert wurden. Detaillierte Ausführungen zum Versuchsablauf sind dem Kapitel 4.5.1 zu entnehmen.

5.2.1.1 Beschichtungen

Die nachstehende Abbildung 5.1 zeigt das Adsorptionsverhalten der Lehmkörper mit den Materialien Filz (M3), Wasserglas (M4) und Carnaubawachs (M5) im Vergleich zum Referenzkörper aus Reinlehm (M1). Die zur Diagrammerstellung aus der Beprobung gewonnenen Werte sind der Tabelle A.1 im Anhang zu entnehmen.

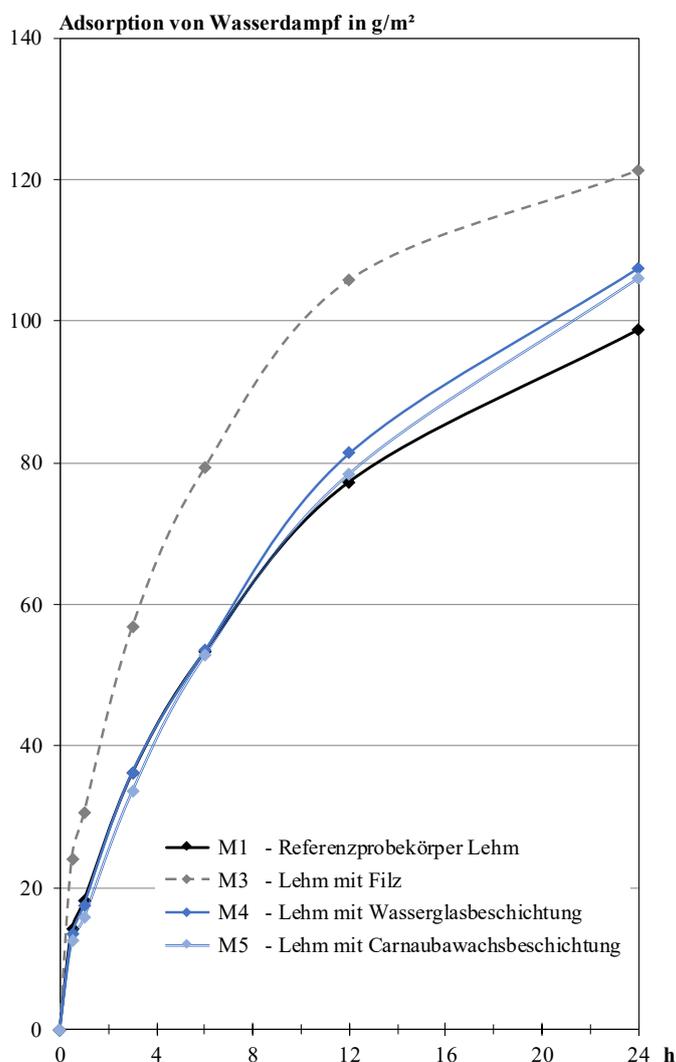


Abb. 5.1: Adsorptionsverhalten der Lehmprobekörper mit Beschichtungen

Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass die Referenzprobekörper aus reinem Lehm über die Dauer von sechs Stunden 53 g/m^2 an Feuchtigkeit aufnehmen. Über die gesamte Messdauer von 24 Stunden werden 99 g/m^2 aufgenommen. Aus der graphischen Darstellung ist gut zu erkennen, dass der Lehm in Kombination mit Filz beim Endwert der Messreihe um ca. 20 g/m^2 mehr an Feuchtigkeit aufnimmt. Zudem zeigt die Steigung des Graphen, dass die Probekörper (M3) im selben Zeitraum nicht nur mehr g/m^2 Feuchtigkeit, sondern diese auch schneller aufnehmen.

Die Adsorptionseigenschaften der Probekörper mit Wasserglas und Carnaubawachs verhalten sich in den ersten sechs Stunden nahezu identisch zum Referenzprobekörper. Im Zeitraum zwischen sechs und acht Stunden beginnen sich die Kurven von den Referenzprobekörpern zu unterscheiden.

Nach 24 Stunden kann bei den beschichteten Probekörpern (M4 und M5) ein leichtes Kondensat an der Oberfläche festgestellt werden, wobei die Kondensatbildung auf den Probekörpern mit Carnaubawachsbeschichtung minimal ausgeprägt und kaum wahrzunehmen war. Die im Vergleich zu den Reinlehmprobekörpern erhöhten Endwerte können auf die Anreicherung von Kondensat an der Oberfläche zurückgeführt werden. Es kann sohin festgehalten werden, dass die Beschichtungen (M4 und M5) keine nennenswerten Auswirkungen auf die Feuchteaufnahme haben.

5.2.1.2 Additive

In den nachfolgenden Diagrammen 5.2 bis 5.4 erfolgt aus Gründen der Übersichtlichkeit eine gesonderte Gegenüberstellung der Probekörper mit in unterschiedlichen Massegehalten beige-mengten Additiven und den Referenzprobekörpern.

Lehm mit Kasein

Wie bereits unter Kapitel 4.1.3.2 festgehalten, konnten die mit 5 Ma% Kasein versetzten Probekörper nicht zur weiteren Beprobung herangezogen werden. Die Graphen der Probekörper mit 1 Ma% Kasein (M6) und der Referenzprobekörper verlaufen nahezu deckungsgleich. Auch der Graph der Probekörper mit 3 Ma% Kasein (M7) verläuft in der ersten Stunde parallel zu jenem der Referenzprobekörper. Die Steigung der Tangente des Graphen M7 ist geringfügig höher als die der Referenzprobekörper. Nach 24 Stunden kommt sie bei einem Endwert von 114 g/m^2 zu liegen, was einer um 14 % höheren Feuchteaufnahme gegenüber M1 entspricht. Die höhere Feuchteaufnahme könnte darin begründet sein, dass sich die Oberfläche bereits optisch im Vergleich zu den Referenzprobekörpern als nicht ganz geschlossen darstellt und die Probekörper mit mehr Poren versetzt sind. Dies würde auch die geringere Dichte unterstreichen. Die dem Diagramm zugehörigen Tabellenwerte sind der Tabelle A.2 im Anhang zu entnehmen.

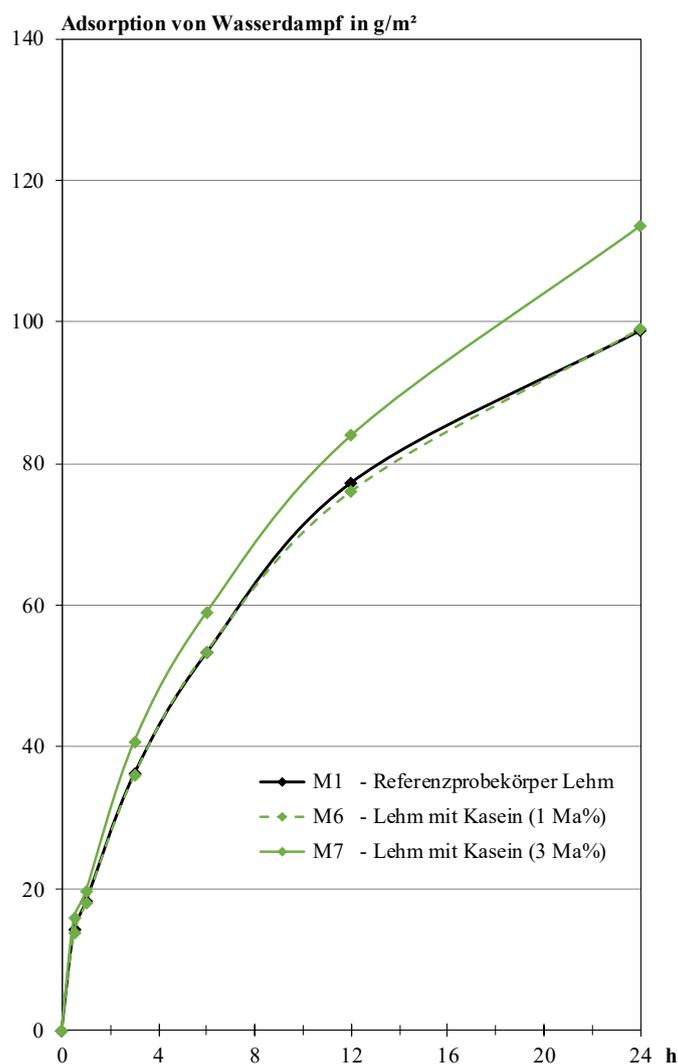


Abb. 5.2: Adsorptionsverhalten der Lehmprobekörper mit 1 und 3 Ma% Kasein

Lehm mit Kalk gelöscht

Bereits zum Zeitpunkt der Probekörperherstellung hat sich gezeigt, dass mit steigendem Kalkgehalt die Porosität der mit Kalk versetzten Lehmmischung steigt, sodass in der Folge nur Probekörper mit 4 und 6 Ma% Kalkgehalt beprobt werden konnten. Nähere Ausführungen sind Kapitel 4.1.3.3 zu entnehmen.

Sowohl bei den Probekörpern mit 4 Ma% Kalkgehalt (M9) als auch bei jenen mit 6 Ma% Kalkgehalt (M10) ist ein annähernd identer Verlauf zum Referenzprobekörper zu beobachten. Es zeichnet sich die Tendenz ab, dass sich mit steigendem Kalkgehalt die Feuchteaufnahme verringert. Dies wird auch in der Literatur von Röhlen und Ziegert [19] unterstrichen. Bei der gegenständlichen Versuchsreihe ergibt sich zum Endwert (M10) eine Differenz von 6 g/m^2 . Unter Berücksichtigung von etwaigen Messungenauigkeiten kann diese Abweichung jedoch als gering angesehen und vernachlässigt werden. Die betreffenden Tabellenwerte finden sich in der Tabelle A.3 im Anhang.

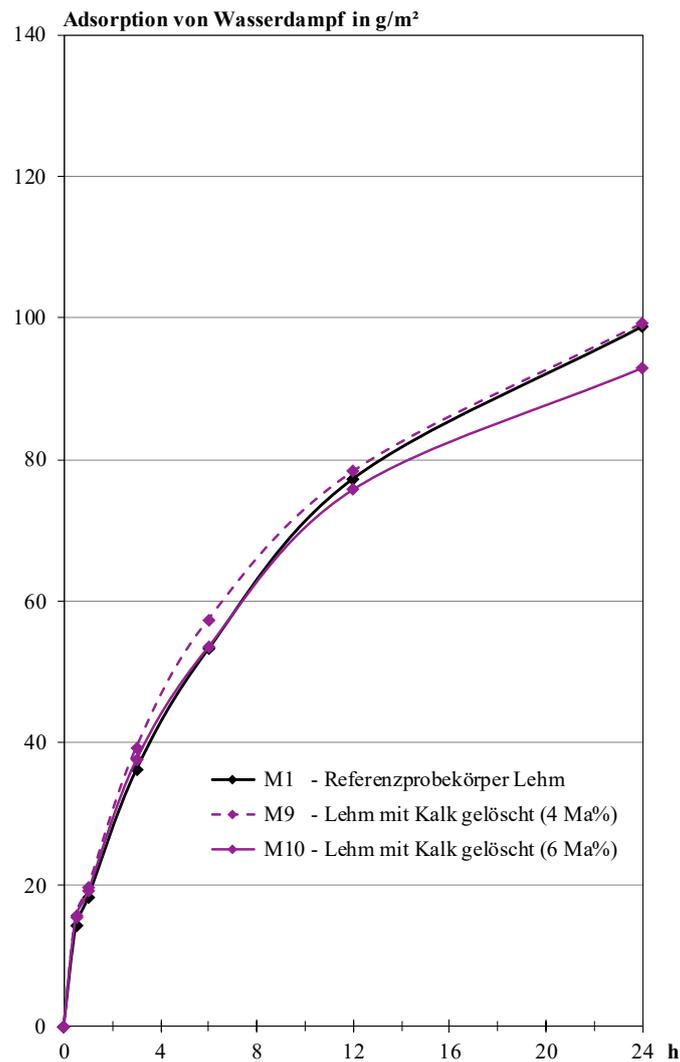


Abb. 5.3: Adsorptionsverhalten der Lehmprobekörper mit 4 und 6 Ma% Kalk gelöscht

Lehm mit Holzfasern

Zur Überprüfung des Adsorptionsverhaltens stehen Probekörper mit drei unterschiedlichen Holzfaserteilen (1, 2 und 2,5 Ma%) zur Verfügung. Bei der Zugabe von Holzfasern zeigt sich, dass es mit zunehmendem Faseranteil zu einer Erhöhung des Adsorptionsvermögens bei gleichzeitiger Abnahme der Dichte kommt. Über die ersten drei Stunden steigen die Graphen der Probekörper mit 1 Ma% (M12), 2 Ma% (M13) und 2,5 Ma% (M14) Holzfaserteil annähernd ident zu jenem der Referenzprobekörper. Die Zunahme der mit 2,5 Ma% Holzfaserteil versetzten Probekörper im Vergleich zu M1 beträgt zum Endwert 9 g/m². Die Feuchtezunahme der mit Holzfasern versetzten Stoffe ist auf den in Kapitel 2.6.3 bzw. Abbildung 2.4 beschriebenen Effekt zurückzuführen. Die in diesem Zusammenhang ermittelten Werte finden sich in Tabelle A.4 im Anhang.

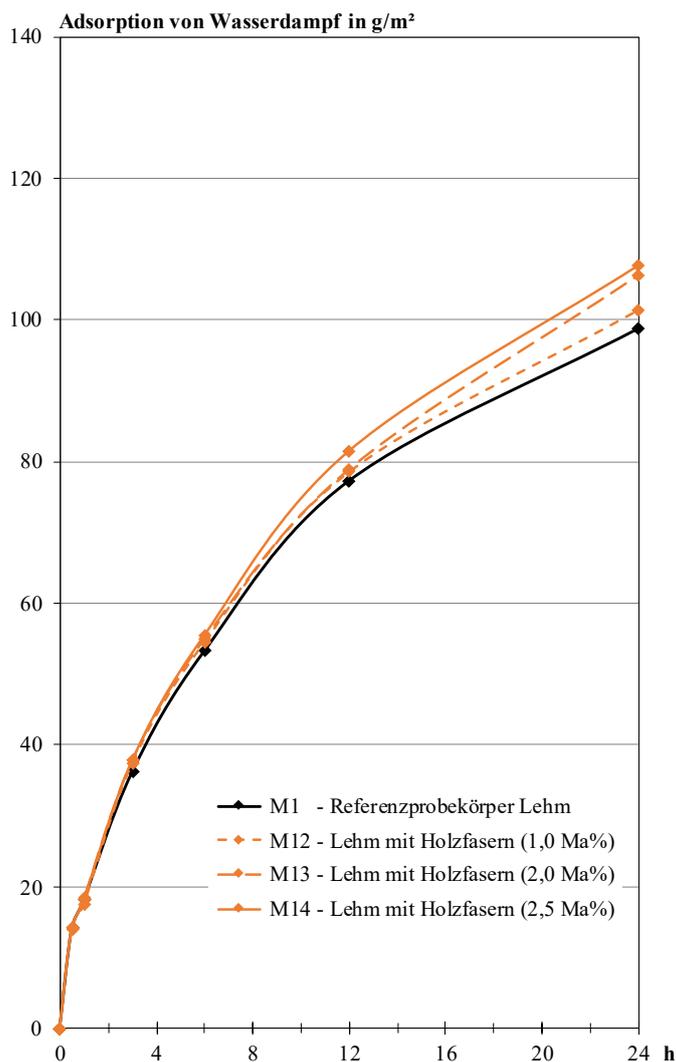


Abb. 5.4: Adsorptionsverhalten der Lehmprobekörper mit 1, 2 und 2,5 Ma% Holzfasern

5.2.2 Absorptionsverhalten

Zur Überprüfung des Absorptionsverhaltens werden die Probekörper bei konstanter Temperatur (hier: 23 °C) unterschiedlichen relativen Luftfeuchtestufen bis zum Erreichen der jeweiligen Gleichgewichtsfeuchte ausgesetzt. Aus den Messergebnissen kann in der Folge der massebezogene Feuchtegehalt errechnet und graphisch in Sorptionsisothermen dargestellt werden. Die Graphen des Diagramms werden zwischen den vorhandenen Werten durch das Programm Excel interpoliert, um möglichst nahe an den tatsächlichen Verlauf zwischen den Messpunkten heranzukommen. Eine ausführliche Beschreibung zur Versuchsdurchführung findet sich in Kapitel 4.5.2.

Das Diagramm in Abbildung 5.5 zeigt die im Rahmen der Versuchsausführung aus den ermittelten Werten erhaltenen Sorptionsisotherme. Die Materialien Kaliwasserglas und Carnaubawachs (Beschichtungen) wurden nicht in die gegenständliche Versuchsreihe aufgenommen, da die Materialien bei der Versuchsdurchführung frei in der Klimakammer liegen und somit allseitig der Feuchteeinwirkung ausgesetzt sind. Die Beschichtungen sind jeweils nur einseitig aufgebracht, weshalb sich bei einer Beprobung der Gleichgewichtsfeuchte kein nennenswerter Unterschied zum

Referenzmaterial einstellen würde.

Beim Startwert von 20 % rel.LF ergibt sich für die Referenzprobekörper ein massebezogener Feuchtegehalt von 0,46 %. Dieser nimmt kontinuierlich (annähernd linear) bis zur Gleichgewichtsfeuchte bei einer relativen Luftfeuchte von 80 % auf einen Wert von 1,38 % zu und steigt im Folgenden auf einen Endwert von 1,81 % bei 90 % rel.LF.

Durch das Beimengen von Holzfasern mit den Masseanteilen von 1, 2 und 2,5 Ma% (M12 bis M14) ergeben sich annähernd deckungsgleiche Isotherme mit jener der Referenzproben. Dies ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass die absolute Feuchtaufnahme der Holzfasern (1, 2 und 2,5 Ma%) verglichen zu jener der Lehmmasse sehr gering ist und sich deshalb keine großen Abweichungen abzeichnen.

Für die Probekörper mit 3 Ma% Kaseinanteil (M7) zeigt sich, dass sich der massebezogene Feuchtegehalt bei 20 % rel.LF bei 0,26 % einstellt. Dies entspricht einer Verringerung von 44 % zum Ausgangswert der Referenzprobekörper. Der massebezogene Feuchtigkeitsgehalt nimmt im Vergleich zu den weiteren Proben schneller zu.

Bei der Sorptionsisotherme der Probekörper mit 4 Ma% Kalkanteil (M9) lässt sich beobachten, dass die beprobten Probekörper gegenüber den Referenzprobekörpern weniger Feuchtigkeit im Bezug auf ihre Trockenmasse aufnehmen können, was bedeutet, dass deren Gleichgewichtsfeuchte unter jener der Referenzprobekörper liegt.

Die Verwendung von Filz führt zu einer erhöhten Feuchtaufnahme bezogen auf die Trockenmasse. Dies ist hauptsächlich auf die höhere Ausgleichsfeuchte des Filzes zurückzuführen (siehe Kapitel 3.2.3). Es lässt sich erkennen, dass die Steigung über den gesamten Graphen hinweg größer ausfällt als jene der Referenzprobekörper und bis zu einer relativen Luftfeuchte von 80 % nahezu linear verläuft. Die Zunahme des massebezogenen Feuchtegehalts bei einer relativen Luftfeuchte von 90 % beträgt gegenüber den Referenzprobekörpern 25 %.

Im Hinblick auf alle dargestellten Sorptionsisotherme lässt sich eine überproportionale Zunahme des massebezogenen Feuchtegehalts ab ca. 80–85 % rel.LF erkennen. Dies ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass es ab diesem Zeitpunkt zu Kondensatbildung in der Klimakammer gekommen ist. Die entsprechenden Tabellenwerte sind der Tabelle A.5 im Anhang zu entnehmen.

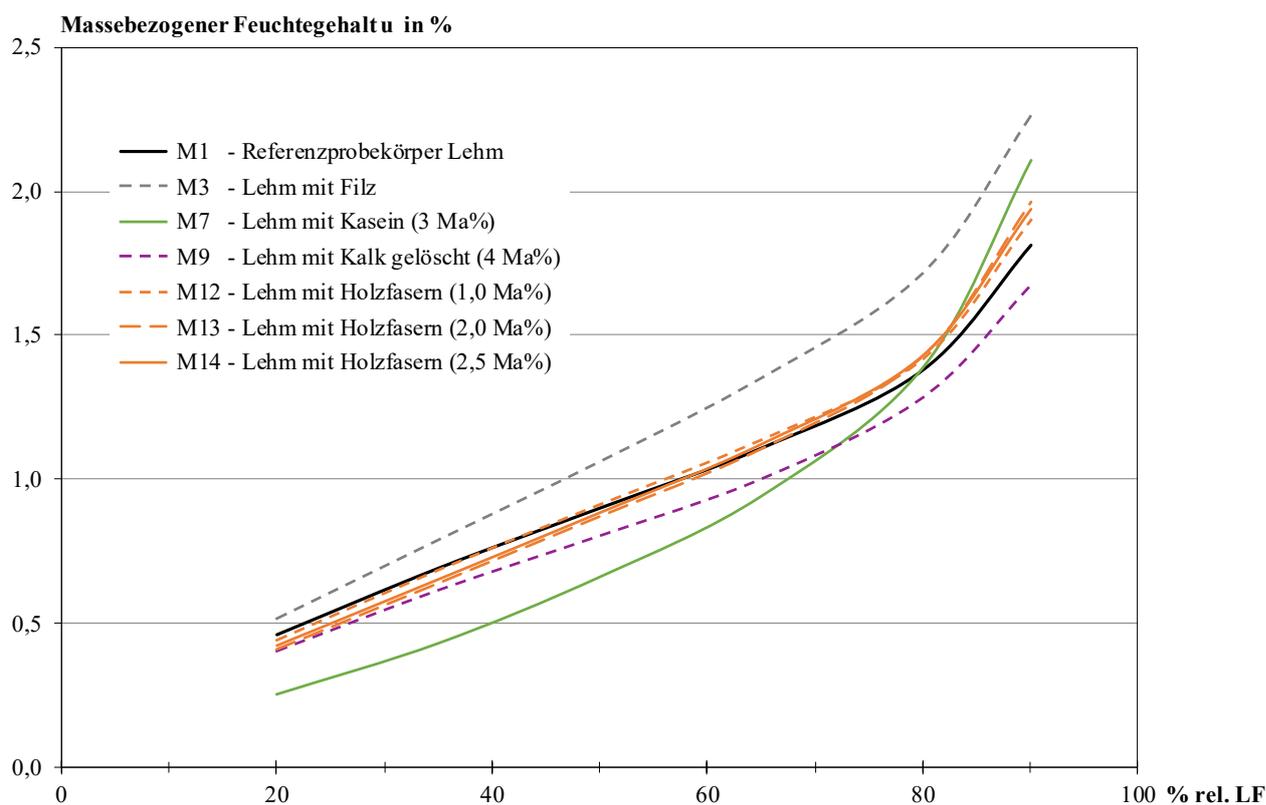


Abb. 5.5: Sorptionsisotherme der beprobten Lehmkörper

5.2.2.1 Sorptionsverhalten in zeitlicher Abhängigkeit

Die nachstehenden Ausführungen beschreiben die Auswertung des Sorptions- und Desorptionsverhaltens der Probekörper in zeitlicher Abhängigkeit, wie in Kapitel 4.5.3 erläutert.

Sorption

Die Abbildung 5.6 zeigt die Sorptionskurven sämtlicher Probekörper der Versuchsreihe in zeitlicher Abhängigkeit, mit Ausnahme jener mit Wasserglas- und Carnaubawachsbeschichtung. Die zugehörigen Tabellenwerte sind der Tabelle A.6 im Anhang zu entnehmen. Während Beschichtungen gute Ergebnisse im Rahmen der Adsorptionsprüfung zeigen, liefert die Prüfung des Sorptions- bzw. Desorptionsverhaltens in zeitlicher Abhängigkeit aufgrund der jeweils einseitig aufgetragenen Beschichtung keine vergleichbaren und aussagekräftigen Ergebnisse.

Beim Vergleich der abgebildeten Sorptionskurven mit den Verläufen aus dem Adsorptionsverhalten ist wie erwartet eine höhere Steigung der Tangente im Anfangsbereich ersichtlich. Dies deutet auf eine generell schnellere Feuchteaufnahme hin, was darauf zurückzuführen ist, dass die Probekörper allseitig einer relativen Luftfeuchtigkeit von 80 % ausgesetzt sind.

Es lässt sich erkennen, dass die Probekörper mit Filz im Vergleich zu den Referenzprobekörpern schneller und mehr Feuchtigkeit aufnehmen. Nach acht Stunden haben diese annähernd ihr gesamtes Feuchteaufnahmevermögen erreicht. Weiters zeigt sich, dass die Differenz zum Endwert der Messreihe (24 Stunden) nicht mehr so stark ausgeprägt ist, wie in Abbildung 5.1. Diese beträgt 14 g/m^2 , was ca. 11 % entspricht (bezogenen auf M1). Anzumerken ist, dass die Probekörper mit Filz beim Endwert eine annähernd horizontale Tangente besitzen, was auf das Erreichen

der Massekonstanz nach 24 Stunden hindeutet. Das frühere Erreichen der Massekonstanz ist zudem auf die Aufteilung der Soll-Bauteildicke von 15 mm zwischen Lehm und Filz gegenüber den anderen Probekörpern zurückzuführen.

Bei den Probekörpern mit Kalk (M9 und M10) ist zu beobachten, dass mit steigendem Kalkgehalt weniger Feuchtigkeit aufgenommen werden kann. Bereits nach zwölf Stunden zeichnet sich bei beiden Massegehalten das Erreichen der Massekonstanz ab. Die Abweichung von M9 zu den Referenzprobekörpern beträgt zum Endwert ca. 14 %, die von M10 sogar 30 %, was einer absoluten Abweichung von 39 g/m^2 entspricht.

Die Sorptionskurven der Probekörper mit 3 Ma% Kasein verlaufen die ersten sechs Stunden annähernd gleich wie die der Referenzprobekörper und können ab ca. sechs Stunden mehr Feuchtigkeit aufnehmen als Reinlehm. Der Verlauf entspricht annähernd jenen Kurven mit geringem Holzfasergehalt (M12 und M13). Interessanterweise verringert ein Kaseinanteil von 1 Ma% die Feuchtaufnahme, woraus eine minimale Abweichung zu den Referenzproben nach 24 Stunden im Ausmaß von 4 % resultiert.

Die Verwendung von Holzfasern in verschiedenen Gehalten führt zu einer erhöhten Feuchtaufnahme bei steigendem Faseranteil. Dieser Trend ist bereits in Abbildung 5.4 zu sehen. Aus dem Diagramm kann zudem abgelesen werden, dass die mit Holzfasern versetzten Probekörper nach 24 Stunden noch nicht ihr gesamtes Feuchtaufnahmevermögen erreicht haben und sich bei 2,5 Ma% Holzfasergehalt eine im Vergleich zu den Referenzproben um 15 % (entspricht 20 g/m^2) erhöhte Feuchtaufnahme einstellt. Dieser Effekt ist vermutlich auf die hygroskopischen Eigenschaften von Holz, beschrieben unter Kapitel 2.6.3, zurückzuführen.

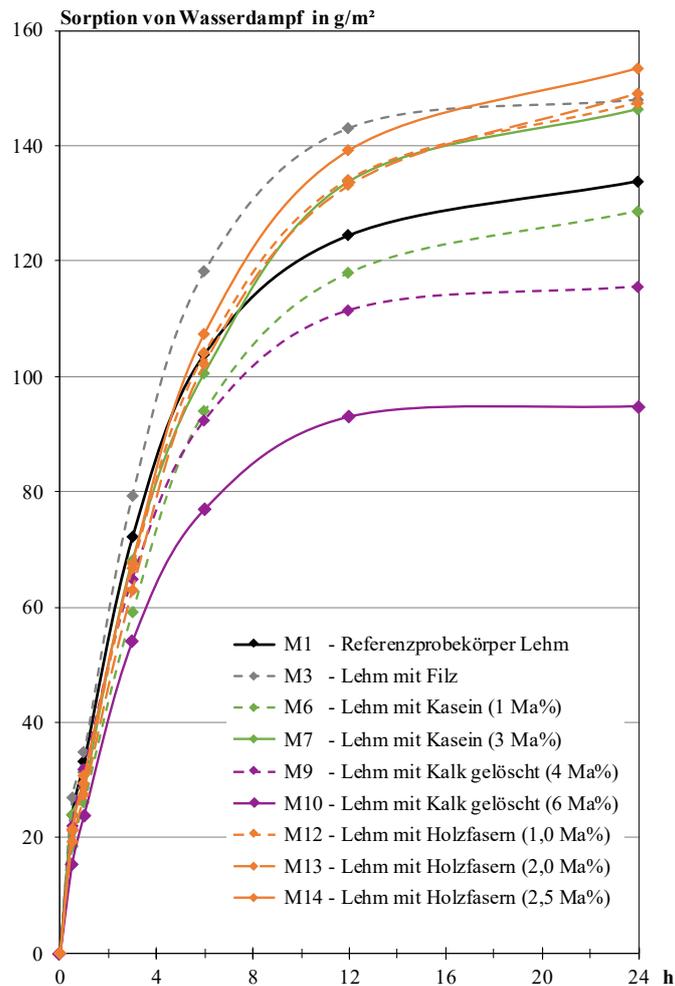


Abb. 5.6: Sorptionsverhalten in zeitlicher Abhängigkeit

Desorption

Bei allen verwendeten Materialien zeigt sich durch das steilere Abfallen der Kurven, dass die Probekörper mehr Feuchtigkeit abgeben als sie im selben Zeitraum aufnehmen (siehe Abbildung 5.7 und die entsprechenden Tabellenwerte in Tabelle A.7). Das Erreichen des Gleichgewichtszustandes stellt sich dadurch bei allen Probekörpern bereits früher (teilweise nach zwölf Stunden) ein. Auf die Referenzprobekörper bezogen, ergibt sich eine Feuchtezunahme von 72 g/m^2 nach drei Stunden, der eine Feuchteabgabe von 94 g/m^2 im selben Zeitraum gegenübersteht. Das Feuchteabgabevermögen ist nach drei Stunden sohin um ca. 30 % höher als das Feuchteaufnahmevermögen der Probekörper aus reinem Lehm.

Es ist jedenfalls festzuhalten, dass für die Praxis bzw. für die Verwendung von Lehmbaustoffen in Gebäuden hauptsächlich das kurzfristige Feuchteaufnahme- und -abgabevermögen relevant ist, was sich in den meisten Fällen (z.B. Duschen, Kochen etc.) auf ein Zeitausmaß von maximal zwei Stunden beschränkt. Bezugnehmend auf die Abbildungen 5.6 und 5.7 ist zu sagen, dass sich alle Probekörper, egal welche Additive zur Anwendung gelangen, in den ersten beiden Stunden annähernd ident verhalten und sich erst über einen längeren Zeitraum größere Differenzen erkennen lassen.

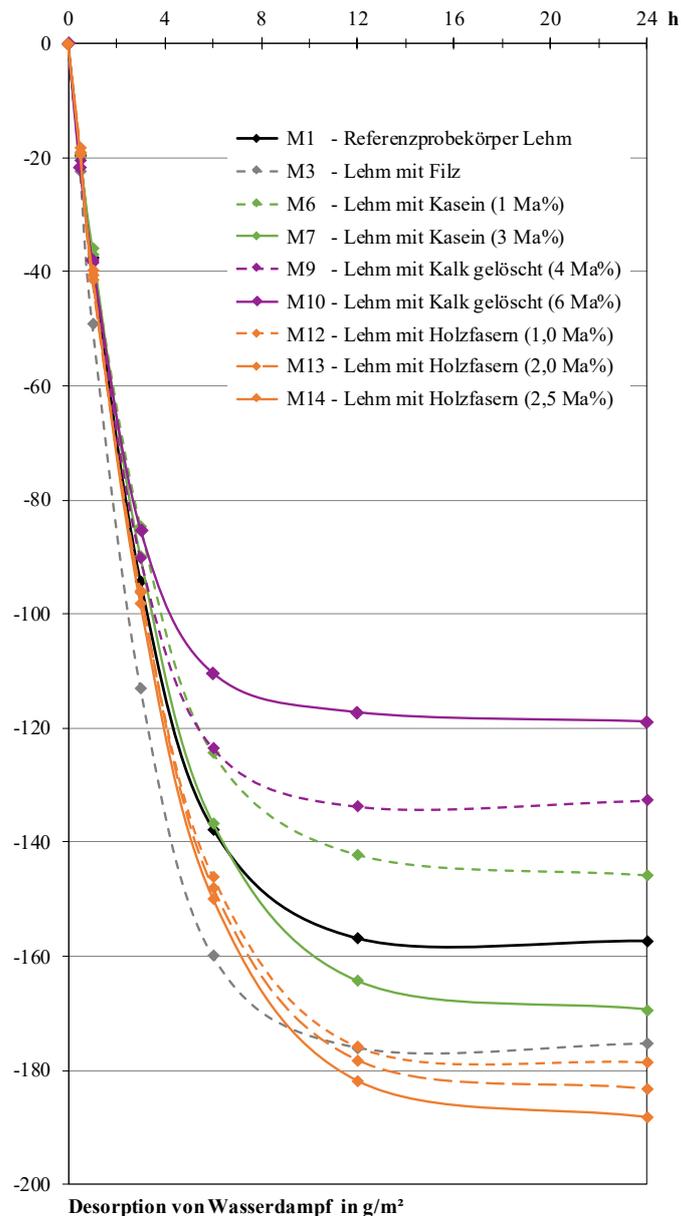


Abb. 5.7: Desorptionsverhalten in zeitlicher Abhängigkeit

Bewertung nach Art der Verdichtung

Um Aussagen über die Auswirkungen der statischen und dynamischen Verdichtung auf das Sorptionsverhalten treffen zu können, sind nachstehend die Messergebnisse der Sorption und Desorption in zeitlicher Abhängigkeit in den Abbildungen 5.8 und 5.9 graphisch dargestellt. Es zeigt sich, dass die statisch verdichteten Probekörper im Endwert (nach 24 Stunden) mehr Feuchtigkeit aufnehmen können als dynamisch verdichtete Probekörper. Dies ist möglicherweise auf die Oberflächenbeschaffenheit der statisch verdichteten Lehmkörper zurückzuführen (siehe Kapitel 4.1.1.2). In den Abbildungen 4.4 und 4.5 zeigt sich bei den dynamisch verdichteten Probekörpern eine deutlich geschlossenerere Oberflächenstruktur. Die prozentuelle Abweichung von dynamisch zu statisch beträgt zum Endwert der Messreihe nach 24 Stunden bei der Sorption 5 %

und bei der Desorption 2%. Es kann daher gesagt werden, dass die Verdichtungsart, vor allem im Anfangsbereich, keine nennenswerten Auswirkungen auf das Sorptions- bzw. Desorptionsverhalten hat. Eine detaillierte Aufstellung der Messwerte ist den Tabellen A.8 und A.9 im Anhang zu entnehmen.

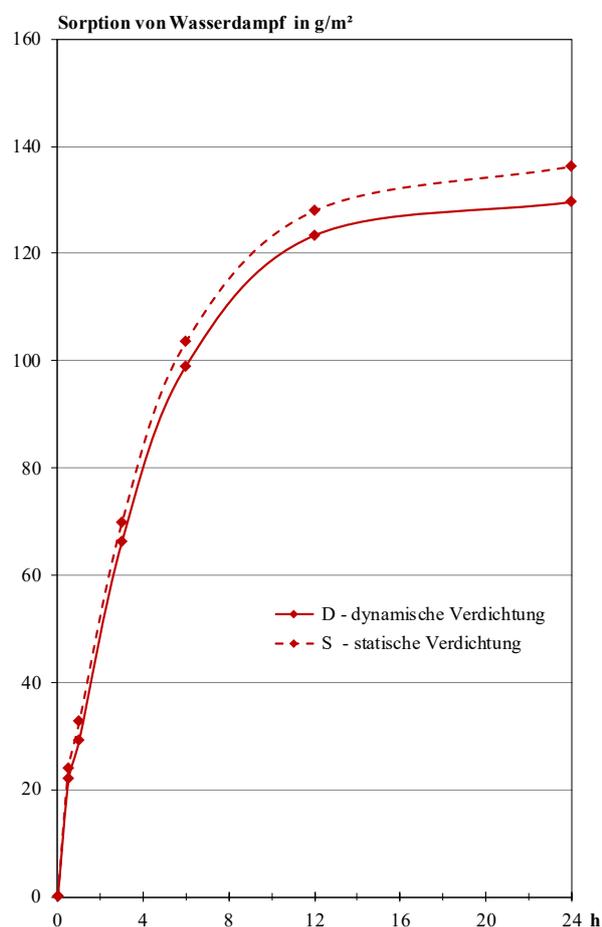


Abb. 5.8: Sorption in zeitlicher Abhängigkeit nach Verdichtungsart

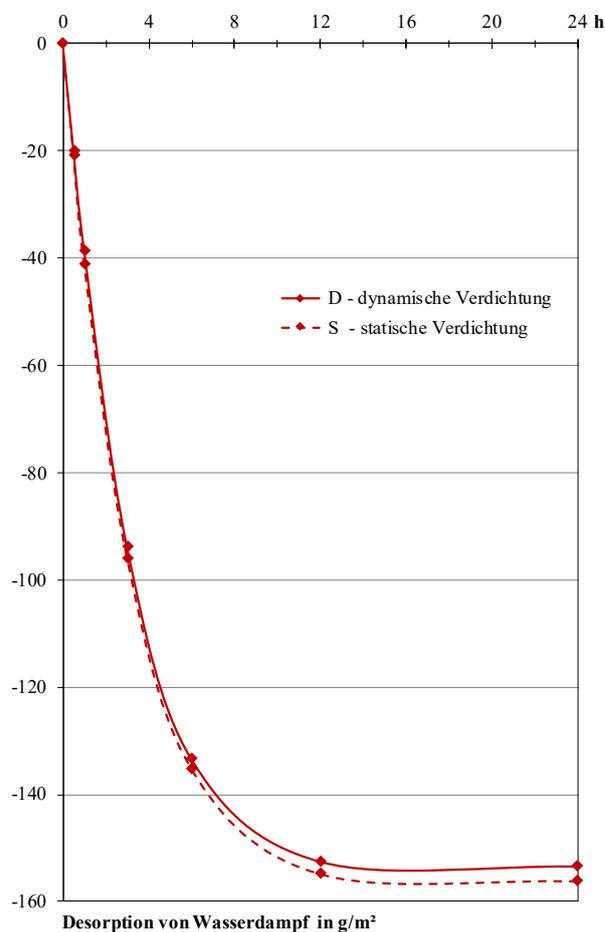


Abb. 5.9: Desorption in zeitlicher Abhängigkeit nach Verdichtungsart

5.2.3 Diffusionsverhalten

Die Untersuchung der Wasserdampfdiffusion erfolgt nach dem Klimakammerverfahren. Die Dampfdruckdifferenz von 1151,20 Pa resultiert aus den unterschiedlichen Dampfdrücken bei einer Luftfeuchtigkeit von 9% in den eingedichteten Probekörpern und der Prüfumgebung von 50% rel.LF bei 23 °C in der Klimakammer. Der genaue Versuchsaufbau ist im Kapitel 4.3 nachzulesen.

5.2.3.1 Beschichtungen

In der nachstehenden Tabelle 5.2 finden sich die im Zusammenhang mit der Prüfung des Diffusionsverhaltens ermittelten Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen sowie die äquivalenten

Luftschichtdicken der Lehmkörper mit den Materialien Filz (M3), Wasserglas (M4) und Carnaubawachs (M5) im Vergleich zum Referenzkörper aus Reinlehm (M1).

Für die Referenzprobekörper ergibt sich eine mittlere Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ von 16,659 bei einer Standardabweichung von 0,502 %. Die mittlere wasserdampfäquivalente Luftschichtdicke beträgt 0,269 m bei einer zugehörigen Standardabweichung von 0,003 m.

Bei den geschichteten Probekörpern Lehm-Filz (gelocht) ergibt sich eine verringerte äquivalente Luftschichtdicke von 0,223 m. Dies entspricht einer Reduktion von 17,3 % zu den Referenzproben. Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl verringert sich ebenso um 16,2 % auf einen Wert von 13,958. Die Abnahme beider Werte ist darauf zurückzuführen, dass die Stärke der Lehmschicht der Probekörper M3 aufgrund der zusätzlichen Unterbringungen der gelochten Filzmatte geringer ausfällt als die der Referenzproben. Des Weiteren kann aufgrund der Beschaffenheit des Filzes davon ausgegangen werden, dass der Filz keinen Diffusionswiderstand aufweist.

Die mit Wasserglas beschichteten Probekörper (M4) weisen einen gegenüber den Referenzproben um 11,2 % erhöhten Diffusionswiderstand auf, für die äquivalente Luftschichtdicke ergibt sich ein Wert von 0,303 m. Zu Versuchszwecken wurde im Vorfeld die Überprüfung zusätzlich an doppelt mit Wasserglas beschichteten Probekörpern durchgeführt. Dabei kam es zu Rissen und zu geringfügigen weißen Verfärbungen in der Beschichtung sowie zu einem geringfügigen Ablösen einzelner Beschichtungsteile (siehe Abbildung 5.10). Allgemein kann angemerkt werden, dass es aufgrund der Diffusionsfähigkeit von Wasserglas nur zu einer geringen Erhöhung des Diffusionswiderstandes kommt. Solange die Beschichtungsstärke nicht zu dick ausfällt, bewirkt die Beschichtung mit Wasserglas eine Stabilisierung der Oberfläche sowie eine Erhöhung der Abriebfestigkeit (Handtest) und der Spritzwasserbeständigkeit.

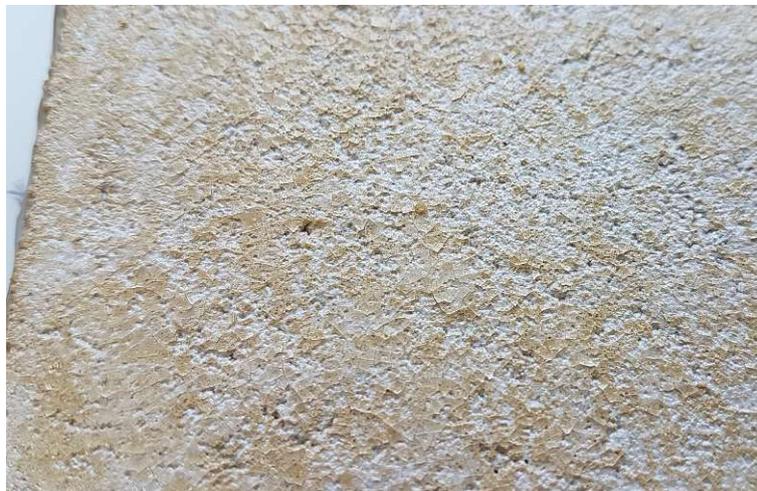


Abb. 5.10: Rissbildung bei doppelter Wasserglasbeschichtung

Die Verwendung von Carnaubawachs führt zu einer Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl von 18,137 ($\Delta_{M5,1} = 8,9\%$), woraus sich eine äquivalente Luftschichtdicke von 0,298 m ergibt. Dies entspricht einer Erhöhung von 10,6 % gegenüber den Referenzprobekörpern.

Tab. 5.2: Vergleich der Ergebnisse der Wasserdampfdiffusion – Beschichtungen

Material	Wasserdampfdiffusions- widerstandszahl μ [-]			Wasserdampfäquivalente Luftschichtdicke s_d [m]		
	\bar{x}_{Mi}	s_{Mi} [%]	$\Delta_{Mi,1}$ [%]	\bar{x}_{Mi}	s_{Mi}	$\Delta_{Mi,1}$ [%]
M1	16,659	0,5018	$\pm 0,0$	0,269	0,0025	$\pm 0,0$
M3	13,958	0,2784	-16,2	0,223	0,0068	-17,3
M4	18,533	0,1195	11,2	0,303	0,0032	12,3
M5	18,137	0,3138	8,9	0,298	0,0074	10,6

- \bar{x}_{Mi} ... Mittelwert aller Proben je Materialkombination ($n_{Mi} = 3$ Proben)
- s_{Mi} ... Standardabweichung über die Grundgesamtheit aller Proben je Materialkombination
- $\Delta_{Mi,1}$... Prozentuelle Abweichung je Materialkombination bezogen auf die Referenzprobekörper

5.2.3.2 Additive

Die Tabelle 5.3 zeigt die Ergebnisaufstellung und Gegenüberstellung für die mit Kasein, Kalk und Holzfasern (in unterschiedlichen Massegehalten) versetzten Probekörper zu den Referenzprobekörpern.

Bei der Verwendung von Kasein ist allgemein zu beobachten, dass sich mit zunehmendem Kaseingehalt die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl leicht erhöht, wobei sie grundsätzlich unter dem Wert der Referenzprobekörper liegt. Beim Kaseingehalt von 1 Ma% (M6) ergibt sich eine Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl von 14,918, was einer Abweichung zu den Referenzproben von 10,5 % entspricht. Die Probekörper M7 mit einem Kaseingehalt von 3 Ma% weisen eine Abweichung von 4,6 % gegenüber den Referenzproben auf, was einem μ -Wert von 15,886 gleichkommt. Die wasserdampfäquivalente Luftschichtdicke von M6 und M7 bewegt sich im Bereich von 0,244 und 0,246 m.

Die mit Löschkalk versetzten Probekörper weisen gegenüber den anderen verwendeten Materialien die größten Abweichungen zu den Referenzprobekörpern auf. Die Diffusionswiderstandszahlen der Probekörper mit 4 und 6 Ma% gelöschtem Kalk liegen in einer Größenordnung zwischen 12,631 und 12,671. Die äquivalente Luftschichtdicke von M9 beträgt 0,211 m, was einer Abweichung von 21,6 % zu den Referenzprobekörpern entspricht. Mit zunehmendem Kalkgehalt zeigt sich eine Verringerung des s_d -Wertes auf 0,198 m ($\Delta_{M10,1} = 26,5$ %). Entgegen Abbildung 2.3 nimmt in der vorliegenden Versuchsreihe, wie bereits beschrieben, die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl ab. Im gegenständlichen Fall kann die Abnahme darauf zurückzuführen sein, dass der μ -Wert sehr stark von der Bauteildicke, der Porosität bzw. Porenstruktur und somit auch von der Rohdichte eines Materials abhängt. Wie im Kapitel 5.1 ausgeführt, sind die Rohdichten von mit Kalk versetzten Probekörpern im Vergleich zu den Referenzprobekörpern niedriger und die Probekörper in ihrer Gesamtstruktur spröder. Dieser Umstand steht wiederum im Einklang mit dem höheren Diffusionsvermögen.

Wie in Kapitel 5.1 beschrieben, sinkt mit zunehmenden Holzfaserteil die Rohdichte. Mit Blick auf Abbildung 2.3 und den „vorsichtigen“ Vergleich der Materialien Stroh und Holzfasern im

Bezug auf deren hygroskopische Eigenschaften bzw. deren Faserstruktur kann darauf geschlossen werden, dass sich die Diffusionswiderstandszahl unter jener der Referenzprobekörper befindet. Dies konnte im Rahmen der zugrundeliegenden Prüfung, wie in Tabelle 5.3 ersichtlich, gezeigt werden. Beim Vergleich der Probekörper mit Holzfasern untereinander ist kein eindeutiger Trend einer Zu- oder Abnahme erkennbar, was einerseits an etwaigen Messungenauigkeiten im Rahmen der Versuchsdurchführung liegen kann, andererseits könnte ein möglicher Grund das zu knappe Beieinanderliegen der Faseranteile der Probekörper M13 und M14 sein. Für die Probekörper M12 ergibt sich eine Dampfdiffusionswiderstandszahl von 15,562. Der s_d -Wert von M12 von 0,270 m kann aufgrund der geringen Abweichung von 0,2 % als gleichwertig zu M1 gesehen werden. Generell geht eine Abnahme der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl mit einer Verringerung der äquivalenten Luftschichtdicke einher. Aus der Tabelle 5.3 kann abgelesen werden, dass dies bei den Probekörpern M12 bis M14 nicht der Fall ist, was vermutlich auf Messungenauigkeiten, insbesondere der Probekörperdicke, während der Prüfung basiert. Die Dicke der Probekörper geht bei der Ermittlung des Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizienten in die Berechnung ein und ist somit indirekt in der Diffusionswiderstandszahl enthalten. Der s_d -Wert bleibt deshalb von Messungenauigkeiten der Abmessungen unberührt.

An dieser Stelle wird ergänzend angemerkt, dass die vorzeichenbehafteten prozentuellen Abweichungen des Mittelwerts aller Probekörper zum Referenzmittelwert keine Aussage über eine Verbesserung bzw. Verschlechterung der Materialeigenschaften liefern. Sie geben lediglich an, ob die Mittelwerte als Zahlenwerte sinken oder steigen. Unabhängig von der Größenordnung gibt es generell für jeden Einsatzbereich ein individuelles Anforderungsprofil, welches es zu beachten gilt. Dies gilt ebenso für die in Kapitel 5.2.4 in den Tabellen 5.4 bis 5.6 angeführten Abweichungen.

Tab. 5.3: Vergleich der Ergebnisse der Wasserdampfdiffusion – Additive

Material	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ [-]			Wasserdampfäquivalente Luftschichtdicke s_d [m]		
	\bar{x}_{Mi}	s_{Mi} [%]	$\Delta_{Mi,1}$ [%]	\bar{x}_{Mi}	s_{Mi}	$\Delta_{Mi,1}$ [%]
M1	16,659	0,5018	$\pm 0,0$	0,269	0,0025	$\pm 0,0$
M6	14,918	0,4816	-10,5	0,246	0,0095	-8,8
M7	15,886	0,9895	-4,6	0,244	0,0111	-9,4
M9	12,631	0,2369	-24,2	0,211	0,0061	-21,6
M10	12,671	0,1480	-23,9	0,198	0,0013	-26,5
M12	15,562	0,3906	-6,6	0,270	0,0071	0,2
M13	15,853	0,6281	-4,8	0,280	0,0103	4,1
M14	15,684	0,2653	-5,9	0,279	0,0010	3,6

- \bar{x}_{Mi} ... Mittelwert aller Proben je Materialkombination ($n_{Mi} = 3$ Proben)
- s_{Mi} ... Standardabweichung über die Grundgesamtheit aller Proben je Materialkombination
- $\Delta_{Mi,1}$... Prozentuelle Abweichung je Materialkombination bezogen auf die Referenzprobekörper

5.2.4 Wärmeleitfähigkeit

Zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit λ wurde, wie unter Kapitel 4.4 beschrieben, das Heizdrahtverfahren angewendet. Beim Heizdrahtverfahren wird der Wärmeabfluss in das Bauteil gemessen und daraus die Wärmeleitfähigkeit bestimmt. Die Überprüfung dient hauptsächlich dem Vergleich der verwendeten Materialien untereinander und ist bei vielversprechenden Ergebnissen durch weiterführende Prüfungen exakter zu bestimmen.

5.2.4.1 Beschichtungen und Schichtbauteile

Um eine Aussage bei geschichteten Bauteilen treffen zu können, wird der Wärmedurchlasswiderstand herangezogen. Der Wärmedurchlasswiderstand R einer Schicht ergibt sich mittels Division der Bauteildicke durch deren Wärmeleitfähigkeit. Bei mehrschichtigen Bauteilen können die einzelnen Schichtwiderstände addiert werden. Beschichtungen haben keine wesentlichen Auswirkungen auf die Wärmeleitfähigkeit und sind grundsätzlich als Schichtbauteile zu betrachten. Durch den Umstand, dass die Schichtstärke von Beschichtungen im Vergleich zum Lehmkörper vernachlässigbar gering ist, würde der Wärmedurchlasswiderstand jenem der Referenzproben gleichen. Aus diesem Grund wurden die Beschichtungen Wasserglas und Carnaubawachs in der nachfolgenden Tabelle 5.4 nicht angeführt.

Die Probekörper Lehm mit Filz (M3) werden im Rahmen dieser Prüfung als Schichtbauteil behandelt und durch den Wärmedurchlasswiderstand mit den Referenzproben verglichen. Für die Referenzproben ergibt sich eine Wärmeleitfähigkeit von 1,575 W/mK und ein Wärmedurchlasswiderstand von 0,010 m² K/W. Für das Ausgangsmaterial Filz ergibt sich eine Wärmeleitfähigkeit von 0,058 W/mK, was, wie in Kapitel 2.6.1 beschrieben, eine Einstufung als Dämmstoff erlaubt. Für die Probekörper M3 ergibt sich somit ein Wärmedurchlasswiderstand von 0,076 m² K/W (ohne Berücksichtigung der Stanzung), welcher mit einer Abweichung von 633,6% um ca. das Sechsfache höher ist als jener der Referenzproben.

Tab. 5.4: Vergleich wärmetechnisches Verhalten – Lehm und Filz

Material	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]			Wärmedurchlasswiderstand R [m ² K/W]		
	\bar{x}_{Mi}	s_{Mi}	$\Delta_{Mi,1}$ [%]	\bar{x}_{Mi}	s_{Mi}	$\Delta_{Mi,1}$ [%]
M1	1,575	0,102	$\pm 0,0$	0,010	$4,27 \cdot 10^{-4}$	$\pm 0,0$
Filz	0,058	0,002	-96,3	0,068	$6,60 \cdot 10^{-3}$	559,7
M3	–	–	–	0,076	$6,48 \cdot 10^{-3}$	633,6

\bar{x}_{Mi} ... Mittelwert aller Proben je Materialkombination ($n_{Mi} = 3$ Proben)

s_{Mi} ... Standardabweichung über die Grundgesamtheit aller Proben je Materialkombination

$\Delta_{Mi,1}$... Prozentuelle Abweichung je Materialkombination bezogen auf die Referenzprobekörper

5.2.4.2 Additive

Die im Bezug auf die beprobten Lehmkörper mit Additiven ermittelten Werte der Wärmeleitfähigkeit sind der nachstehenden Tabelle 5.5 zu entnehmen. Um weiterführende Vergleiche anstellen zu können, sind neben der Wärmeleitfähigkeit zusätzlich die ermittelten Werte der Wärmedurchlasswiderstände angeführt.

Aus der Erhöhung des Kaseianteils (M6 und M7) resultiert eine Verringerung der Wärmeleitfähigkeit. Bei einem Kaseingehalt von 3 Ma% ergibt sich ein λ -Wert von 0,857 W/mK, was einer Abnahme gegenüber den Referenzprobekörpern von 45,6 % entspricht. Dies kann auf den Unterschied der Rohdichten, siehe Tabelle 5.1, zurückgeführt werden.

Die Probekörper aus Kalk sind, wie bereits ausgeführt, in ihrer Struktur sehr spröde und weisen eine im Vergleich zu den Referenzproben deutlich verminderte Rohdichte auf. Aufgrund dessen verzeichnet sich mit zunehmendem Anteil an Löschkalk wiederum eine Abnahme der Wärmeleitfähigkeit. Bei einem Anteil von 4 Ma% Kalk (M9) ergibt sich ein λ -Wert von 0,971 W/mK, was einer Verringerung zu M1 von 38,4 % entspricht. Die Beimengung von 6 Ma% Kalk (M10) führt zu einer Abweichung der Wärmeleitfähigkeit von 44,6 %.

Wie zu erwarten, führt auch die Zugabe von Holzfasern zu einer Verringerung der Wärmeleitfähigkeit. Dies ist neben der Rohdichte auf die generell niedrigere Wärmeleitzahl von Holz zurückzuführen. Während die Beimischung von 1 Ma%-Holzfasern (M12) nur sehr geringe Auswirkungen (im Vergleich zu den Referenzproben) auf die Wärmeleitfähigkeit zeigt, beträgt die Abweichung bei einem Anteil von 2,5 Ma% Holzfasern (M14) 16,4 %, was einem λ -Wert von 1,317 W/mK entspricht.

Tab. 5.5: Vergleich wärmetechnisches Verhalten – Additive

Material	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]			Wärmedurchlasswiderstand R [m ² K/W]		
	\bar{x}_{Mi}	s_{Mi}	$\Delta_{Mi,1}$ [%]	\bar{x}_{Mi}	s_{Mi}	$\Delta_{Mi,1}$ [%]
M1	1,575	0,102	$\pm 0,0$	0,010	$4,27 \cdot 10^{-4}$	$\pm 0,0$
M6	1,022	0,023	-35,1	0,016	$3,39 \cdot 10^{-4}$	56,6
M7	0,857	0,062	-45,6	0,018	$1,55 \cdot 10^{-3}$	75,4
M9	0,971	0,026	-38,4	0,017	$2,89 \cdot 10^{-4}$	75,4
M10	0,872	0,007	-44,6	0,018	$7,82 \cdot 10^{-5}$	74,0
M12	1,452	0,026	-7,8	0,012	$2,12 \cdot 10^{-4}$	16,0
M13	1,357	0,006	-13,9	0,013	$4,64 \cdot 10^{-5}$	26,5
M14	1,317	0,019	-16,4	0,014	$3,76 \cdot 10^{-4}$	31,3

- \bar{x}_{Mi} ... Mittelwert aller Proben je Materialkombination ($n_{Mi} = 3$ Proben)
- s_{Mi} ... Standardabweichung über die Grundgesamtheit aller Proben je Materialkombination
- $\Delta_{Mi,1}$... Prozentuelle Abweichung je Materialkombination bezogen auf die Referenzprobekörper

5.2.4.3 Wärmetechnisches Verhalten nach Art der Verdichtung

Um Aussagen betreffend die Auswirkungen der statischen und dynamischen Verdichtung auf das wärmetechnische Verhalten treffen zu können, sind nachstehend die Messergebnisse der Wärmeleitfähigkeit bzw. des Wärmedurchlasswiderstandes in Tabelle 5.6 dargestellt. Für die statisch verdichteten Probekörper ergibt sich eine geringe Abweichung der Wärmeleitfähigkeit von 9,4 % gegenüber den dynamisch verdichteten Probekörpern. Die Abnahme ist möglicherweise in der minimal niedrigeren Rohdichte der statisch verdichteten Lehmkörper begründet (siehe Tabelle 5.1).

Tab. 5.6: Vergleich wärmetechnisches Verhalten – nach Verdichtungsart

Material	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]			Wärmedurchlasswiderstand \mathbf{R} [m ² K/W]		
	$\bar{x}_{D/S}$	$s_{D/S}$	$\Delta_{S,D}$ [%]	$\bar{x}_{D/S}$	$s_{D/S}$	$\Delta_{S,D}$ [%]
D	1,741	0,021	$\pm 0,0$	0,009	$1,05 \cdot 10^{-4}$	$\pm 0,0$
S	1,578	0,021	-9,4	0,011	$2,25 \cdot 10^{-4}$	14,5

$\bar{x}_{D/S}$... Mittelwert aller Proben je Verdichtungsart ($n_{Mi} = 3$ Proben)

$s_{D/S}$... Standardabweichung über die Grundgesamtheit aller Proben je Verdichtungsart

$\Delta_{S,D}$... Prozentuelle Abweichung aller Proben der statischen Verdichtung bezogen auf die dynamische Verdichtung

5.3 Resümee

Lehm weist in seiner Reinform bereits umfassend positive Eigenschaften auf. Die Verwendung von Filz in Kombination mit Lehm liefert im Zusammenhang mit allen im Rahmen dieser Diplomarbeit durchgeführten bauphysikalischen Untersuchungen durchwegs gute Resultate im Hinblick auf das wärme- und feuchtetechnische Verhalten. Durch die Eigenschaft von Filz, Feuchtigkeit aus der Luft aufzunehmen und diese wieder abgeben zu können, zeigt sich im Zuge der Überprüfung des Adsorptionsvermögens eine deutlich erhöhte Feuchteaufnahme. Dieses Verhalten spiegelt sich genauso in den weiteren sorptionsbezogenen Prüfungen wider. Um das Anwendungsspektrum von Lehmbaustoffen mit Filz zu erweitern, kann angedacht werden, den Filz als Oberflächenfinish zu sehen und auf Sicht zu belassen. Daraus würden ein großes Oberflächengestaltungspotenzial sowie eine enorme Erweiterung der Einsatzbereiche resultieren. Zudem kann zusätzlich die luftschalldämpfende Wirkung von Filz gewinnbringend eingesetzt werden. Um das volle Potenzial der Lehm-Filz-Verbindung ausschöpfen zu können, werden weiterführende Untersuchungen empfohlen.

Es hat sich zudem herausgestellt, dass auch die Beimengung von Holzfasern mit 1, 2 und 2,5 Ma%-Anteilen die bauphysikalischen Eigenschaften positiv beeinflusst. Wie erwartet hat sich gezeigt, dass die Verwendung von Holzfasern zu einer Abnahme der Wärmeleitfähigkeit und somit zu einer Erhöhung der „Dämmwirkung“ führt. Zusätzlich bewirkt die Zugabe von Holzfasern eine, wenn auch minimale, Verringerung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes.

Lehm ist dafür bekannt, dass er ein gutes Feuchteaufnahme- und -abgabevermögen besitzt und somit Luftfeuchtigkeitsspitzen gut „abfedern“ kann. Da diese Luftfeuchtigkeitsspitzen meist nicht länger als zwei Stunden auftreten, ist im Rahmen einer Betrachtung bzw. Überprüfung hauptsächlich dieser Bereich relevant. Zum Sorptions- bzw. Desorptionsverhalten kann allgemein, mit Ausnahme von Filz, über alle Probekörper gesagt werden, dass sich die Kurven im Anfangsbereich nahezu kongruent verhalten, was den Schluss zulässt, dass die Beimengung der ausgewählten Additive und das Aufbringen der betreffenden Beschichtungen im Hinblick auf eine kurzzeitige Feuchteaufnahme und -abgabe nahezu obsolet sind.

Die Verwendung der Beschichtungen Carnaubawachs und Kaliwasserglas wirkt sich, obwohl beide in der Anwendung als diffusionsoffen beschrieben werden, in einer leichten Erhöhung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes aus. Aufgrund einer etwaigen Beeinträchtigung der Oberflächenbeschaffenheit (Rissbildung und sprödes Materialverhalten) im Fall von Kaliwasserglas lässt sich alternativ eine Empfehlung zur Verwendung von Carnaubawachs aussprechen. Grundsätzlich wird von der Verwendung von Kaliwasserglas als Beschichtung jedoch abgeraten. Sollte dennoch der Einsatz von Wasserglas in Kombination mit Lehm gewünscht sein, wird die Verwendung von Lithiumwasserglas empfohlen, wobei diesbezüglich weitere Untersuchungen anzustellen sind.

Die Wärmedämmfähigkeit kann durch die Beimengung aller Additive mit unterschiedlichen Masseanteilen durchwegs verbessert werden, wobei die Additive Kasein und Kalk die besten Ergebnisse erzielen. Allgemein kommt der Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen im Hinblick auf eine Anwendung im Trockenbau jedoch eine untergeordnete Rolle gegenüber dem feuchtetechnischen Verhalten zu.

Im Hinblick auf die untersuchten Materialien ist anzumerken, dass keine generelle Aussage darüber getroffen werden kann, ob die Materialeigenschaft in Bezug auf die bauphysikalischen Eigenschaften verbessert oder verschlechtert wird. Vielmehr ist auf den jeweiligen Einsatzbereich und das vorherrschende Anforderungsprofil Rücksicht zu nehmen, um die Materialien und deren

Kombinationen optimal einsetzen zu können. Kalk stellt sich als sehr spröde heraus, was darauf schließen lässt, dass sich damit zusammenhängend die mechanischen Eigenschaften verschlechtern. Bei Kasein besteht generell eine erhöhte Gefahr von Schimmelbildung. Es erscheint jedenfalls nicht sinnvoll, die Materialien Kalk und Kasein dem Lehm ohne zusätzliche materialoptimierende Komponenten beizufügen. Diesbezüglich sind weiterführende Untersuchungen durchzuführen. Betreffend einer etwaigen Anwendung im Trockenbau ist anzumerken, dass die erstellten Probekörper bzw. deren Rohdichten und somit deren Flächengewicht grundsätzlich zu hoch erscheinen, was einer einfachen Bearbeitung und Montage von etwaigen plattenförmigen Lehmbaustoffen entgegensteht. Zusätzlich zu den bauphysikalischen Eigenschaften ist es jedenfalls erforderlich, parallel mechanische Überprüfungen anzustellen und diese einer gemeinsamen und umfassenden Betrachtung zu unterziehen.

Literatur

- [1] H. Schroeder. *Lehmbau: Mit Lehm ökologisch planen und bauen*. Bd. 3. Springer Verlag, 2018. ISBN: 978-3658-23120-0.
- [2] Energieinstitut Vorarlberg (EIV). *Lehm als Baustoff*. 2020. URL: <https://www.energieinstitut.at/buerger/bauen-sanieren/oekologisch-bauen/oekologisch-bauen-wegweiser-fuer-kostenbewusste-bauleute/oekologisch-bauen-die-relevanten-themen-von-a-bis-z/lehm/> (Zugriff am 13.07.2022).
- [3] C. Wannerer. „Lehmbau in Österreich - Ein Netzwerk im Werden“. Masterarbeit. Technische Universität Wien, 2019.
- [4] Bundesverband Geothermie e.V. *Lehm*. 2020. URL: <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/1/lehm.html> (Zugriff am 15.07.2022).
- [5] G. Minke. *Handbuch Lehm*. Ökobuch Verlag, 2017. ISBN: 978-3-936896-41-1.
- [6] F. Volhard und U. Röhlen. *Lehmbau Regeln*. Bd. 3. Vieweg+Teubner, 2009. ISBN: 978-3-8348-0189-0.
- [7] Projekt Hypersoil - Universität Münster. *Bodenhorizonte und Bodenprofil*. URL: <https://hypersoil.uni-muenster.de/0/04/p/p06.htm> (Zugriff am 16.07.2022).
- [8] C. Janson. „Materialforschung Stampflehm: ein Beitrag zur Weiterentwicklung des Baustoffes Stampflehm“. Dissertation. Technische Universität Berlin, 2013.
- [9] *DIN 18196:2011 05: Erd- und Grundbau - Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Mai 2011.
- [10] A. Rischaneck. „Sicherheitskonzept für den Lehmsteinbau“. Dissertation. Technische Universität Wien, 2009.
- [11] D. Schubert. „Neue Werkstoffe aus Ton, Faserstoffen und Bindemitteln durch Preß- und Aufbauagglomeration“. Dissertation. Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2003.
- [12] M. Heinrich und I. Wimmer-Frey. *Zur Geologie der Ton- und Lehmvorkommen Niederösterreichs*. Forschungsber. Amt der NÖ Landesregierung in Zusammenarbeit mit der Geologischen Bundesanstalt, dem Forum mineralische Rohstoffe und dem Fachverband Steine-Keramik der WKO, 2009. 11 S.
- [13] Netzwerk Lehm e.V. *Geschichte des Lehmbaus*. 2022. URL: <http://netzwerklehm.at/lehm/geschichte/> (Zugriff am 25.08.2022).
- [14] C. Smekal. *Europäisches Bauhaus - Lehm aus Vorarlberg fürs nachhaltige Leben*. 2021. URL: <https://orf.at/stories/3229807/> (Zugriff am 21.07.2022).
- [15] ARGE Lehm - BOKU, Institut für Angewandte Geologie (IAG). *Arbeitsgemeinschaft zu Lehm als kulturelles Erbe in Österreich mit den Zielsetzungen der Erhaltung, Fortbildung und Forschung*. 2022. URL: <https://lehm.boku.ac.at/lehm-baukataster/> (Zugriff am 21.07.2022).
- [16] National Oceanic and Atmospheric Administration. *BAMS report: Record-high greenhouse gases, sea levels in 2021*. Forschungsber. NOAA National Oceanic und Atmospheric Administration, 2022. 1 S.

- [17] United Nations Environment Programme. *2020 Global Status Report For Buildings and Construction*. Forschungsber. United Nations Environment Programme, 2020. 12 S.
- [18] United Nations Environment Programme. *2021 Global Status Report For Buildings and Construction*. Forschungsber. United Nations Environment Programme, 2021. 19 S.
- [19] U. Röhlen und C. Ziegert. *Lehmbau-Praxis*. Beuth Verlag GmbH, 2020. ISBN: 978-3-410-29122-0.
- [20] F. Grimm, S. Pfoh und P. Schneider. *Leitfaden 01 Ökologische Kenndaten Baustoffe und Bauteile*. Forschungsber. Projektplattform Energie Bayerischer Bauindustrieverband e.V. in Kooperation mit der TU München, 2015. 33 S.
- [21] J. A. Blaschek. „Ausgerechnet Lehm - Praktische Perspektiven für den Lehm in Österreich“. Masterarbeit. Technische Universität Wien, 2015.
- [22] F. Nienaber, K. Rewitz, P. Seiwert und D. Müller. *Einfluss der Luftfeuchte auf den Menschen und seine Gesundheit*. Forschungsber. RWTH Aachen University, 2021. 36 S.
- [23] OECD Nuclear Energy 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.
- [24] M. Lindenmann, H.-P. Leimer und C. Rusteberg. *Möglichkeiten und Grenzen der Abschirmwirkung von Gebäuden gegen elektromagnetische Wellen*. In: *Ganzheitliche Bauwerkssanierung und Bauwerkserhaltung nach WTA, WTA-Schriftenreihe H.28, S. 101-116*. Forschungsber. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege, 2006. 16 S.
- [25] P. Pauli und D. Moldan. *Reduzierung hochfrequenter Strahlung im Bauwesen - Baustoffe und Abschirmmaterialien*. Forschungsber. Universität der Bundeswehr München, 2003. 60 S.
- [26] *DIN 18948:2018 12: Lehmplatten - Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Dez. 2018.
- [27] U. Schneider, M. Schwimann und H. Bruckner. *Lehmbau. Konstruktion; Baustoffe und Bauverfahren; Prüfungen und Normen; Rechenwerte*. Werner-Verlag Düsseldorf, 1996. ISBN: 3-8041-3454-8.
- [28] *DIN 4108-4:2020 11: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Nov. 2020.
- [29] LUMITOS AG. *Chemie.de - Sorption*. 2022. URL: <https://www.chemie.de/lexikon/Sorption.html> (Zugriff am 28. 10. 2022).
- [30] E. Streit. „Herstellung und Charakterisierung von Verbundwerkstoffen aus Lehm und Naturfasern sowie natürlichen Zusätzen“. Masterarbeit. Universität für Bodenkultur Wien, 2018.
- [31] F. Volhard. *Lehmausfachung und Lehmputze: Untersuchung historischer Strohlehme*. Fraunhofer IRB Verlag, 2010. ISBN: 978-3-8167-8119-6.
- [32] *DIN EN ISO 12571:2013-12: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Dez. 2013.
- [33] Andreas Zöchbauer GmbH. *Flachsgewebe*. 2022. URL: <https://www.lehmputze.at/index.php/produkte-leistungen/putztraeger-armierung/134-flachsgewebe> (Zugriff am 28. 07. 2022).

- [34] Manufactum GmbH. *Filzeinlage Schafwolle*. 2022. URL: <https://www.manufactum.at/filzeinlage-schafwolle-a26485/> (Zugriff am 28. 07. 2022).
- [35] Villgrater Natur GmbH & Co KG. *Die Schafwollfaser - der natürliche Feuchtigkeitsspeicher*. 2022. URL: <http://www.woolin.at/schafwollfaser/> (Zugriff am 30. 10. 2022).
- [36] Kreidezeit Naturfarben GmbH. *Kaseingrundierung*. 2022. URL: <https://www.kreidezeit.de/wp-content/uploads/Kaseingrundierung.pdf> (Zugriff am 28. 07. 2022).
- [37] Baunit GmbH. *Baunit Sumpfkalk*. 2022. URL: https://baunit.at/files/at/pdf_files/pdbl_sumpfkalk.pdf (Zugriff am 28. 07. 2022).
- [38] STEICO SE. *Holzfasern Einblasdämmung*. 2022. URL: <https://www.steico.com/de/produkte/daemmung/gefachdaemmung/einblasdaemmung/steicozell#characteristics> (Zugriff am 28. 07. 2022).
- [39] Quarzwerke Österreich GmbH. *Wasserglas*. 2022. URL: <https://www.quarzwerke.at/wasserglas/#:~:text=Der%20Terminus%20Wasserglas%20bezeichnet%20aus,Abk%C3%BChlung%20zu%20einem%20Pulver%20vermahlen.> (Zugriff am 30. 10. 2022).
- [40] Kreidezeit Naturfarben GmbH. *Kaliwasserglas*. 2022. URL: <https://www.kreidezeit.de/wp-content/uploads/Kaliwasserglas.pdf> (Zugriff am 28. 07. 2022).
- [41] Kreidezeit Naturfarben GmbH. *Carnaubawachs Emulsion*. 2022. URL: <https://www.kreidezeit.de/wp-content/uploads/Carnaubawachs-Emulsion-Konzentrat.pdf> (Zugriff am 28. 07. 2022).
- [42] *DIN 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.
- [43] *ISO 12570:2000 (E): Hygrothermal Performance of Building Materials and Products-Determination of Moisture Content by Drying at Elevated Temperature*. International Standardization Organization Geneva, Switzerland, März 2000.
- [44] LUMITOS AG. *Chemie.de - Holz*. 2022. URL: https://www.chemie.de/lexikon/Holz.html#Thermische_Eigenschaften (Zugriff am 11. 10. 2022).
- [45] *DIN EN ISO 12572:2017-05: Wärme-und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten-Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit - Verfahren mit einem Prüfgefäß*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Mai 2017.
- [46] Universität für Bodenkultur Wien. *Monatsübersicht Wetterstation BOKU-Met*. 2022. URL: <https://meteo.boku.ac.at/wetter/mon-archiv/2021/202108/202108.html>; <https://meteo.boku.ac.at/wetter/mon-archiv/2021/202109/202109.html> (Zugriff am 10. 10. 2022).
- [47] *DIN EN 12664:2001-05: Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten-Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Mai 2001.
- [48] Institut für Hochbau und Technologie - Zentrum für Bauphysik und Bauakustik, TU Wien. *Laborübung Bauphysik 1 - Laborteil - Studienunterlagen*. Studienunterlagen. 2007.
- [49] Scientific*Gear. *Measure Thermal Conductivity with the QTM500*. 2022. URL: <https://www.scientificgear.com/thermal/thermal-conductivity> (Zugriff am 13. 10. 2022).

Literaturverweis zur parallelen Untersuchung der mechanischen Eigenschaften:

- (1) P. Ender. „Mechanische Untersuchung von Lehm mit Additiven und natürlichen Rohstoffen als Armierung“. Masterarbeit. Technische Universität Wien, 2022.

A Anhang

Tab. A.1: Tabellenwerte zur Abbildung 5.1: Adsorption M3 bis M5

Zeit [h]	Feuchteaufnahme kumuliert [g/m ²]			
	M1	M3	M4	M5
0	0	0	0	0
0,5	14,12	24,15	13,40	12,46
1	18,17	30,52	17,61	15,76
3	36,19	56,80	36,30	33,63
6	53,31	79,28	53,47	52,84
12	77,35	105,87	81,36	78,51
24	98,84	121,36	107,57	106,14

Tab. A.2: Tabellenwerte zur Abbildung 5.2: Adsorption M6 bis M7

Zeit [h]	Feuchteaufnahme kumuliert [g/m ²]		
	M1	M6	M7
0	0	0	0
0,5	14,12	13,79	15,74
1	18,17	17,97	19,68
3	36,19	35,94	40,77
6	53,31	53,45	59,03
12	77,35	76,06	84,05
24	98,84	98,99	113,65

Tab. A.3: Tabellenwerte zur Abbildung 5.3: Adsorption M9 bis M10

Zeit [h]	Feuchteaufnahme kumuliert [g/m ²]		
	M1	M9	M10
0	0	0	0
0,5	14,12	15,72	15,35
1	18,17	19,65	19,02
3	36,19	39,30	37,57
6	53,31	57,44	53,61
12	77,35	78,31	75,83
24	98,84	99,17	93,02

Tab. A.4: Tabellenwerte zur Abbildung 5.4: Adsorption M12 bis M14

Zeit [h]	Feuchteaufnahme kumuliert [g/m ²]			
	M1	M12	M13	M14
0	0	0	0	0
0,5	14,12	14,28	14,02	14,22
1	18,17	17,59	18,32	18,16
3	36,19	37,43	37,77	37,82
6	53,31	54,57	54,96	55,52
12	77,35	78,62	78,94	81,54
24	98,84	101,47	106,31	107,71

Tab. A.5: Tabellenwerte zur Abbildung 5.5: Absorption – Sorptionsisotherme

23 °C rel.LF [%]	massebezogener Feuchtegehalt [%]						
	M1	M3	M7	M9	M12	M13	M14
20	0,458	0,517	0,255	0,405	0,439	0,408	0,422
35	0,690	0,791	0,432	0,616	0,683	0,638	0,652
50	0,899	1,063	0,662	0,805	0,911	0,871	0,884
65	1,107	1,353	0,943	1,002	1,135	1,106	1,122
80	1,379	1,718	1,389	1,284	1,416	1,428	1,430
90	1,811	2,265	2,105	1,673	1,898	1,964	1,937

Tab. A.6: Tabellenwerte zur Abbildung 5.6: Sorptionsverhalten in zeitlicher Abhängigkeit

Zeit [h]	Feuchteaufnahme kumuliert [g/m ²]								
	M1	M3	M6	M7	M9	M10	M12	M13	M14
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,5	24,15	27,08	18,74	24,16	22,19	15,58	21,25	19,44	21,53
1	33,40	35,04	26,34	28,67	32,00	24,05	29,38	27,59	30,78
3	72,17	79,50	59,18	68,23	65,06	54,06	66,91	63,17	67,79
6	103,92	118,45	94,03	100,68	92,54	76,97	104,12	102,37	107,51
12	124,51	143,21	118,04	133,85	111,56	93,01	134,26	133,27	139,21
24	133,90	148,10	128,73	146,41	115,64	94,85	147,52	149,25	153,46

Tab. A.7: Tabellenwerte zur Abbildung 5.7: Desorptionsverhalten in zeitlicher Abhängigkeit

Zeit [h]	Feuchteaufnahme kumuliert [g/m ²]								
	M1	M3	M6	M7	M9	M10	M12	M13	M14
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,5	-19,65	-22,38	-19,21	-19,90	-20,37	-21,77	-18,23	-18,99	-19,41
1	-37,69	-49,08	-37,02	-35,77	-38,34	-38,03	-40,53	-41,31	-39,88
3	-94,34	-113,01	-84,58	-90,02	-90,26	-85,23	-96,13	-96,04	-98,27
6	-137,73	-159,96	-124,40	-136,69	-123,46	-110,43	-146,01	-148,05	-149,98
12	-156,96	-176,00	-142,21	-164,41	-133,71	-117,30	-175,85	-178,35	-181,97
24	-157,41	-175,22	-145,77	-169,39	-132,66	-118,91	-178,56	-183,33	-188,34

Tab. A.8: Tabellenwerte zur Abbildung 5.8: Sorptionsverhalten in zeitlicher Abhängigkeit nach Verdichtungsart

Zeit [h]	Feuchteaufnahme kumuliert [g/m ²]	
	D	S
0	0	0
0,5	21,85	23,92
1	29,14	32,59
3	66,16	69,81
6	98,94	103,60
12	123,22	127,96
24	129,44	136,19

Tab. A.9: Tabellenwerte zur Abbildung 5.9: Desorptionsverhalten in zeitlicher Abhängigkeit nach Verdichtungsart

Zeit [h]	Feuchteaufnahme kumuliert [g/m ²]	
	D	S
0	0	0
0,5	-20,03	-20,78
1	-38,69	-41,26
3	-93,92	-95,97
6	-133,37	-135,29
12	-152,49	-154,87
24	-153,41	-156,22

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

Abb. A.1: Datenblatt Lehmfeinputz 0/2



Kaliwasserglas

Produktinformation Art. 607

08.08.2018

■ Allgemeines

Konzentriertes verkieselndes und härtendes Bindemittel für KREIDEZEIT Silikatfarbe. Verdünnt auch als Grundierung für KREIDEZEIT Wandfarben.

Einsetzbar zur Putzfestigung vor dem Überstreichen mit anderen KREIDEZEIT Wandfarben und Putzen, anschließend im Regelfall zusätzlich mit Kaseingrundierung (Art. 145) oder Vega Grundierung (Art. 2104) zu grundieren.

Silikatfarben (=Wasserglasfarben) gehören im Malerhandwerk zu den beständigsten Fassadenanstrichen. Mit Silikatfarben gestrichene Fassaden, die auch nach 20 Jahren noch gut aussehen, sind keine Seltenheit. Wasserglas ist im Prinzip in Wasser gelöstes Glas. Zur Farbenherstellung eignet sich ausschließlich das Kaliwasserglas (Farbenwasserglas). Hergestellt wird es aus Quarzsand und Pottasche. Die Härtung einer Silikatfarbe findet durch Aufnahme von Kohlendioxid aus der Luft statt. Bei diesem Vorgang "verkieselt" das Wasserglas und bindet Pigmente an den Untergrund.

■ Anwendung

Geeignet zur Verarbeitung ausschließlich auf unbehandelten kunstharzfreien und nicht hydrophobierten Kalk- und Kalkzementputzen sowie bei der Renovierung alter kunstharzfreier Silikatanstriche.

Transparente Fixierung von Lehmputzen:

Entgegen weitläufig verbreiteter Empfehlungen raten wir davon ausdrücklich ab, Lehmputze mit Kaliwasserglas transparent zu fixieren. Häufig geht eine solche Behandlung mit kristallinem weißlich-wolkigem Erscheinungsbild einher und ruiniert den optischen Eindruck. Für die transparente Fixierung von Lehmputzen besser geeignet ist Lithiumwasserglas (Art. 605).

■ Eigenschaften

- gutes Benetzungs- und Eindringvermögen
- diffusionsfähig
- vergilbungsfrei
- alkalisch (pH 12)
- wasser- und säurebeständig
- nicht brennbar
- mit Wasser in jedem Verhältnis verdünnbar
- biozidfrei
- vegan

■ Zusammensetzung (Volldeklaration)

Wasser, Kaliumsilikat

■ Geeignete Werkzeuge

Streichbürsten, Pinsel, Spritzgeräte.

Empfohlen aus dem Kreidezeit Sortiment:

Fassadenbürste (Art. P 6080)

Kalk Streichbürste (Art. P 6082)

■ Wichtige Hinweise zur Verarbeitung

Die Verarbeitung von Silikatfarben erfordert gute handwerklich Kenntnisse und Erfahrung. Alle Angaben zu Verarbeitung und Mischungsverhältnissen haben rein empfehlenden Charakter und stellen keine verbindlichen Zusagen dar. Abweichungen entsprechend den objektbezogenen Gegebenheiten und historischen Erfahrungen können erforderlich sein und sollten von einem silikaterfahrenen Verarbeiter festgelegt werden.

■ Probeflächen

Vor jeder großflächigen Anwendung ist die Eignung von Kaliwasserglas für den jeweiligen Anwendungszweck und Untergrund vom Verarbeiter durch Anlegen von Probeflächen zu prüfen !

■ Untergrunderfordernisse

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

■ Untergrundvorbereitung

Wartezeit bis zur Verarbeitung auf frischen Kalkputzen: mind. 8 Wochen.

- **Alle nicht zu streichenden Flächen sorgfältig abdecken**, besonders Glas, Klinker, Fliesen, Metall, Holz.
- Leimfarben und kreidende, bzw. nicht tragfähige Altanstriche gründlich entfernen.
- Tapetenleimreste gründlich vom Untergrund abwaschen.
- Oberflächen entstauben, sandende Untergründe abfegen.
- Altanstriche auf gute Haftung prüfen und ggf. entfernen.
- Bindemittelanreicherungen und Sinterhaut an Putzoberflächen entfernen. Schalölreste auf Beton entfernen. Frische kalkhaltige Putze ätzen.
- schimmelbefallene mineralische Untergründe mit Sodalaugel säubern

■ Verdünnung

Vor der Verarbeitung ist Kaliwasserglas mindestens im Verhältnis 1:1 mit Wasser zu verdünnen. Stärkere



Kaliwasserglas

Produktinformation Art. 607

08.08.2018

Verdünnungen sind eventuell nötig. Produkt nicht unverdünnt verwenden!

■ Verarbeitungs- und Trocknungsbedingungen

Direkte Sonneneinstrahlung, Zugluft, Schmutzeinwirkung und Untergrundtemperaturen unter 5°C und weit über 25°C sind zu vermeiden. Nicht auf aufgeheizten Fassadenflächen verarbeiten. Zu schnelle Trocknung vermeiden.

Verarbeitungs- und Trocknungstemperaturen: mind. 5°C über mind. 48 Stunden.

Silikatfarben dürfen unter 5°C nicht verarbeitet werden (Möglichkeit von Nachtfrost beachten!).

Anstriche im Außenbereich in den ersten Tagen vor Sonne und Regen schützen.

■ Verarbeitung

Silikatfarbe

Zur Verarbeitung ist die aktuelle Produktinformation „Silikatfarbe“ zu beachten! www.kreidezeit.de

Putzfestigung

1 Teil Kaliwasserglas mit **mindestens** 2 Teilen Wasser verdünnen. Auftrag durch Streichen. Nicht rollen! Auftrag zur Vermeidung von Läufern unbedingt **von unten nach oben**. Es ist auf das vollständige Eindringen der Wasserglaslösung zu achten, da sonst glänzende Stellen zurückbleiben können. In der Regel tritt nach der Trocknung ein weißlich-wolkiges Anstrichergebnis auf. Oberfläche vor dem Überstreichen mit weichem Besen abfeigen.

■ Trockenzeiten bei Normalklima

Trocken nach ca. 2-3 Stunden. Überarbeitbar nach frühestens 24 Stunden.

■ Verbrauch

Auf Putz (Verdünnung 1:2) :

pro m² etwa:

0,1 Liter Kaliwasserglas
+ 0,2 Liter Wasser

Genauere Verbrauchswerte sind am Objekt zu ermitteln.

■ Reinigung der Werkzeuge

Sofort nach Gebrauch mit Wasser. Während Arbeitspausen Geräte in Wasser lagern.

■ Gebindegrößen

Art. 607.1	0,75 l
Art. 607.2	2,5 l
Art. 607.3	5 l
Art. 607.4	10 l

Preise entnehmen Sie bitte der gültigen Preisliste.

■ Lagerung

Frostfrei und luftdicht verschlossen gelagert, ist Kaliwasserglas mindestens 3 Jahre haltbar. Nicht in verzinkten oder Aluminiumgebänden lagern.

■ Entsorgung von Produktresten

Produktreste nicht in das Abwasser geben, sondern luftdicht verschlossen aufbewahren und später aufbrauchen. Eingetrocknete Produktreste können dem Hausmüll beigegeben werden. Restentleerte Behälter in die Wertstoffsammlung geben. Aktuelle amtliche Bestimmungen zur Entsorgung von Lack- und Farbstoffen beachten.

■ Kennzeichnung

entfällt, kein Gefahrgut

■ Kennzeichnung gemäß ChemVOCFarbV

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

■ Achtung

Das Produkt ist alkalisch. Bei der Verarbeitung sind Schutzbrille und Schutzhandschuhe zu tragen. Alle nicht zu streichenden Flächen vor Farbspritzern schützen (besonders Glas, Klinker, Fliesen, Metallteile, geölte/lackierte Hölzer)! Farbspritzer müssen sofort mit viel Wasser entfernt werden, Gefahr irreversibler Flecken, auch auf Brillengläsern.

Nach Hautkontakt: Mit viel Wasser abspülen. Bei andauernder Hautreizung Arzt aufsuchen. Nach Augenkontakt: Augen bei geöffnetem Lidspalt mehrere Minuten unter fließendem Wasser abspülen und Arzt konsultieren. Durch die eingesetzten Naturrohstoffe tritt ein typischer Produktgeruch auf! **Für Kinder unerreichbar aufbewahren!**

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

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

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

Seite 2/2

Abb. A.3: Datenblatt Kaliwasserglas S. 2/2



Carnaubawachs Emulsion - Konzentrat -

Produktinformation Art. 415

14.06.2018

■ Anwendung

Kreidezeit Carnaubawachs Emulsion wird eingesetzt als:

- **Wischpflege** für geölte und gewachste Oberflächen (Holz, Kork, Stein, Keramik) und Linoleum. Für Böden und Möbel. Verleiht stumpf gewordenen Flächen seidigen Glanz und frisches Aussehen.
- **Grundschutz** für geölte und gewachste Oberflächen im Rahmen der Erstbehandlung. Zusätzlicher Schutz gegen mechanischen Abrieb, Schmutz, Staub und Wasser.
- **Alleinbehandlung für unbehandelte Innenseiten von Holzschränken.** Trocknet praktisch geruch- und vergilbungsfrei auf. Erlaubt leichtes Auswischen.
- **Alleinbehandlung für unbehandelte Holzbalken und -vertäfelungen.** Verleiht seidiges Aussehen ohne stark anzufeuern. Gibt leichten Schutz gegen Schmutz und Flüssigkeiten. Rüstet die Oberfläche antistatisch aus, Staub kann leichter entfernt werden.

Kreidezeit Carnaubawachs Emulsion ist ein sehr gehaltvolles Konzentrat zur Verdünnung mit Wasser und dadurch extrem ergiebig.

Kreidezeit Carnaubawachs Emulsion ist selbstglänzend und muß nicht poliert werden. Bei Bedarf kann durch Polieren eine weitere Glanzsteigerung erzielt werden.

Carnaubawachs wird von den Blättern einer brasilianischen Palmenart gewonnen. Der dünne Wachsfilm wirkt während der Regenzeit wasserabweisend und schützt während der Sommerzeit die Blätter vor dem Austrocknen.

■ Eigenschaften

schmutz- und wasserabweisend, diffusionsfähig, antistatisch, selbstglänzend, vergilbungsarm, wasserverdünnbar (Lösungsmittel ist Wasser), angenehmer Geruch, schnelltrocknend, leicht zu verarbeiten, vegan

■ Zusammensetzung (Volldeklaration)

Wasser, Carnaubawachs, Emulgator auf Basis natürlicher Fettsäuren, Lebensmittelkonservierungsstoff: Kaliumsorbat (E202).

■ Verarbeitung

Das Produkt darf nicht unverdünnt angewendet werden! Das Anlegen von Probeflächen vor großflächiger Anwendung zur Beurteilung von Eignung und Wirkung des Produktes auf dem jeweiligen Untergrund empfohlen.

Auf glatten Böden die Emulsion nur sparsam einsetzen (Rutschgefahr)!

Auf strapazierten Untergründen wie Fußböden und Arbeitsplatten nicht ohne vorherige Ölbehandlung anwenden!

- **Wischpflege**

Nach Bedarf auf stumpfen Flächen anwenden!
Glänzende Flächen benötigen keine Pflege. 1-2 Esslöffel Carnaubawachs Emulsion in 5 l handwarmes Wischwasser geben und Oberfläche nebelfeucht wischen. Trocknen lassen. Nachpolieren nicht erforderlich.

- **Grundschutz für neu geölte Flächen**

Vorgeschriebene Aushärtungszeit der Vorbehandlung einhalten. 1 Teil Carnaubawachs Emulsion mit 2 Teilen Wasser verdünnen und sehr dünn mit einem fusselfreien, weichen Lappen oder einem breiten weichen Pinsel auftragen. Trocknen lassen. Vorgang kann bei Bedarf wiederholt werden. Nach Bedarf zusätzlich mit weichem Lappen oder Pad polieren.

- **Behandlung von Holzbalken /-vertäfelungen und Innenseiten von Schränken**

Unbehandeltes Holz schleifen (P100-120) und entstauben. 1 Teil Carnaubawachs Emulsion mit 4 Teilen Wasser verdünnen und gleichmäßig mit weichem Schwamm oder Pinsel auftragen. Trocknen lassen. Vorgang kann bei Bedarf wiederholt werden. Nach Bedarf zusätzlich mit weichem Lappen oder Pad polieren. Ein Zwischenschliff (P120) kann erforderlich sein.

■ Trockenzeiten

ca. 1-2 Std. bei 20 °C.

■ Verbrauch

bei 1:2 Verdünnung:

- auf geölte Oberflächen ca. 20 ml Emulsion + 40 ml Wasser pro m² pro Anstrich.
- auf unbehandeltem Holz ca. 35 ml Emulsion + 70 ml Wasser pro m² pro Anstrich.

Genauere Verbrauchswerte sind am Objekt zu ermitteln.

■ Gebindegrößen

Art. 415.2 500 ml

Art. 415.4 5 l

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.4: Datenblatt Carnaubawachs S. 1/2



Carnaubawachs Emulsion - Konzentrat -

Produktinformation Art. 415

14.06.2018

■ Lagerung

Kühl und frostfrei gelagert sind unangebrochene Gebinde mindestens 6 Monate haltbar.

■ Entsorgung von Produktresten

Produktreste können als Hausmüll entsorgt werden. Entleertes Gebinde in die Wertstoffsammlung geben.

■ Kennzeichnung

entfällt, kein Gefahrgut

■ Kennzeichnung gemäß ChemVOCFarbV

VOC Höchstgehalt (Kat. A/f): 130 g/l (2010),
Produkt enthält max. 1 g/l VOC.

■ Achtung

Das Produkt weist durch die enthaltene Naturrohstoffe einen typischen Geruch auf, der nach Trocknung mit der Zeit verschwindet. Für Kinder unerreichbar lagern.
Mögliche Naturstoffallergien beachten.

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

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

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

Seite 2/2

Abb. A.5: Datenblatt Carnaubawachs S. 2/2



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 $< 0,01\text{m}$), und ist damit eine ideale Grundierung insbesondere für Lehm- und Kalkputze.

■ Anwendung

Geeignet zur Verarbeitung auf allen unbehandelten und saugenden Untergründen wie Lehm-, Kalk-, Kalkzement-, Gipsputze, Gipskarton und Gipsfaserplatten, Stein, Beton. Empfohlen zur Grundierung saugfähiger Altanstriche vor deren Renovierung; z. B. Kreidezeit Kaseinfarben, Lehmfarben, Sumpfkalkfarben und Dispersionsfarben.

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

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

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

■ Eigenschaften

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

■ Zusammensetzung (Volldeklaration)

Kasein, Soda

■ Geeignete Werkzeuge

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

Fassadenbürste (Art. P 6080)

Kalk Streichbürste (Art. P 6082)

Deckenbürste (Art. P 6054.1)

■ Vorarbeiten

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

- Alte Leimfarbenanstriche und andere kreidende, bzw. nicht tragfähige Altanstriche gründlich entfernen. Tapetenleimreste gründlich vom Untergrund abwaschen.
- Oberflächen gründlich entstauben, sandende Untergründe gründlich abfeigen.
- 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 (250g) unter ständigem Rühren in 3 Liter sauberes kaltes Wasser geben. Dabei darauf achten, dass alle Klümpchen verrührt werden. Nach einer Quellzeit von ca. 30 Minuten noch einmal kräftig durchrühren und mit 5 Liter Wasser verdünnen.

■ Verarbeitung

Kaseingrundierung gleichmäßig und satt auftragen.

Nur so viel Flüssigkeit auftragen, wie vom Untergrund aufgenommen wird. Überstände (nassglänzende Stellen) vor dem Trocknen unbedingt mit einem Lappen abnehmen.

Verarbeitungstemperatur mind. 8°C .

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

■ Trockenzeiten bei Normalklima

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

■ Verbrauch

Je nach Saugfähigkeit des Untergrundes reichen 250g Pulver für ca. $40\text{-}60\text{m}^2$. 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 Kasemühle 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.6: Datenblatt Kasein Seite S. 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



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), Ca(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: Ca(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.8: Datenblatt Kalk gelöscht



Lieferung STEICOzell

Handliche Säcke

Gewicht [kg/St.]	Anzahl [St./Pal.]
15	21 (Säcke)

Palettenformat: ca. 0,8*1,2*2,60m; 33 Pal./LKW

Ballen ohne Einzelfolierung / Großballen (Industrieverpackung)

270	1 Großballen (18 Ballen je 15kg)
360	1 Großballen (18 Ballen je 20kg)

Palettenformat: ca. 0,8*1,2*2,30m; 33 Pal./LKW

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]	ca. 32
• offenes Aufblasverfahren: oberste Geschossdecke	ca. 35-45
• geschlossene Bauteilhohlräume: Dach, Decke, Wand	
Strömungswiderstand r [kPa*s/m ²] n. DIN EN 29053	>5
30 kg/m ³	
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ	1-2
Spezifische Wärmekapazität c [J/(kg*K)]	2.100
Einsatzstoffe	Holzfasern, Flammenschutzmittel Ammoniumsulfat
Abfallschlüssel-Nr. (EAK)	170201, Entsorgung wie Holz und Holzwerkstoffe

Mindest-Rohdichten-Tabelle STEICOzell

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

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 %.

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 7kg/m³ Materialmenge zugegeben werden.



Ihr STEICO Partner

www.steico.com

Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier | Stand 05/2020 | Es gilt die aktuelle Auflage. Irrtum vorbehalten.



Abb. A.9: Datenblatt STEICOzell