

Diplomarbeit

LEHM UND LEHM LEBEN

Architektonische Elemente im Lehm- und
deren Anwendungsmethoden im fragmentarischen Raum

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur eingereicht an der Technischen Universität Wien,
Fakultät für Architektur und Raumplanung

von

Benedikt Langmayr

01106591

Betreuer: Senior Scientist Arch. Dipl.-Ing. Günter Pichler
Institut Architektur und Entwerfen
Forschungsbereich Raumgestaltung und Entwerfen E253/3
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13, 1040 Wien, Österreich

Wien, am

ABSTRACT

Climate change is progressing steadily and requires new thinking in the construction sector. To help reduce global warming, it is important to use alternative building methods and materials. Conventional building materials should be used less and replaced by reusable and resource-efficient alternatives. Natural materials such as wood, clay, and straw offer high potential for sustainable construction due to their positive properties.

This thesis explores the suitability of clay as a resource-conserving alternative – both as a mono-material and in hybrid construction methods. The guiding questions are: „How can buildings be constructed with clay?“ and „What technical and structural possibilities exist today for clay construction?“

The first part, the Study, analyzes the material properties of clay, outlining its advantages, challenges, and possible applications.

The second part, the Concept, focuses on the spatial experience of a clay building. Using visualized fragments, it emphasizes the subjective perception of the material clay.

KURZFASSUNG

Der fortschreitende Klimawandel erfordert ein Umdenken im Bausektor. Um der globalen Erwärmung entgegenzuwirken ist der Einsatz von alternativen Baumethoden und Baumaterialien notwendig. Herkömmliche Baustoffe sollten vermindert und durch wiederverwendbare, sowie ressourcenschonende Materialien ersetzt werden. Naturbaustoffe wie Holz, Lehm und Stroh bieten durch ihre positiven Eigenschaften ein erhebliches Potenzial für nachhaltiges Bauen.

Diese Arbeit untersucht die Eignung von Lehm als ressourcenschonende Alternative – sowohl als Mono-Material, als auch in hybrider Bauweise. Ausgangspunkt sind die folgenden Fragestellungen: „Wie kann mit Lehm gebaut werden?“ und „Welche technischen und konstruktiven Möglichkeiten stehen heute für den Lehmbau zur Verfügung?“

Im ersten Teil, der Studie, werden die Materialeigenschaften von Lehm analysiert, seine Vorteile und Herausforderungen aufgezeigt, sowie seine Einsatzmöglichkeiten erläutert.

Der zweite Teil, das Konzept, widmet sich der räumlichen Erfahrung eines Lehmgebäudes. Anhand von visualisierten Fragmenten wird die subjektive Wahrnehmung des Baustoffs Lehm thematisiert.

INHALT

TEIL EINS. STUDIE. LEHM.

| | | |
|-----------|-----------------------|----|
| 00 | EINLEITUNG | 08 |
| | Motivation und Inhalt | |

| | | |
|-----------|-------------------------|----|
| 01 | LEHM | 11 |
| | Warum Lehm? | |
| | Was ist Lehm? | |
| | Geschichte des Lehmbaus | |
| | Lehmbau in Europa | |
| | Lehmbau in Österreich | |
| | Lehmbau Heute | |

| | | |
|-----------|-------------------------------|----|
| 02 | BAUEN MIT LEHM | 47 |
| | Lehmbauweisen Nutzungsarten | |
| | Stampflehmbauweise | |
| | Lehmwellerbauweise | |
| | Lehmsteinbauweise | |
| | Hybridbauweisen | |

| | | |
|-----------|------------------------|----|
| 03 | BAUKASTENSYSTEM | 79 |
| | Boden Sockel | |
| | Wand | |
| | Decke | |
| | Dach | |
| | Öffnung | |
| | Oberfläche | |

TEIL ZWEI. KONZEPT. LEHM LEBEN.

| | | |
|-----------|------------------|-----|
| 04 | FRAGMENTE | 143 |
| | Begegnen | |
| | Ankommen | |
| | Durchschreiten | |
| | Verweilen | |
| | Verabschieden | |

| | | |
|-----------|-----------------------|-----|
| 05 | CONCLUSIO | 169 |
| | Literaturverzeichnis | |
| | Abbildungsverzeichnis | |

INHALT

TEIL EINS.

STUDIE.

LEHM.

00

MOTIVATION UND INHALT

Der Klimawandel schreitet stetig voran. Mehr als ein Drittel des weltweiten CO₂-Ausstoßes ist dem Bausektor zuzuschreiben, da für die Sanierung, Nutzung und vor allem für den Bau von Gebäuden eine große Menge an Energie und Ressourcen verbraucht werden. Erkennlich macht sich die Klimakrise, wenn man die Erderwärmung der letzten zwei Jahrhunderte verfolgt.⁰¹

Die Temperaturen stiegen seit dem Beginn der Industrialisierung im 19. Jahrhundert weltweit um 1°C. Allein in Österreich gab es innerhalb der letzten drei Jahrzehnte einen Anstieg von 2°C.⁰²

Um der globalen Erwärmung entgegenzuwirken, braucht es neue Methoden und Ansätze in der Baubranche. Die herkömmlichen Baumaterialien, wie Stahl und Beton, sollen durch natürliche und leicht wiederverwendbare Baustoffe ersetzt werden. Bei der Wahl alternativer Baustoffe müssen Holz, Lehm oder Stroh genauso in Betracht gezogen werden, denn diese tragen durch ihre Qualitäten wesentlich zu einer nachhaltigen Bauweise bei.

In dieser Masterarbeit möchte ich den Leser:innen aufzeigen, dass der Baustoff Lehm sowohl als Mono-Material, als auch in Verbindung mit anderen Baustoffen eine ressourcenschonende Alternative im Bausektor bietet. Aus diesem Gedanken haben sich die Fragen entwickelt: „Wie kann ich mit Lehm bauen?“ oder „Welche technischen und konstruktiven Möglichkeiten gibt es heutzutage, um ein Gebäude aus Lehm zu errichten?“ Sind die früheren Methoden noch zeitgemäß oder

gibt es grundlegende Veränderungen beim Bauen mit Lehm?

In den ersten Kapiteln wird der Baustoff Lehm beschrieben und welche Vor- und Nachteile dieser besitzt. Folglich wird auf die Geschichte und die damaligen Einsatzmöglichkeiten eingegangen. Zusätzlich werden die Techniken und Methoden beschrieben wie man aus Lehm ein Gebäude errichten kann.

Die darauffolgenden Kapitel lenken den Fokus auf den Einsatz von Lehmstoffen im 21. Jahrhundert und welche technischen Möglichkeiten es heute gibt mit diesen zu bauen. Mithilfe eines Baukastensystems möchte ich einzelne Elemente, wie z.B. eine Geschosdecke, Öffnungen oder eine Außenwand, etc. herausarbeiten und aufzeigen wie diese, mit dem Einsatz von Lehm, konstruktiv umgesetzt werden können.



Abb. 01: Stampflehm, Ansicht einer Stampflehmwand mit eingearbeiteten Erosionsbremsen

[01] 2022 Global Status Report for Buildings and Construction

[02] GeoSphere Austria, Klimafakten Österreich



Abb.02: Facade, Aerecura
Earth Rammed Builders

01

LEHM

Der Baustoff Lehm. Ursprung und
Beziehung zur Kultur des Menschen.

WARUM LEHM ?

Lehm ist seit tausenden Jahren in fast allen bewohnbaren Gebieten mit gemäßigter und heiß-trockenen Klimazonen der vorherrschende Baustoff. Weltweit gesehen lebt circa ein Drittel der Bevölkerung in Lehmbauten. In Entwicklungs- und Schwellenländern steigt dieser Wert auf mehr als 50%. Vor allem in weniger industrialisierten Ländern ist es aufgrund des Zugangs zu alternativen Materialien schwierig die immense Wohnungsnot zu decken. Baustoffe wie Stahl, Beton oder Ziegel sind aufgrund des hohen und des vergleichbar teuren Fertigungsaufwandes nicht überall einsetzbar. Der Gebrauch von Lehm und lehmhaltigen Stoffen ist daher in sehr vielen Baukulturen fest verankert und heute nach wie vor gebräuchlich.

Da Lehm in den meisten Gebieten der Erde vorhanden ist, oder einfach beim Ausheben eines Kellers bzw. eines Fundamentes anfällt, kann man diese natürliche Ressource als Baumaterial nutzen und sie bei Bedarf wieder in den Rohstoffkreislauf zurückführen, ohne die Umwelt mit Schadstoffen zu belasten.

Wenn man an die Materialeigenschaften des Lehms, im Vergleich zu Beton, Ziegel oder anderen industriell gefertigten Produkten, denkt und diese miteinander vergleicht, sieht man, dass der natürliche Baustoff keineswegs unterlegen ist. Besonders im Hinblick auf ein ausgeglichenes und gesundes Raumklima kann Lehm durch seine diffusionsoffene und wärmespeichernde Eigenschaft dazu beitragen, die Wohngesundheit in einem Gebäude maßgeblich zu steigern.⁰³

[03] Minke, 2022, S.7

Durch das Verbessern und der Erforschung der traditionellen Lehmbautechniken und diese wiederum mit dem Wissen und den Erfahrungen aus der Vergangenheit zu kombinieren, schafft eine „neue“ Möglichkeit das derzeitige Denken in der Baubranche zu ändern und ein Bewusstsein für ökologisches und nachhaltiges Bauen zu schaffen.

In den letzten Jahren haben viele Produkte aus Lehm und auch der Grad der Vorfertigung von Lehmstoffen ein Qualitätsniveau erreicht, welches dem der konventionellen Materialien entspricht.

Von der dünnen Schicht aus Lehmputz, über die Lehm-Trockenbauplatte, bis zum im Werk vorgefertigten Wandmodul aus Stampflehm, bietet der natürliche Baustoff auch in der heutigen Zeit eine Vielzahl an Alternativen ein Gebäude zu planen und zu errichten.

Es gilt die Stärken des Lehms hervorzuheben und jedes Material - vom Keller bis zum Dach - an den richtigen Stellen einzusetzen, um seine Qualitäten im Gefüge größtmöglich entfalten zu können. Tragende Wände werden als massive Bauteile ausgeführt, da Lehm zwar Druckkräfte aufnimmt, aber als Monomaterial nicht auf Zug beanspruchbar ist. Um Zugkräfte aufnehmen zu können, sind beim Lehmbau beispielsweise hybride Konstruktionen und Verbindungen (Holz, Trasskalkmörtel, Bewehrungseisen, Beton, etc.) notwendig.

Auf die aktuellen Methoden und die Möglichkeiten im Bezug auf das Bauen mit Lehm wird in den folgenden Kapiteln der Arbeit genauer eingegangen.



Abb.03: Stadt Shibam,
Jemen, Hochhäuser aus
Lehm, Lutz Jäkel, 2018

| | Bindekraft (g / cm ²) |
|------------|--------------------------------------|
| sehr mager | 50 - 80 |
| mager | > 80 - 110 |
| fast fett | > 110 - 200 |
| fett | > 200 - 280 |
| sehr fett | > 280 - 360 |
| Ton | > 360 |

Abb.04: Bezeichnung der Baulehme nach Bindekraft

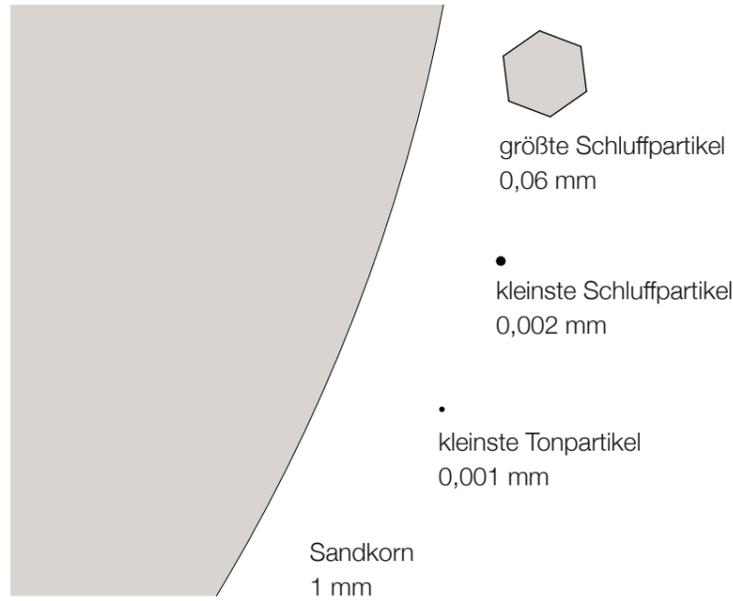


Abb.05: Vergleich der Korngrößen

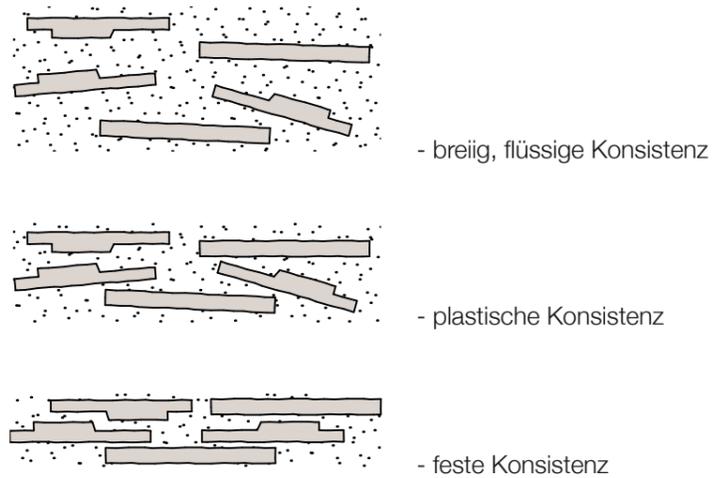


Abb.06: Unterschiedliche Konsistenzen der Tonpartikel, abhängig vom Wasseranteil

WAS IST LEHM?

Der Baustoff Lehm besteht grundsätzlich aus Ton und feinen sandigen bis steinigen Zuschlägen. Je nach Zusammensetzung des Materials unterscheidet man zwischen fettem Lehm, welcher hoch bindend ist und magerem Lehm, der im Gegensatz dazu nur gering bindet.

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal bilden die mineralischen Bestandteile im Lehm. Aufgrund der verschiedenen Korngrößen, lässt er sich in feinsandig, grobsandig oder schluffigen Lehm unterteilen. Der Ton bildet zwischen seiner Plättchenstruktur einen dünnen Wasserfilm in den Zwischenräumen und dient somit als Bindemittel zwischen den Mineralgerüsten. Der Lehm erhält seine Festigkeit und Bindekraft, sobald das Wasser im Inneren beginnt zu verdunsten und sich dadurch die einzelnen Plättchen gegenseitig anziehen. Aufgrund ihrer Form überlagern sich die Tonplättchen und legen sich bei kontinuierlicher Austrocknung übereinander.

Zum Baulehm wird nochmals Wasser zum bereits erdfeuchten Lehm hinzugemischt, da sich die Plättchen dadurch bewegen und sich neu übereinander legen, wodurch die Festigkeit des Lehms erhöht wird.

Durch die Abgabe und die Verdunstung des Wassers im Baustoff verringert der Lehm sein Volumen, was in manchen Fällen zu Rissbildungen führen kann. Um das Schwinden so gut wie möglich zu vermeiden, wird das Material vorher mit verschiedenen Zuschlägen gemagert.⁰⁴

Beim Massivbau aus Stampflehm nutzt man z.B. den Pechschotter, der beim Aushub gewonnen wird. Handelt es

[04] Volhard, 2022, S.41f

sich hingegen um eine Ausfachung mit Leichtlehm, kann man Leichtzuschläge wie Stroh oder pflanzliche Fasern für die Stabilisierung beimengen.

Der Baulehm beinhaltet nach dem Trocknen noch immer über einen Prozentsatz an Flüssigkeit in den Poren. Diese nennt man Ausgleichsfeuchte mit der sich Baulehm an verschiedene klimatische Bedingungen anpassen kann, indem er Wasserdampf aus der Umgebung entweder aufnimmt oder abgibt. Erst bei Temperaturen von über 105°C verliert Lehm diese Eigenschaft. Werden Lehm und Ton bei ca. 900°C gebrannt, lassen sie sich auch nicht mehr durch die Zugabe von Wasser verformen oder ummodellieren.⁰⁵

BESCHAFFUNG VON LEHM

Bei der Beschaffung von Baulehm muss jedenfalls darauf geachtet werden, dass dieser frei von Verunreinigungen, Wurzeln und Humus ist. Nach der Entnahme des Lehms aus dem Boden ist die Lagerung entscheidend. Baulehm muss möglichst trocken aufbewahrt und vor Regen geschützt werden. Weiters sollte vermieden werden, dass er sich mit dem Mutterboden verschmischt. Falls sich der eigene Aushub nicht zum Bauen eignet, besteht die Möglichkeit den Lehm auf die Baustelle zu transportieren. Hier wird das trockene Material von Lehmfirmen in Big Bags geliefert und vor Ort mit Wasser aufgeschlämmt. Zuvor sollte aber noch die Bindekraft und Festigkeit des Lehms geprüft werden.⁰⁶

[05] Volhard, 2021, S.42f

[06] ebenda, S.41f

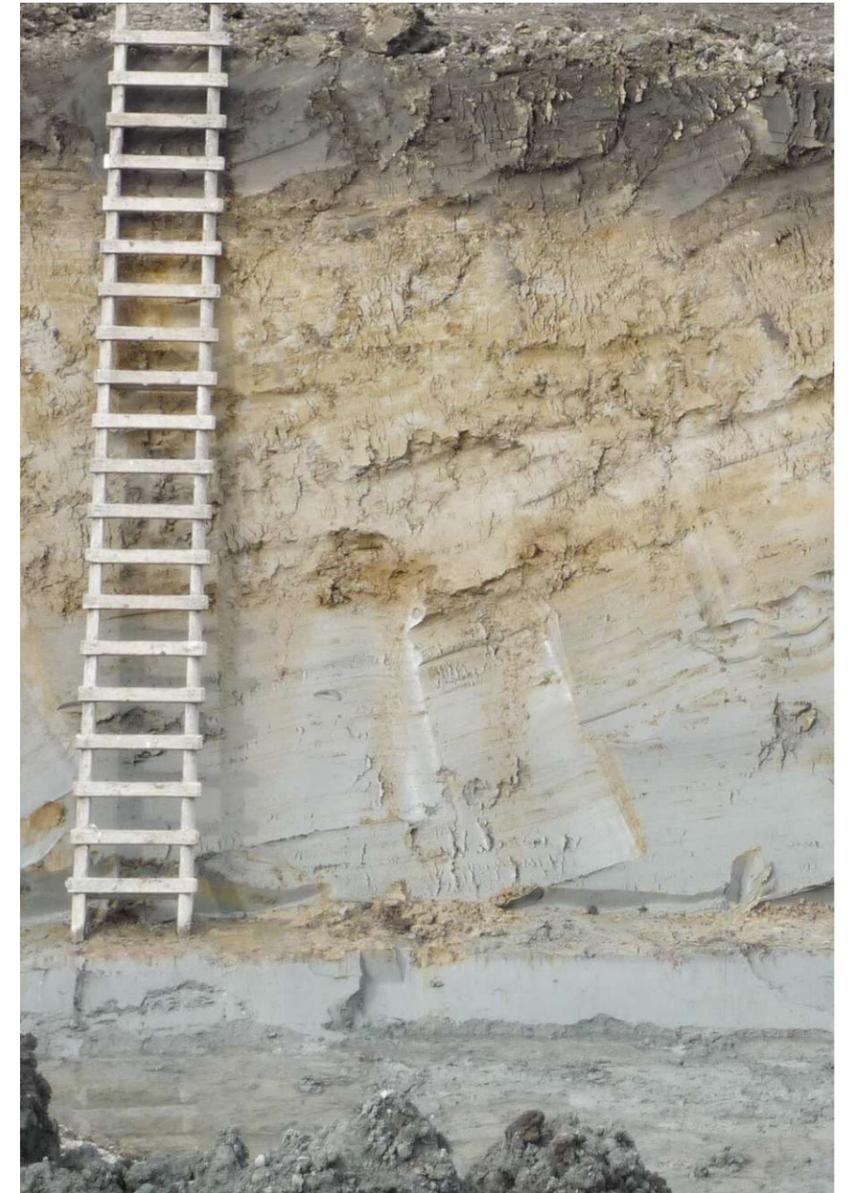


Abb.07: Wiedenbrück. Erdschichten in einer Lehmgrube, Nähe Emssee, 2009



Abb.08: Achterlingtest,
Feststellung der Bindekraft
einer Lehmprobe

PRÜFUNG VON BAULEHM

Lehm ist in Österreich kein genormter Baustoff. Deshalb gibt es, im Gegensatz zu herkömmlichen Materialien, keine allgemein gültigen Werte für seine Verwendung. Die Beschaffenheit des Lehms kann je nach Entnahmestelle variieren. Aus diesem Grund sind verschiedene Prüfungen durchzuführen, bevor man mit dem vorhandenen Lehm zu Bauen beginnt. Bei den Methoden zur Untersuchung differenziert man zwischen „Feldprüfungen“ und „Laborprüfungen“.

Diese Prüfungen sollen in erster Linie die Zusammensetzung des Lehms analysieren, denn ohne genügend Bindekraft kann er keine Zuschläge binden und keine ausreichende Festigkeit erreichen. Ein weiterer Punkt ist die Menge und die Form von sandigen und steinigen Bestandteilen, die sich im Lehm befinden und ob diese bei Weiterverarbeitung als störend eingestuft werden. Folgend wird auch das Schwindverhalten des Lehms beim Austrocknen getestet und ob sich noch unerwünschte Fremdkörper im Aushub befinden. (Röhlen/Ziegert S.14)

Wird die Qualität von Baulehm vor Ort mittels einfacher Feldprüfungen beurteilt, müssen die Versuche von einer Person mit Erfahrung durchgeführt und die Ergebnisse anschließend eingeschätzt werden. Die durchgeführten Tests bestehen z.B. aus einer Kugelformprobe, einem Schneideversuch, einem Riechversuch, einem Reibeversuch oder einem Waschtest. Sollten nach diesen Verfahren noch Zweifel an der Beschaffenheit des Materials bestehen, ist es erforderlich die Eignung

des Lehms im Labor zu bestimmen.⁰⁷

Ein Verfahren, das oft zur Bewertung von Baulehm zum Einsatz kommt, ist die Feststellung der Korngrößenverteilung. Durch eine Sieb-Schlämmanalyse werden die Massen der vorhandenen Bestandteile ermittelt und in Fraktionen eingeteilt. Teilchen, die kleiner als 0,002mm Durchmesser besitzen, werden zur Tonfraktion gezählt.

Ab einer Größe von 0,002mm spricht man entweder von Schluff-, Sand-, Kies-, und Steinfraktionen. Die Feststellung der Korngrößen muss bei der Eignungsprüfung für Lehm hinterfragt werden, da auch andere Bestandteile in der Probe enthalten sein können, die die 2µm (Mikrometer) nicht überschreiten und deshalb fälschlicherweise zur Tonfraktion gezählt werden. Zu diesen Materialien gehören unter anderem Quarz, Carbonate oder Metalloxide. Durch ihre geringe Bindekraft kann es zur Unterschätzung des Tonmineralgehalts im Baulehm kommen. Mehr Sinn macht die Korngrößenverteilung bei der Herstellung von Stampflehmmischungen oder Lehmputzen um fehlende Fraktionen zu ergänzen.⁰⁸

Die Bindekraftprüfung eignet sich zur Messung der Zugfestigkeit des Baulehms. Bei diesem Versuch wird die Summe der bindenden Kräfte aller Fraktionen gemessen und somit die Probe als Gesamtes beansprucht. Das Material wird in eine Schalung gestampft, die die Form einer 8 besitzt und wird danach sofort auf Zug beansprucht. Je nach Schwere der Zuglast zerreißt der Probekörper und lässt sich in unterschiedliche Klassifizierungen einteilen. Man spricht bei dieser Prüfung

vom „Achterlingtest“.⁰⁹

Zur Bestimmung der Druckfestigkeit und werden Prismen und Würfel hergestellt und auf Druck beansprucht. Pro Test werden mehrere Probekörper des selben Materials belastet, wobei die Abweichungen der einzelnen Bruchlasten nicht mehr als 20% vom Mittelwert betragen dürfen.¹⁰

Das Schwindmaß ist im Vergleich der einfachste Test. Die Lehmprobe wird in der in eine Form eingebracht und nach dem Trocknen wird gemessen, wie sich das Volumen der Probe verändert hat. Hier ist zu beachten, dass das Material beim Test die Konsistenz des später gewünschten Baustoffes hat (Lehmestrich, Lehmputz, etc.), um möglichst genaue Werte für die Weiterverarbeitung zu bekommen.¹¹



Abb.09: Form zur Herstellung einer Lehmprobe, Achterlingtest

[07] Röhlen/Ziegert, 2010, S.15

[08] ebenda, S.17

[09] Volhard, 2021, S.45

[10] Minke, 2022, S.34

[11] Röhlen/Ziegert, 2010, S.19

GESCHICHTE DES LEHMBAUS

Lehm gehört zu den ältesten Baustoffen der Welt. Wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt, lebt nach wie vor ein Großteil der Menschheit in Bauten aus Lehm. Noch vor dem Sesshaftwerden der Menschen nutzten die Jäger und Sammler die natürliche Ressource um einfache Gebilde zu errichten, die vorwiegend dem Schutz vor den Naturgewalten dienen.

Heutzutage lassen sich in trockenen und heißen Klimazonen noch etliche Bauten aus Lehm finden, da der Lehm ein massiver Baustoff ist und über eine hohe Wärmespeicherkapazität verfügt, wodurch er die Räume bei hohen Temperaturen angenehm kühl hält. Die Bauten des Nahen und Mittleren Ostens, wie z.B. Catal Hüyük in Anatolien, lassen sich auf mehr als 9000 Jahre zurückverfolgen und sind teilweise auch heute noch vorhanden.

In Ägypten wurden um ca. 5000 v. Chr. Lehmziegel zum Bau von Gewölben, Grabstätten, sowie für Lagerräume verwendet. Aus dem Schlamm des Nils wurden Ziegel geformt und nach dem Trocknen in der Sonne zum Bauen von verschiedensten Strukturen verwendet, welche auch heute noch sichtbar sind (Grabmal von Ramses II, ca. 1300 v. Chr).¹²

Auch in China sind heute noch viele Bauten aus Stampflehm und auch aus Lehmziegelbau erhalten. Die ältesten Abschnitte der chinesischen Mauer, welche vor ungefähr 4000 Jahren errichtet wurde, bestand, bevor sie mit Ziegeln und Steinen verkleidet wurde, zu großen Teilen aus Stampflehm.

In Südamerika wurden ganze Städte aus reinen Lehmziegel erbaut. Chan Chan zählte 1400. n. Chr. mit 28km² zu den



Abb.10: „Lager der Götter“, aus Lehmsteinen gebaute Lagerhalle zur Aufbewahrung von Speisen, zugehörig zu den Bauten für Ramses II, Ägypten, ca. 1300 v. Chr.



Abb.11: Chan Chan, größte Adobe Stadt der Welt, Peru, ca. 1400 n. Chr.

[12] Netzwerk Lehm - Fachverband zur Förderung des Lehmbaus sowie zur Vernetzung von Lehmbauschaaffenden in Österreich, Geschichte des Lehmbaus



Abb.12: Huaca del Sol „Sonnenpyramide“, Peru, zwischen 100 - 800 n. Chr.



Abb.13: Taos Pueblo, älteste durchgehend bewohnte Siedlung der Vereinigten Staaten, Lehmziegelbau, USA, ca. 1000 n. Chr.

größten Städten des präkolumbischen Peru.¹³

Nicht nur für die Errichtung von Wohnhäusern, sondern auch für den Bau von Pyramiden nutzte man die sonnengetrockneten Lehmziegel. Beispiele hierfür ist die aus der Moche-Kultur entstandene Huaca del Sol („Sonnenpyramide“) und die gegenüberliegende Huaca de la Luna („Mondpyramide“) im Norden Perus.¹⁴

Im Südwesten der USA, genauer gesagt im Bergland von New Mexico findet man eine der ältesten, kontinuierlich bewohnten Siedlungen Nordamerikas. Um 1400 n. Chr. wurden an dieser Stelle die „Taos Pueblo“ errichtet. Das Besondere an diesem Bau ist, dass er stetig im Wandel ist und dank der Lehmstrukturen sehr flexibel gestaltet werden kann. Je nach Anforderung können hier Räume hinzugefügt oder auch abgebrochen werden.

Es sind jedoch vor allem die Grubenhäuser der indigenen Bevölkerung und die Taos Anasazi, welche aus verputzten Lehmziegel bestehen, welche die Lehm baukultur nachhaltig prägten.¹⁵

Die beschriebenen Lehmbauten befinden sich meist in trockenen und heißen Klimazonen außerhalb Europas, was den Einsatz zusätzlichen Dämmstoffen nicht notwendig machte. Die Anforderungen an den Baustoff Lehm ändern sich natürlich bei wechselnden Witterungsverhältnissen.

Im nächsten Kapitel wird die Geschichte des Lehmbaus in Europa näher beschrieben.

[13] Minke, 2022, S.8

[14] Netzwerk Lehm - Fachverband zur Förderung des Lehmbaus sowie zur Vernetzung von Lehmbauschaaffenden in Österreich, Geschichte des Lehmbaus

[15] Lehner, 2016, S.73ff



Abb.14: Lehmvorkommen weltweit, Weltkarte mit einer Übersicht von gut geeigneten Lehmböden und Regionen in denen traditioneller Lehmbau praktiziert wird

LEHMBAU IN EUROPA

Die ersten Lehmbauten in Europa lassen sich bis ins Neolithikum (bis ca. 5000 v. Chr.) zurückverfolgen. Meist waren das einfache Pfostenkonstruktionen, deren Wände aus geflochtenen Ästen und Zweigen bestanden. Anschließend wurden die Wände mit einem Lehmewurf versehen.

Wegen des gemäßigten Klimas in Europa, welches starke Regenfälle und kalte Winter mit sich bringt, hatten die Lehm-bauten andere Anforderungen zu erfüllen, als in trockeneren und heißeren Klimazonen. In vielen Gebieten war Holz ein reichlich vorhandener Rohstoff, den man als primäre Tragkonstruktion verwendete. Der massive Lehm wurde mit Stroh zu Leichtlehm vermengt und als Ausfachungsmaterial genutzt.

Massive Gebilde aus Stampf- oder Wellerlehm zu errichten, setzte sich wiederum in den Regionen durch, in denen das Holz nicht in großem Ausmaß vorhanden war. Durch die Massivität und durch ihre Wärmespeicherkapazität konnten die Lehmwände teilweise auch im Winter bestehen.¹⁶

Ein Beispiel hierfür sind Befestigungsmauern oder ganze Festungsanlagen in Deutschland und Spanien, die zwischen dem 1. und 6. Jhd v. Chr. errichtet wurden.¹⁷

Die Römer nutzten neben Steinen und gebrannten Ziegeln auch Lehm als Baustoff. Er wurde jedoch meist für nachrangige Gebäude genutzt. Diese bestanden aus luftgetrockneten Lehmziegeln oder aus mit Lehm beworfenen Flechtwerken. Stampflehmbauten wurden vorwiegend in holz- und steinar-men Gebieten Europas errichtet.¹⁸

Ab dem Mittelalter waren Holzstrukturen mit Leichtlehm-

mausfachungen die meist verbreitete Methode zu bauen und diese spannte einen Bogen von Frankreich bis in den Osten Europas.

In Großbritannien, Deutschland und Frankreich waren zusätzlich Wellerlehmbauten sehr verbreitet. Das Material für den Wellerlehm war ein Gemisch aus Lehm und Stroh. Nachdem die einzelnen Schichten übereinander platziert wurden, folgt die Nachbearbeitung durch das Abstechen mit einem Spaten um später eine gerade und homogenere Oberfläche zu erhalten.

In Spanien, Frankreich und Deutschland befindet sich außerdem eine Vielzahl an historischen Stampflehmbauten. Der Burgkomplex im spanischen Alhambra zählt vermutlich zu den bekanntesten Beispielen des mittelalterlichen Lehm-baus in Europa. Er ist zur Gänze von einer bis zu 20m hohen, massiven Stampflehm-mauer umgeben, die auch heute noch besichtigt werden kann. In Deutschland und Frankreich wurde die Stampflehmtechnik vor allem durch die Schriften von Francois Cointeraux stark beeinflusst. Von 1790 bis 1791 veröffentlichte er vier Hefte, in denen er die seit Jahrhunderten übliche französische Stampflehmtechnik genauer erläuterte („terre pisé“). Diese Hefte wurden kurz darauf bereits in die deutsche Sprache übersetzt und prägten den Stampflehmbau in weiterer Folge. Ein Beispiel für den deutschen Lehm-bau ist das 6-geschossige Wohnhaus in Weilburg an der Lahn. Es wurde um 1830 gebaut, und zählt zu den höchsten Lehmhäusern in Mitteleuropa. Es ist auch heute noch bewohnt.¹⁹

[16] Netzwerk Lehm - Fachverband zur Förderung des Lehmbaus sowie zur Vernetzung von Lehmbauschaffenden in Österreich, Geschichte des Lehmbaus

[17] Minke, 2022, S.9

[18] Netzwerk Lehm - Fachverband zur Förderung des Lehmbaus sowie zur Vernetzung von Lehmbauschaffenden in Österreich, Geschichte des Lehmbaus

[19] Minke, 2022, S.9



Abb.15: Umfassungsmauern in Alhambra, Stampflehm, Spanien, ca. 1300 n. Chr.

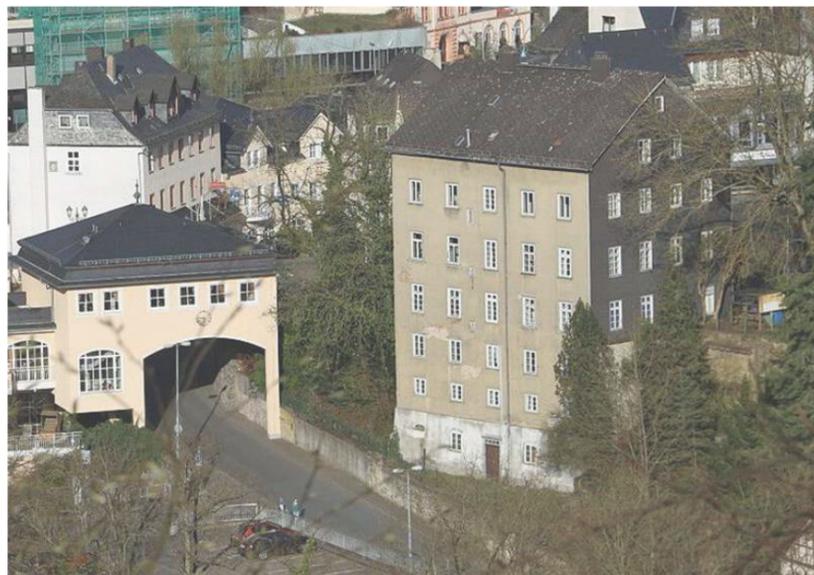


Abb.16: Lehmhaus mit sechs Stockwerken, Weilburg an der Lahn, Stampflehm, Deutschland, ca. 1830

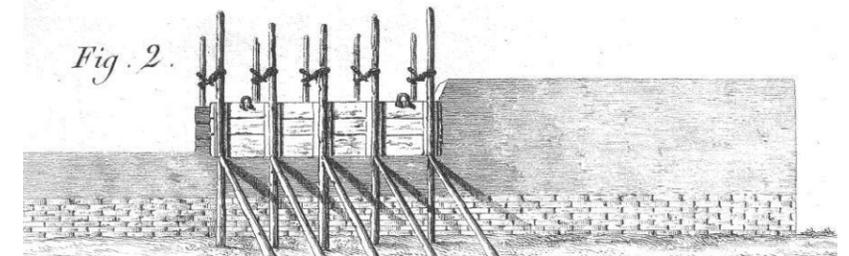
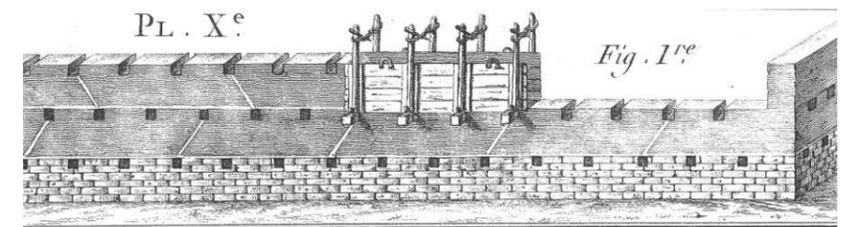
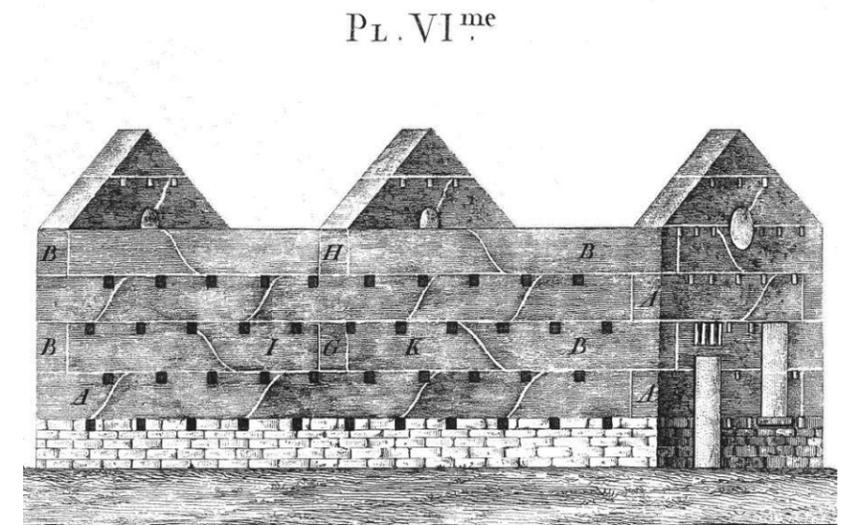


Abb.17: Zeichnungen aus „École d'architecture rurale“, Schalungssystem für Stampflehm, Francois Cointeraux, 1793

LEHMBAU IN ÖSTERREICH

Der historische Lehm in Österreich fand vorwiegend in holzärmeren Gebieten, wie dem Weinviertel, Teilen des Waldviertels (beides nördliches NÖ), sowie in Regionen im südlichen Burgenland statt.

Ein besonderes Merkmal der damaligen Dorfstrukturen im 19. Jahrhundert ist die Vielzahl der unterschiedlichen Lehmbautechniken. Um 1900 bestand fast das ganze Dorf aus Lehmbauten, wobei eben die Methode zu bauen von Gebäude zu Gebäude wechseln konnte. Die Technik, die im Norden Österreichs am meisten verwendet wurde, war der Lehmziegelbau. Zusätzlich kam der Stampflehm, das Lehmwuzelmauerwerk, der Wellerlehm oder das Quaderstockmauerwerk zum Einsatz. Heute findet man aufgrund zahlreicher Zu- und Umbauten eine Mischung aus unterschiedlichen Lehmbautechniken, sowie andere Materialien, wie gebrannte Ziegel, in den Dörfern vor.

Im Weinviertel wurde für die Errichtung der Presshäuser bereits das Aushubmaterial zum Bauen verwendet. In den zahlreichen Kellergassen nutzte man den stabilen Lösslehm, aus dem die Kellerröhren ausgegraben wurden, als Baumaterial. Im Burgenland hingegen nutzte man den Lehm als zusätzliche Schicht um sich vor der Witterung zu schützen. Nach der Fertigstellung der Holzblockbauten, trug man eine Lehmschicht mit einem hohen Strohanteil auf und schützte somit die Tragkonstruktion vor Regen und Schnee. Weiters verbesserte sich durch das Auftragen des Lehm-Strohgemisches nicht nur der Brandschutz, sondern auch die Dämmeigenschaften des Bauteils.²⁰

[20] Netzwerk Lehm - Fachverband zur Förderung des Lehmbaus sowie zur Vernetzung von Lehmbauschaaffenden in Österreich, Geschichte des Lehmbaus

Durch die Schaffung neuer Transportwege, die die Industrialisierung in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts mit sich brachte, war Kohle leichter zugänglich und wurde zum Befeuern von Feldöfen und in späterer Folge auch Ringöfen genutzt. Durch die höhere Kapazität der neuen Ziegelöfen in Niederösterreich, löste der gebrannte Ziegel nach und nach den Lehm als Baustoff ab. Erst gegen Ende des 20. Jahrhunderts, um 1980, fiel der Fokus wieder auf Lehm. Auf der Suche nach alternativen Baumaterialien fing man an mit Lehm zu experimentieren um einen energieeffizienten, nachhaltigen und ökologisch wertvollen Baustoff neu zu entdecken. Nach anfänglichen Versuchen im Selbstbau entwickelten sich daraus neue Möglichkeiten ganze Gebäude zu errichten.

Heutzutage wird Lehm meist in Verbindung mit Holz oder beim Strohballenbau genutzt. Aber auch als Monomaterial, speziell in Form von vorgefertigten Modulen, kommt Lehm zum Einsatz. Im Innenausbau finden vermehrt Lehmbauplatten, Lehmputze oder auch Lehmfarben Gebrauch.

Einer der führenden Lehmbauer im Gebiet der Vorfertigung mit Stampflehm ist Martin Rauch, der in seiner Werkshalle in Schlins, Vorarlberg transportfertige Lehmmodule herstellt. Weitere bekannte Lehmbauer:innen sind Andreas Breuss, Anna Heringer und Roland Meingast.²¹

In den nächsten Kapiteln wird auf den Lehm in den 21. Jahrhundert eingegangen und die Bauweisen, sowie einzelne Bauteile, wie Boden, Wand, Decke, Dach und Öffnungen analysiert und deren Anwendungsmöglichkeiten erläutert.

[21] Netzwerk Lehm - Fachverband zur Förderung des Lehmbaus sowie zur Vernetzung von Lehmbauschaaffenden in Österreich, Geschichte des Lehmbaus

Abb.18: Kellergasse von Raschala, Lehmziegelbauten und Lehmwuzelmauerwerke mit Lehmputz, Hollabrunn, NÖ

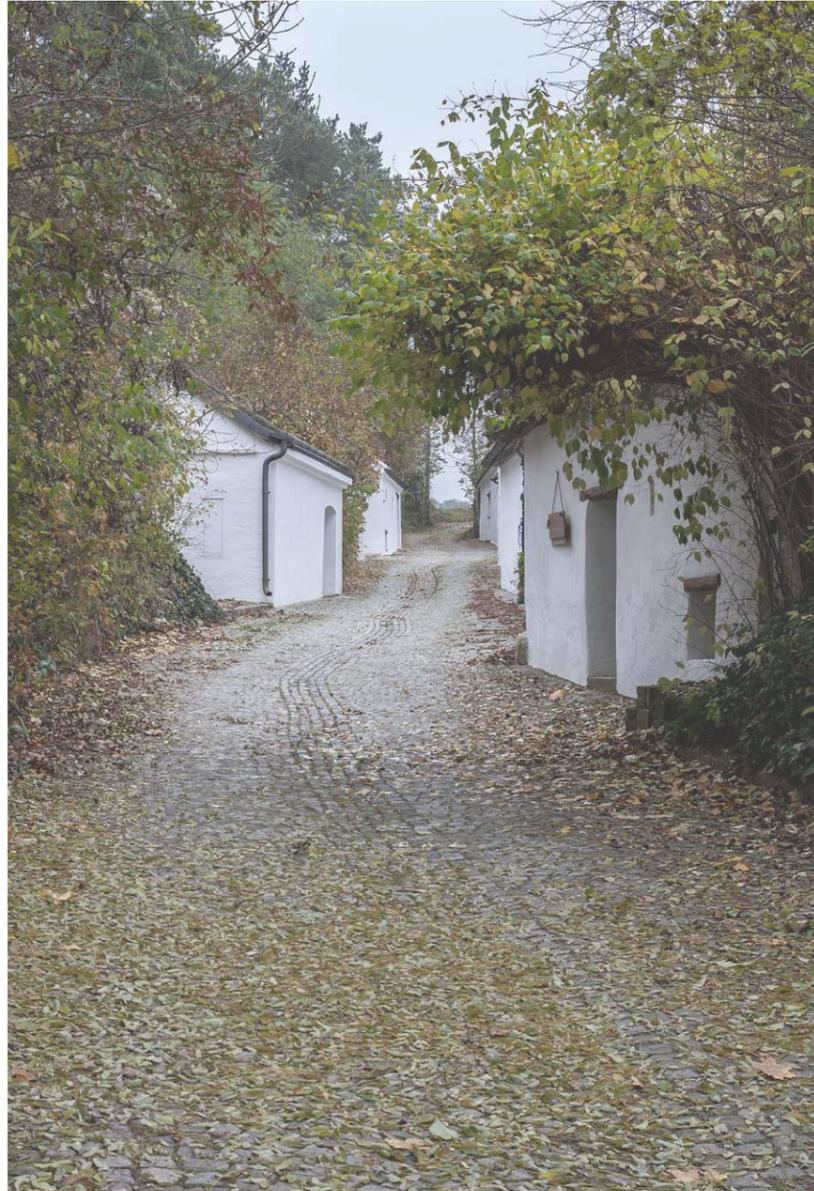


Abb.19: Lehmwuzelmauer mit Bruchsteinsockel, Wolfpassing, NÖ



Abb.20: Foto eines Stadls, Lehm-Pfostenkonstruktion in Roggendorf, NÖ



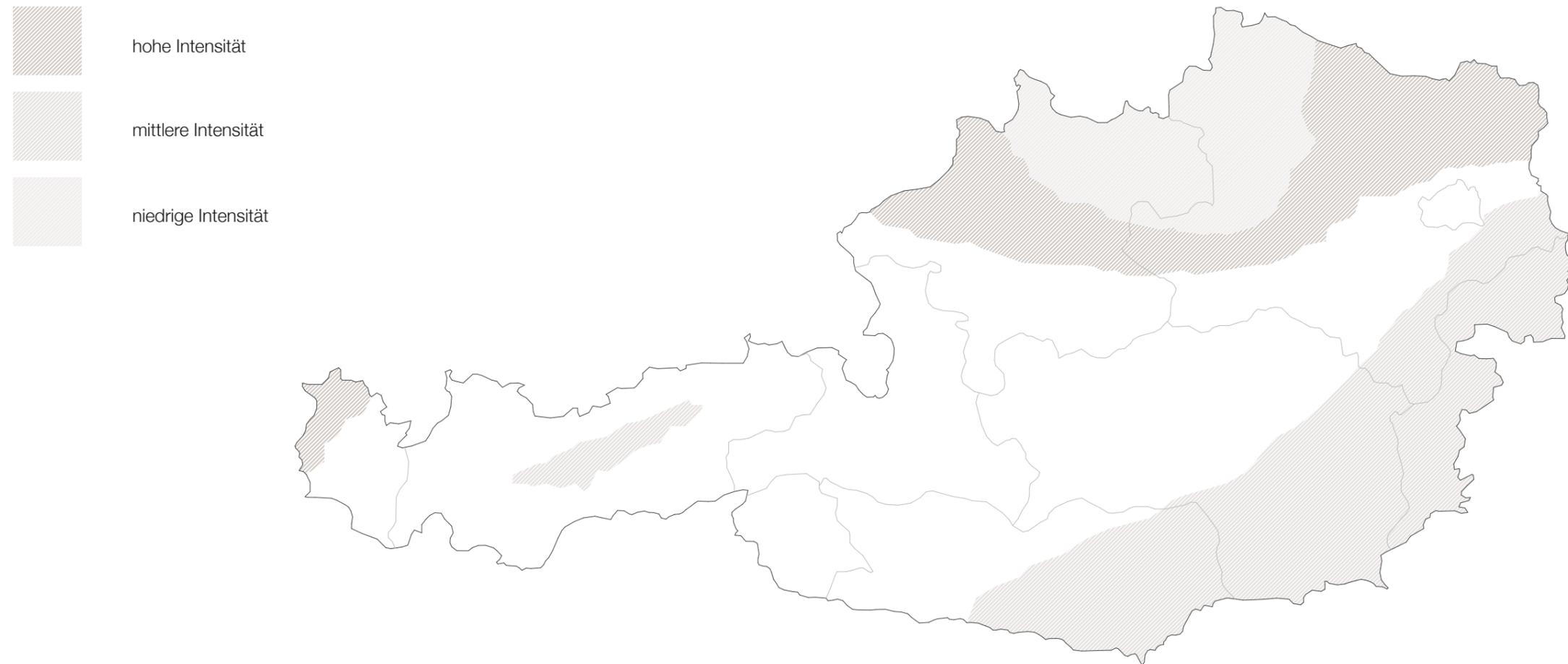


Abb.21: Lehmvorkommen Österreich, Übersicht der Intensität des Lehmvorkommens in Österreich, Lehmgruben

LEHMBAU HEUTE

Die Grenzen der Umweltbelastbarkeit und die Grenzen des Wachstums in Europa wurden spätestens in der Energie- und Ölkrise 1973 erkannt. Der steigende Wohlstand und die dadurch resultierenden Lebensgewohnheiten der modernen Industrieländer verdeutlichen die Abhängigkeit von kontinuierlichem Ölfluss.

„ ... (Die Krise) wird immer schlimmer werden, und sie wird zur Katastrophe führen, wenn wir nicht eine neue Lebensweise entwickeln, die mit den wirklichen Bedürfnissen der Menschennatur vereinbar ist, mit der Gesundheit der lebenden Natur um uns herum und mit den Rohstoffvorräten der Welt. Das ist tatsächlich ein großes Programm, nicht weil wir uns solch eine neue Lebensweise nicht vorstellen können, sondern weil die gegenwärtige Konsumgesellschaft sich wie ein Drogensüchtiger verhält, dem es überaus schwerfällt, sich von seiner Sucht zu lösen, ganz gleich wie elend er sich fühlt. Die armen Problemkinder der Welt sind deshalb die reichen Gesellschaften und nicht die Armen. ... Das System der Produktion der Massen weckt die schlafenden Kräfte, über die alle Menschen verfügen: die Klugheit ihrer Köpfe und das Geschick ihrer Hände, und unterstützt sie mit erstklassigem Werkzeug. Die Technologie der Massenproduktion ist in sich gewalttätig, umweltschädlich, selbstzerstörerisch mit Bezug auf nicht erneuerbare Rohstoffe und den Menschen verdummend. Die Technologie der Produktion der Massen, die sich des Besten an modernen Wissen und moderner Erfahrung bedient, führt zu Dezentralisierung, ist mit den Gesetzen der Ökologie vereinbar,

geht sorgsam mit knappen Rohstoffen um und dient dem Menschen, statt ihn mit Maschinen zu unterjochen.

Ich habe sie Mittlere Technologie genannt, um anzudeuten, dass sie der primitiven Technologie früherer Zeiten weit überlegen, zugleich aber sehr viel einfacher, billiger und freier als die Super-technologie der Reichen ist. Man kann sie auch Selbsthilfe-Technologie oder demokratische oder Volkstechnologie nennen - eine Technologie jedenfalls, zu der jedermann Zutritt hat und die nicht denen vorbehalten ist, die bereits reich und mächtig sind.“²²

Folglich legt sich der Fokus auf die natürlichen Baustoffe, die mittels Sonnenenergie wachsen können und durch diese auch verarbeitbar sind. Der Lehm kann an der Luft trocknen und lässt sich durch die Zugabe von Wasser immer wieder in eine neue Form wandeln. Das Holz und die pflanzlichen Fasern, welche wir zum Bauen nutzen, wachsen, ohne den CO₂-Haushalt zu schädigen nach.

Die Techniken, die beim Lehmbau verwendet werden, sind nicht komplex und größtenteils für jeden zugänglich ohne zuvor energietechnisch aufwändige Prozesse durchlaufen zu müssen, welche die Rohstoffe veredeln oder ihre Eigenschaften verändern.

Heutzutage gilt ein Baustoff als „nachhaltig“, wenn es technisch eine Möglichkeit gibt diesen zu recyceln, was aber nicht dem eigentlichen Sinn des Wiederverwendens entspricht, denn das Einschmelzen oder Zerkleinern von Materialien ist

[22] Schumacher, Die Rückkehr zum menschlichen Maß „Small is beautiful“, 1977

bei einem Rückgang von fossilen Rohstoffen nicht zielführend. Diese werden nicht in ihrer ursprünglichen Form wiederverwendet und die Wiederaufbereitung führt zu einer negativen Energiebilanz. Lehm kann mit sehr geringem Energieaufwand erneut verwendet werden, oder bei Nichtgebrauch einfach der Natur überlassen werden, ohne dabei den Menschen oder die Umwelt negativ zu beeinflussen oder gar zu schaden.²³

Ein Punkt der nicht außer Acht gelassen werden darf, ist der, dass das Bauen mit Lehm derzeit hohe Kosten mit sich bringt. Mit Eigenbau kann man sich zwar Abhilfe verschaffen und sein Geschick unter Beweis stellen die eigens gefertigten Lehmbaumstoffe zu verarbeiten, wobei es sinnvoll ist im größeren Maßstab zu denken. Es gibt bereits zahlreiche Baustoffhersteller und Baufirmen die sich explizit mit Lehm beschäftigen. Durch ihre Qualifikation, ihr Know-How und ihrer Ausrüstung ist es den Firmen möglich den Lehm bau professionell anzuwenden und gegebenenfalls auch weiterzuentwickeln. Vor allem die Holz-Lehm-Hybridbauweise soll in Zukunft forciert und weitergedacht werden. Ein tragendes Holzskelett übernimmt einen großen Teil der auftretenden Lasten im Gebäude und ermöglicht es höher zu bauen als die bisher im reinen Lehm bau üblichen zwei bis drei Geschosse. Dadurch können Bauvorhaben im Wohnbau, im betrieblichen Bau (Hallenbau), sowie öffentliche Gebäude in Form von Schulen, Kindergärten, etc. konstruktiv einfacher umgesetzt werden.

Die Möglichkeiten, die der Lehm bau heute bietet, sind sehr

[23] Volhard, 2021, S.31f

vielfältig. Das Material für einen Massivbau aus Stampflehm kann sowohl vor Ort aus dem Boden entnommen werden, als auch aus im Werk vorgefertigten Lehm bausteinen oder Lehm ziegeln bestehen. Die Lehm wand übernimmt in diesem Fall die tragende Funktion und wird dementsprechend dick dimensioniert, was zwar einen Grundflächenverlust mit sich bringen kann, aber vergleichsweise günstiger in der Umsetzung ist.

Im Gegensatz dazu gibt es die Möglichkeit einen Skelettbau aus Holz anzudenken, welcher einen Großteil der statischen Funktionen des Lehms übernimmt und anschließend mit Lehm baustoffen, wie Faser- und Strohlehm oder Lehm steinen, ausgefacht wird. Ein Vorteil der Skelettbauweise ist, dass die Wände bei Schlechtwetter nicht immer vollständig vor dem Regen geschützt werden müssen und das Bauen auch nicht so stark von der Jahreszeit abhängig ist.²⁴

Derzeit befinden sich verschiedene Lehm baustoffe und Holz-Lehm-Hybridelemente im Test und durchlaufen Versuche im Bezug auf Eigenschaften wie Brandverhalten, Schallschutz, Vorfertigung, Kosten- und Ressourceneffizienz. In Wien gibt es bereits erste Annäherungen das Stahlbetonskelett eines sozialen Wohnprojekts mit vorgefertigten Holz-Lehm-Modulen auszufachen.²⁵

[24] Volhard, 2021, S.32f

[25] WUP zt GmbH, Mitarbeit - Stand Jänner 2024



Abb.22: Haus Rauch,
Schlins, Vbg., 2010

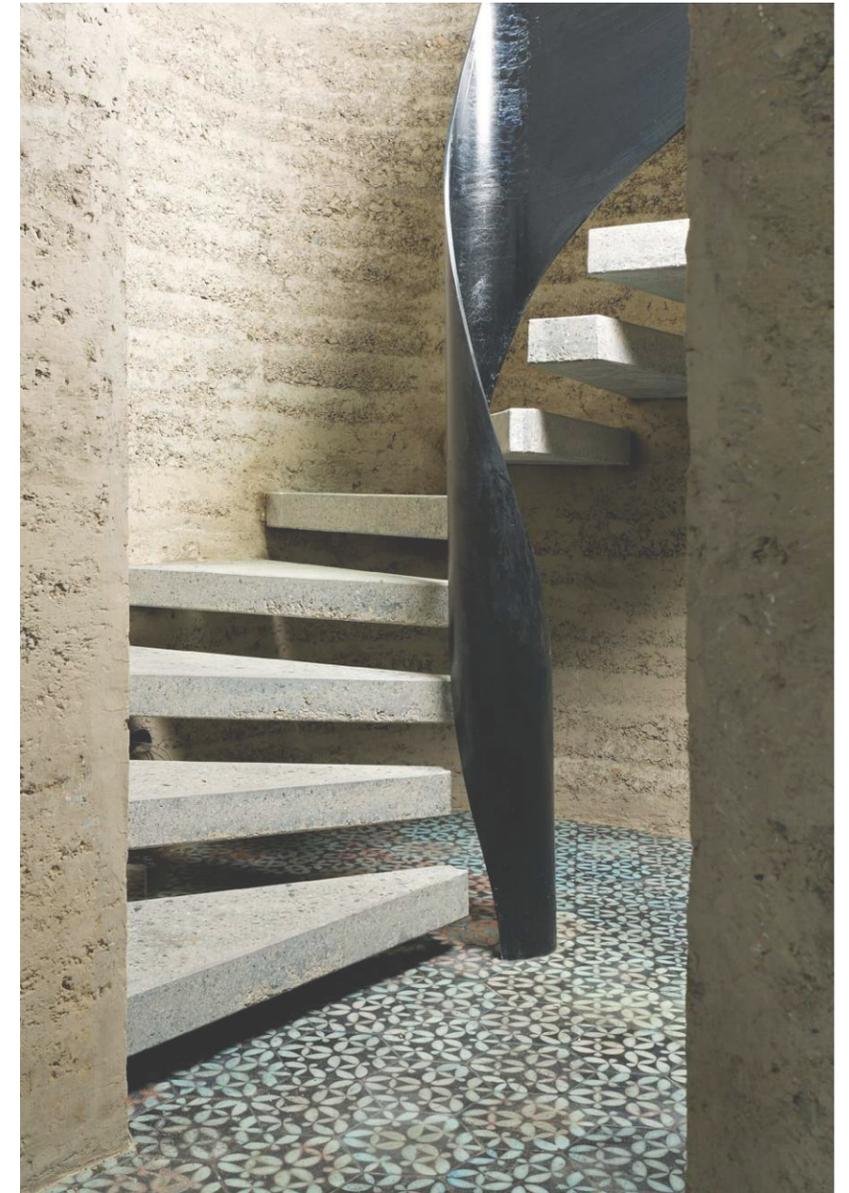


Abb.23: Stiegenhaus im
Haus Rauch, Schlins, Vbg.,
2010

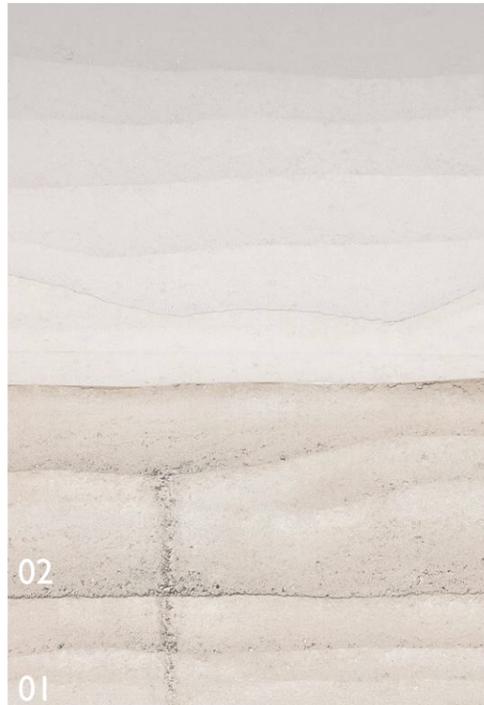


Abb.24: Facade, Aerecura
Earth Rammed Builders

02

BAUEN MIT LEHM

Analyse des Baustoffes Lehm, sowie seine materialspezifischen Eigenschaften und Verwendungsarten.

NUTZUNGSARTEN | LEHMBAUWEISEN

Lehm verfügt über eine Vielfalt an baulichen, technischen und architektonischen Anwendungsmöglichkeiten, die seiner Verarbeitung dienen. Das Wissen über die Methoden wurde durch Analysen historischer Bautraditionen, sowie den Bestandsaufnahmen moderner Lehmarchitekturen, erlangt, sodass man letztendlich zwölf verschiedene Techniken nachweisen konnte. Diese zwölf Arten lassen sich nochmals in drei unterschiedliche Kategorien teilen. In der ersten Kategorie dient der Lehm als massives, monolithisches Bauteil. In der zweiten Kategorie wird Lehm in Form von kleineren Bausteinen als Teil eines Mauerwerks verwendet. In der letzten Kategorie nutzt man Lehm bei der Vorbereitungsphase zur Errichtung eines Tragwerks.²⁶

Zu den zwölf Nutzungsarten gehören folgende Methoden:

- *Ausgehöhlte Erde (1)*

Zum Bau von Höhlenwohnungen wird tief unter die Oberfläche gegraben und dadurch Raum geschaffen.

- *Lehm als Abdeckung (2)*

Lehm wird als Deckung von Dächern genutzt. Diese bestehen meist aus Holz und haben eine leichte Neigung. Flachdächer mit Begrünung sind möglich.

- *Lehm als Füllmaterial (3)*

Tragende und nicht tragende Hohlbauteile werden mit Lehm gefüllt.

- *Zugeschnittene Lehmblöcke (4)*

Der Lehm wird bereits im Boden zugeschnitten und zum Bau eines Mauerwerks verwendet. Die Größe der Lehmblöcke variiert je nach Gebrauch.

- *Gepresster Lehm (5)*

Durch das Pressen des Lehms können unterschiedliche Baustoffe und Formen produziert werden. Die Schalungen bestehen meistens aus Holz oder Stahl. Die Stampflehmbauweise zählt hier zu den wichtigsten Techniken.

- *Modellierter Lehm (6)*

Das Material wird hier in weicher Konsistenz verarbeitet. Per Hand werden nach und nach einzelne Schichten übereinander aufgetragen und bilden eine Wand.

- *Schichtlehm (7)*

Tragende Mauern werden aus übereinandergestapelten Lehmkugeln errichtet. Diese Methode ist in Europa nicht mehr gebräuchlich.

- *Gegossener Lehm (8)*

Mithilfe von Gießformen werden Lehmziegel und Lehmblöcke hergestellt. Diese erlangen durch Zugabe von pflanzlichen Zuschlägen eine höhere Zugfestigkeit und können nach dem Lufttrocknen verbaut werden.

[26] Dethier, 2019, S.31

-Stranggepresster Lehm (9)

Lehm wird mithilfe von Düsen in Strängen gepresst, wodurch Lehmziegel entstehen. Den Ursprung dieser Methode bildet eigentlich die Ziegelherstellung.

-Gegossener Lehm (10)

Der sandig, raue Lehm wird in Schalungen mit mehreren Kammern gegossen, wodurch massive Mauern errichtet werden können. Die Technik eignet sich auch zum Pflastern und zu Herstellung von Böden.

-Strohleichte Lehm und Leichtlehm (11)

Bei diesen Baustoffen werden Tonschlamm und Pflanzenfasern miteinander vermengt, sodass sich seine Dichte auf 600-1200kg/m³ verringert. Häufig wird der Leichtlehm im Holzbau als Ausfachungselement angewendet.

-Bewurf aus Strohlehm (12)

Die Nutzungsart ist eine der ältesten, was das Bauen mit Lehm betrifft. Der feuchte Lehm wird mit Stroh gemischt und dient als Füllelement oder als äußerste Schicht eines Wandaufbaus. Die tragende Struktur bildet meist eine Holzkonstruktion oder geflochtene Zweige.²⁷

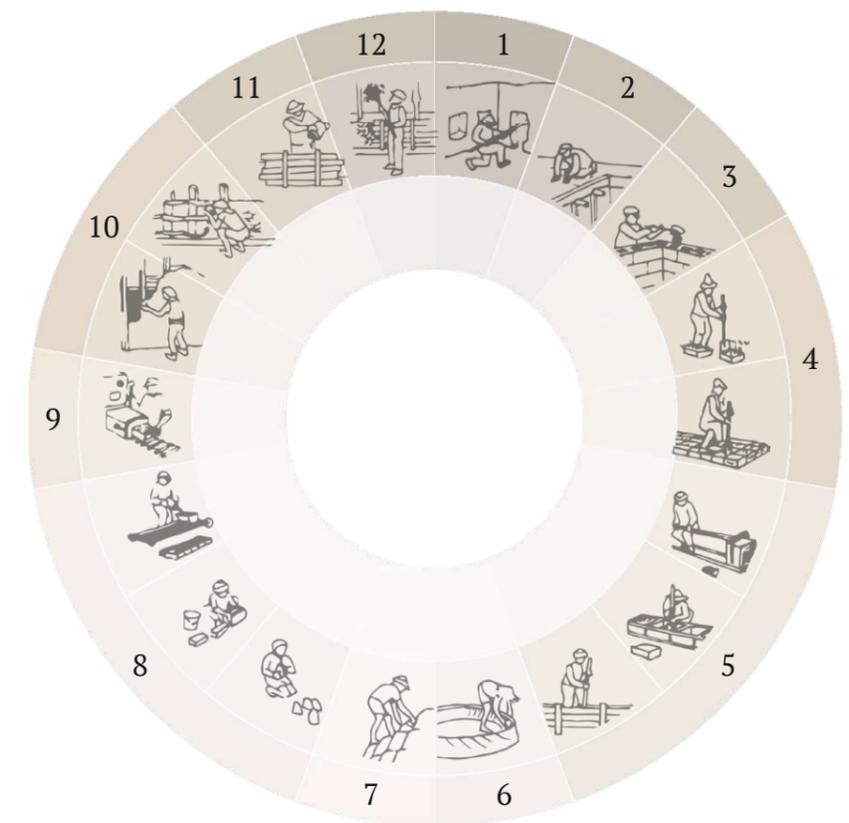


Abb.25: Grafik mit den zwölf relevantesten Lehmbautechniken, CRAterre

[27] Dethier, 2019, S.31f

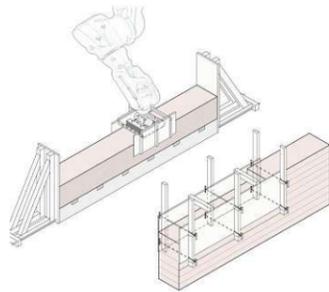


Abb.26: Schalungen, Vergleich einer robotisch geführten Gleitschalung und einer klassischen Kletterschalung

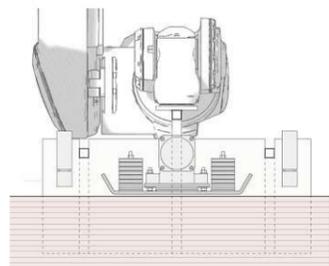


Abb.27: Schalungsroboter, Konzept einer robotisch geführten Gleitschalung auf einer Stampflehmwand

STAMPFLEHMBAUWEISE

Mit der Technik des Stampfens können tragende und nicht tragende Wände, sowie Fußböden hergestellt werden. Bei der traditionellen Stampflehmbauweise wird das erdfeuchte Material in Schalungen eingebracht und mittels Stampfen mit verschiedenen Werkzeugen verdichtet. Die einzelnen Schichten sind nach dem Stampfen in der Regel 10 bis 15 cm dick und nach dem Austrocknen werden weitere Schichten hinzugefügt bis sich eine Wand daraus bildet.

In Europa verbreitete sich diese Technik gegen Ende des 18. Jahrhunderts von Frankreich aus (franz.: „terre pisé“ oder „pisé de terre“). Heutzutage werden Stampflehmwände nur noch selten per Hand errichtet, da der Arbeits- und Zeitaufwand zu groß ist. Durch die Weiterentwicklung der Werkzeuge und vor allem der Schalungstechniken ist es möglich die Stampflehmbauweise als ökologische und ökonomische Alternative zum herkömmlichen Bauen zu betrachten.

Ein wesentlicher Punkt bei der Herstellung einer Stampflehmwand ist die richtige Vorbereitung der Schalung, da der Aufwand für das Montieren dafür 25 bis 30 % des Zeitaufwandes betragen kann. Bei der Wahl des Schalungssystems ist es wichtig, Bretter mit ausreichender Stärke zu wählen, damit sie sich beim Verdichten des Lehms nicht nach außen durchbiegen. Weiters sollte gewährleistet sein, dass die Schalung von zwei Personen, sowohl in der Vertikalen, als auch in der Horizontalen, leicht verändert werden kann um den Zeitaufwand gering zu halten.

Die Werkzeuge, die beim Stampfen eingesetzt werden, sind

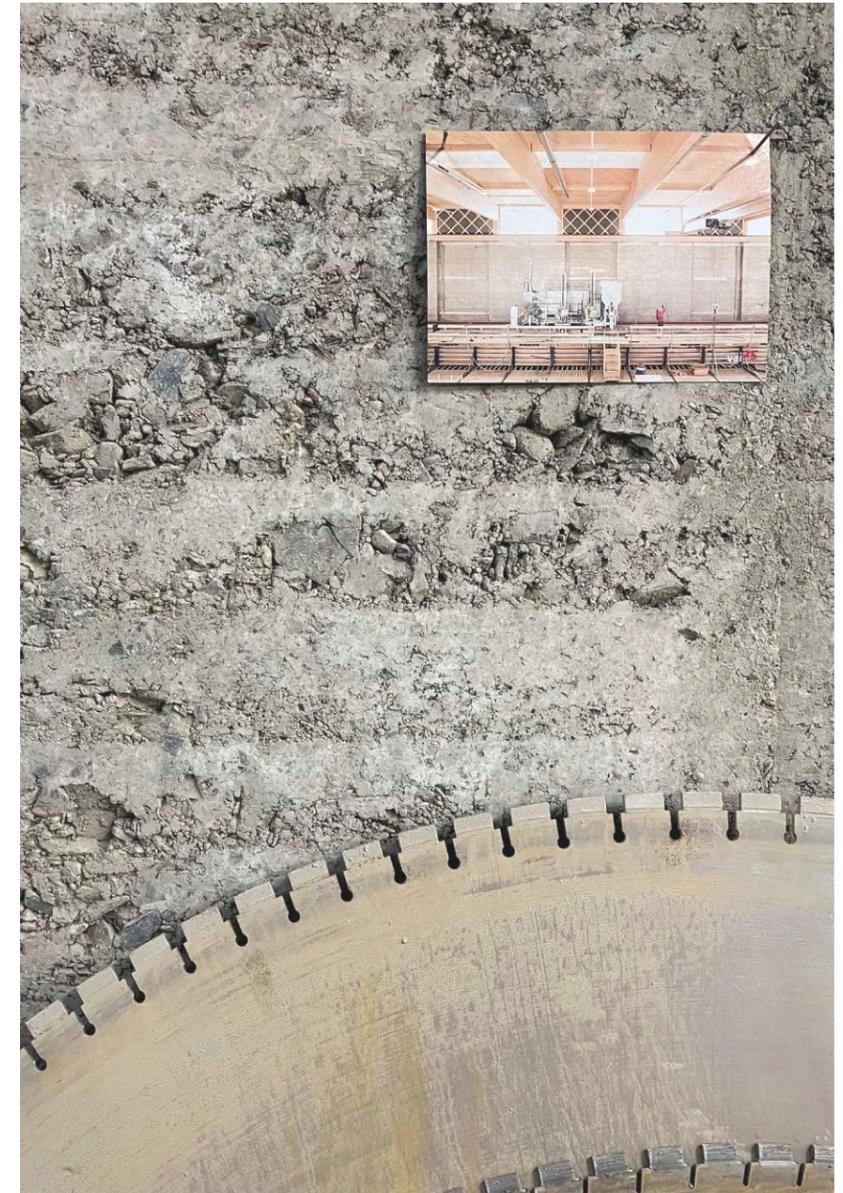


Abb.28: Stampflehmwand mit Sägeblättern, Vorarlberg, Werkshalle LehmTonErde

pneumatische Stampfer, die über einen Kompressor angetrieben werden oder elektrische Vibrationsstampfer. Manuelle Stampfgeräte finden nur noch selten Gebrauch.²⁸

Beim Herstellungsprozess von Stampflehmwänden werden 50 bis 80 cm hohe Wandteile gestampft. In weiterer Folge verschiebt man die Schalung in horizontaler Richtung um die nächste Schicht zu bearbeiten. Sobald die Lage fertiggestellt ist, wiederholt sich die Vorgehensweise und es folgt die zweite Lehmschicht darüber.

Durch das Antrocknen der unteren Lage, sowie dem stärkeren Schwindverhalten der frischen Schicht, kommt es zu horizontalen Fugenausbildungen, welche dem Lehm schaden können. Bei Einwirkung von Frost oder Regen kann der Lehm abplatzen bzw. ausgespült werden. Sollte zusätzlich Kapillarwasser ins Bauteil gelangen, wird das Material wieder weich und verliert an Tragfähigkeit, wodurch sich als Folgereaktion Risse bilden.

Um dieser Rissbildung entgegenzuwirken, nutzte man bereits bei der französischen Pisé-Technik Kalkmörtel, welcher nach jeder Lage aufgetragen wurde. Er wurde ebenfalls für die diagonalen Schichten verwendet, die das typische Erscheinungsbild des französischen Stampflehmbaus prägen.

Die Abbindezeit des Kalkmörtels ist wesentlich länger als die des Lehms, wodurch er plastisch bleibt bis die Wand ausgetrocknet ist und sich somit keine Risse bilden.²⁹

[28] Minke, 2022, S.60ff

[29] ebenda, S.64



Abb.29: Fugenbild einer historischen Stampflehmfassade, Diagonale Mörtelbettung, Frankreich



Abb.30: Stampflehmfassade, eingearbeitete Ziegel als Erosionsbremse, Haus Rauch, Vorarlberg

MATERIALKENNWERTE STAMPFLEHMDruckfestigkeit: 2,4 N/mm²Biegezugfestigkeit: 0,52 N/mm²Scherfestigkeit: 0,62 N/mm²

Kriechmaß: 0,2 %

Trockenschwindmaß: 1 - 6 %

(je nach Zusammensetzung, kieshaltig oder tonhaltig)

Wärmeleitfähigkeit: 0,64 - 0,93 W/mK

(materialabhängig, je nach Zusammensetzung) ³⁰

Schwindmaß: 0,25 - 1 %

(materialabhängig, je nach Zusammensetzung)

Rohdichte: 2000 - 2300 kg/m³(je nach Zusammensetzung) ³¹Gestampfter Lehm ist in der Regel ab einer Stärke von 35cm tragend. ³²

Abb.31: Wellerlehm aus Baulehm und Stroh

LEHMWELLERBAUWEISE

Historisch gesehen ist der Wellerbau (Österr.: G'satzte Wand) eine der meist verbreiteten Methoden mit Lehm zu bauen. Gerade wegen der Einfachheit in der Herstellung und dem geringen Werkzeugaufwand wird diese Technik heute noch in vielen Gebieten Asiens und Afrikas angewendet. In Europa nutzt man den Wellerbau eher zur Sanierung bestehender Lehmgebäude. ³³

Die benötigten Baustoffe beschränken sich hierbei auf Baulehm und Stroh, welche in der richtigen Mischung die Grundlagen bilden. Zwischen 22 und 28 kg Stroh werden 1m³ Lehm beigemischt, sodass daraus eine zähe und breiige Masse entsteht.

Im Gegensatz zur Errichtung von Stampflehmwänden wird beim Wellerbau keine Schalung benötigt. Die Mischung wird mit Schwung, entweder per Hand oder mit einer Mistgabel, in Lagen übereinander geschichtet, wodurch der Lehm auch ausreichend verdichtet wird. Die Strohhalme verhindern das Auseinanderfließen der Masse und es bildet sich beidseitig ein Überhang, welcher nach einer Antrocknungsphase von ca. 7 bis 21 Tagen mit einem Spaten plan abgestochen werden kann, um eine glatte Oberfläche zu schaffen. Bei Häusern mit unverputzter Fassade lassen sich durch das Abstechen vertikale Strohhalme erkennen und so leichter von einer Wand aus Stampflehm unterscheiden. Um Material zu sparen können die Lehmreste nach dem Abstechen wieder zum frisch angerührten Wellerlehm hinzugefügt werden.

Aufgrund der konstruktiv notwendigen Wandstärke von

[30] Kapfinger/Sauer, 2022, S.131

[31] Boltshauser/Veillon/Maillard, 2020, S.273

[32] ebenda, S.173

[33] Netzwerk Lehm - Fachverband zur Förderung des Lehmbaus sowie zur Vernetzung von Lehmbauschaaffenden in Österreich, Lehmbautechniken



Abb.32: Abgestochene Mauer aus Wellerlehm

50-60 cm wurde diese Methode eher an den Außenwänden eingesetzt. Tragende, sowie nichttragende Innenwände, wurden nach der Schwindphase, mit Lehmsteinen aufgebaut. Diese sind durch eine Nut in der Wellerwand in das statische System eingebunden, konnten aber auch stumpf gestoßen sein, was bei Sogwirkung an der Außenwand jedoch unvorteilhaft war.

Die einzelnen Sätze der historischen Wellerlehmbauten variieren zwischen 50 und 110 cm. Im Durchschnitt haben sie aber eine Höhe von 70 bis 80 cm.

Ein Nachteil, den diese Bauweise mit sich bringt, ist, dass Wellerwände eine sehr lange Trocknungszeit benötigen. Dieser Faktor beeinflusst einerseits das Raumklima im Inneren des Gebäudes, andererseits die Fassade und ihre Gestaltung. Wird der Außenputz zu früh auf die Wand aufgebracht, kann sich der Trocknungsprozess verlängern und es kann dazu führen, dass sich der Putz ablöst. Zum besseren Halt von Putz an Außenwänden wurden Ziegel- oder Schlackesplitter in den Lehm gedrückt, die einen Haftgrund bildeten.³⁴

Nach der Einführung von Systemschalungen und der damit einhergehenden Zeitersparnis im Bauablauf, wurde die Wellerlehm Bauweise von der Stampflehm Bauweise abgelöst. Ein Beispiel für einen modernen Bau aus Wellerlehm in Kombination mit Holz ist das 2010 erbaute Haus Flury in Deitingen in der Schweiz.³⁵

Die Holzkonstruktion übernimmt die Lasten und wird die Lehmwände eingebunden. Die naturbelassene Außenwand wird durch ein auskragendes Dach geschützt.³⁶

[34] Röhlen/Ziegert, 2010, S.176ff

[35] materialarchiv.ch, KB, Wellerlehm, 2014

[36] hausinfo, Architektur-Reportage: Konsequenz ökologisch



Abb.33: Abstechen einer Wellerlehm mauer, Deitingen, 2010

Foto: ETH Material Hub



Abb.34: Innenansicht eines Wellerlehmbaus, Deitingen, 2010

Foto: ETH Material Hub



Abb.35: Außenansicht eines Wellerlehmbaus, Deitingen, 2010

Foto: Stefan Weber, Jens

LEHMSTEINBAUWEISE

Anwendungsklassen (AK)

- AK Ia:
Verputztes, bewittertes
Außenmauerwerk mit Sicht-
fachwerkwänden
- AK Ib:
Durchgehend verputztes,
bewittertes Außenmauerwerk
- AK II:
Verkleidetes und unbewit-
tertes Außenmauerwerk,
Innenmauerwerk
- AK III:
Trockene Anwendung

Abb.36: Auflistung der
Anwendungsklassen von
Lehmsteinen



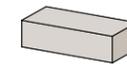
Abb.37: Schwerer strangge-
presster Lehmstein, AK II

Im Allgemeinen ist bei der Lehmsteinbauweise das Bauen mit ungebrannten Ziegel oder Steinen aus Lehm in Verbindung mit einem Kalk- oder Lehmmörtel gemeint. Durch die Art ihrer Herstellung wird zwischen drei Begriffen unterscheiden. Diese sind Grünlinge, Lehmquader und Lehmputzen.

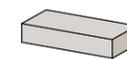
Die Grünlinge bestehen aus vorwiegend fettem Lehm und haben keine mineralischen Zuschläge. Sie können entweder industriell per Strangpressverfahren oder manuell mit den Handstrichverfahren produziert werden. Am häufigsten kommen Ziegel mit Abmessungen von 24 x 11,5 x 7,1 cm (Normalformat), 5,1 x 11,5 x 24 cm (Dünformat), 30 x 11,5 x 7,1 cm (Klosterformat) bis 24 x 11,5 x 11,3 cm (2 Dünformat) vor. Wegen ihres vergleichsweise hohen Gewichts, werden diese Bausteine meist mit Hohlräumen versehen. Wichtig ist, dass Grünlinge in kalten Regionen nie die äußerste Schicht einer Außenwand bilden, da sie nicht frostfest sind.

Als Lehmquader werden großformatige Lehmsteine bezeichnet. Ihre Maße betragen in der Regel 38 x 25 x 12 cm und sie werden direkt aus dem erdfeuchten Material in Formen gestampft. Ihr Gewicht beträgt ca. 20kg, was das Vermauern etwas erschwert.

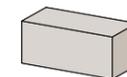
Die Masse von Lehmputzen besteht aus einer nassen, mittelfetten Lehmmischung, der oft faserige Zuschläge hinzugemengt werden. Durch das Schlagen oder „Patzen“ in eine Holzform, wird das Material verdichtet und erhält gleichzeitig seinen Namen. Die gewöhnlichen Abmessungen betragen bei den Lehmputzen 25 x 12 x 12 cm oder 24 x 24 x 7 cm.³⁷



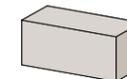
Normalformat NF
24 x 11,5 x 7,1 cm



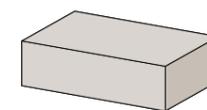
Dünformat DF
24 x 11,5 x 5 cm



2 Dünformat 2DF
24 x 11,5 x 5 cm



Lehmputzen
25 x 12 x 12 cm



Lehmquader
38 x 25 x 12 cm

Abb.38: Verschiedene For-
mate von Lehmbausteinen

Im historischen Lehmsteinbau wurden ein- bis zweigeschossige Bauten mit diesen Techniken errichtet. Häufig wurde nur das Erdgeschoss aus Lehmziegeln gebaut und man wechselte, um Gewicht zu sparen, beim Obergeschoss auf eine Fachwerkskonstruktion, die später mit Leichtlehm ausgefüllt wurde. Diese Vorgehensweise wurde auch beim Wellerbau vermehrt angewendet. Die Wandstärken betragen bei zweigeschossigen Gebäuden im Erdgeschoss etwa 50 cm. Im Obergeschoss gibt es einen Rücksprung auf 40 cm um die Deckenkonstruktion einzubinden. Die Innenwände aus Lehmsteinen sind mit einer Dicke von 25 cm wesentlich schlanker und finden auch bei Stampflehm- und Wellerbauten Anwendung.³⁸

Bei der Verarbeitung von ungebrannten Ziegeln ist es, wie bei den anderen Lehmbautechniken, wichtig, dass der Baustoff vor Feuchtigkeitseinfluss und Regen geschützt ist. Einzig beim Aufmauern einer Wand aus Grünlingen werden die Bausteine leicht angefeuchtet und fest aneinandergespresst, sodass sie sich mit ihrer weichen Oberfläche besser mit den darunterliegenden Grünlingen verbinden. Dadurch entfällt der Einsatz von Lehm- oder Kalkmörtel.

Kommen andere Lehmsteine zum Einsatz, benötigt man jedenfalls eine verbindende Masse. Der Unterschied zum Mauern mit herkömmlichen gebrannten Ziegel zeigt sich darin, dass der Mörtel magerer ausgeführt werden muss.

Lehmsteine entziehen dem Mörtel sehr schnell sehr viel Flüssigkeit, wodurch sich Risse in den Fugen bilden können. Die Lagerfuge selbst kann bei dünnerer Ausführung auch dazu

[37] Minke, 2022, S. 70

[38] Röhlen/Ziegert, 2010, S.197ff

beitragen Rissbildungen zu vermeiden.³⁹

Das „Projekt Lehmhaus“ in Meißen, welches 2022 fertiggestellt wurde, zeigt ein klassisches Mehrfamilienhaus. Nicht nur die Innenwände, sondern auch die Außenwände wurden aus getrockneten Lehmsteinen errichtet und bilden, zusammen mit Stahlbetondecken, die Tragkonstruktion. Als Deckenkonstruktion wurde bewusst der schwere Stahlbeton verwendet, um die Leistungsfähigkeit von Lehmmauerwerken zu demonstrieren.⁴⁰

Lehmbausteine können zusätzlich in Form von Leichtbausteinen, als Ausfachung in einem Holz-Lehm-Hybridbau, eingesetzt werden. Aufgrund ihrer geringen Druckfestigkeit können Leichtlehmbausteine allerdings keine Lasten aufnehmen.⁴¹

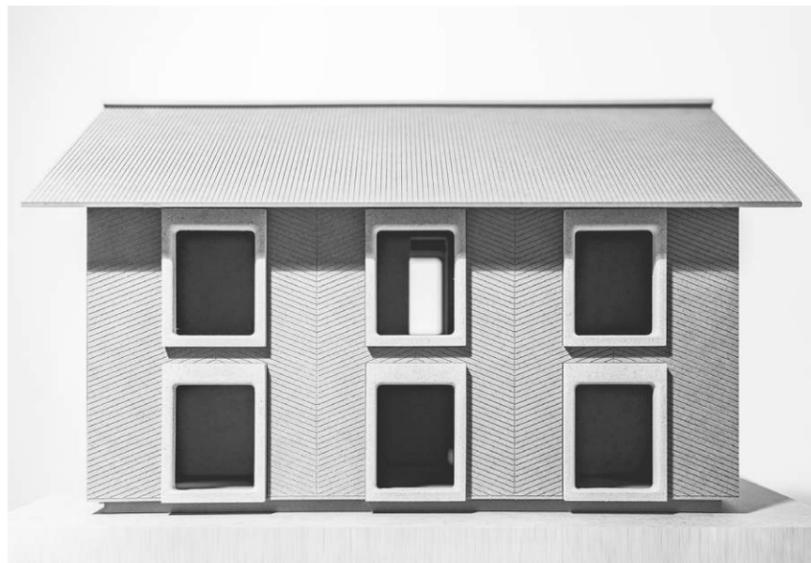


Abb.39: Fassadenkonzept, Lärchenholz mit dahinterliegender Hanfdämmung, Projekt Lehmhaus, Meißen, 2022

[39] Minke, 2022, S. 76

[40] Stern Zürn Architekten, Projekt Lehmhaus, 2019

[41] Minke, 2022, S. 77f



Abb.40: Herstellung eines Lehmmauerwerks, Projekt Lehmhaus, Meißen, 2022



Abb.41: Tragende Mauer aus schweren Lehmsteinen, Projekt Lehmhaus, Meißen, 2022

HYBRIDBAUWEISEN

Bei hybriden Bauweisen werden mindestens zwei Baustoffe vereint. Dadurch lassen sich nicht nur konstruktive Bauteile, sondern auch ganze Tragwerke bilden. Lehm dient meist als Ausfachung eines Skelettbaus und übernimmt, bis auf wenige Ausnahmen, keine statischen Funktionen.

Im deutschen Bad Aibling werden derzeit Versuchshäuser gebaut, die besonders auf die Kombination aus Holz und Lehm als Tragstruktur setzen. Das „Versuchshaus 4“ wurde von Florian Nagler geplant und besitzt drei Stockwerke, das heißt ein Stockwerk mehr als die deutschen Richtlinien für tragende Bauteile aus Lehm derzeit vorgeben.

Die Konstruktion besteht grundsätzlich Holz und Mauerwerk. Über Innenwände aus Lehmsteinen, einer zentralen Wandachse aus ReUse Klinker und Außenwänden in Brettstapelbauweise werden Lasten abgetragen. Weiters wurde das Stiegenhaus mithilfe von Lehmsteinen und Konstruktionsvollholz erstellt. Ursprünglich sollte auch die mittlere Wandachse ein Lehmmauerwerk sein, was aber aufgrund von Lieferschwierigkeiten von Lehmsteinen mit ausreichender Druckfestigkeit nicht durchführbar war und man deshalb wiederverwendbaren Klinker nutzte. Beim bevorstehenden Bau des Versuchshaus 5 sollen verschiedene Wand- und Deckenkonstruktionen gebaut und anschließend analysiert werden.⁴²

Der heutige Holz-Lehmbau ist auch eine Weiterentwicklung des traditionellen Fachwerkbau und wurde an die bauphysikalischen und bautechnischen Anforderungen der heutigen Zeit angepasst. Als Ausfachungen der Tragstrukturen im Skelettbau

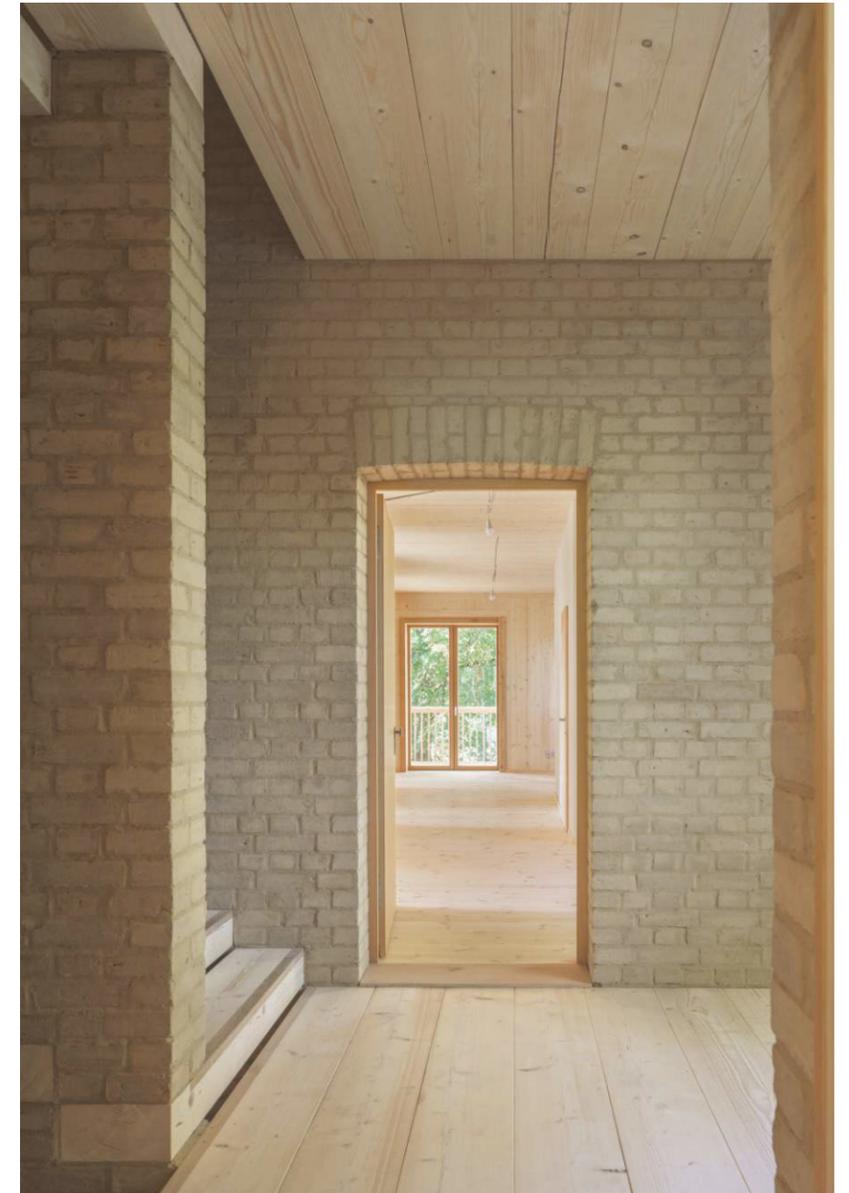


Abb.42: Stiegenhaus und Wohnungseingangtür mit gemauertem Sturz aus Lehmsteinen, Versuchshaus 4, Bad Aibling

[42] Bauverlag BV GmbH, Ausloten was geht, 2024

Abb.43: Stiegenhaus und Stufen aus Konstruktionsvollholz, Versuchshaus 4, Bad Aibling (links)



Abb.44: Tragende Innenwand mit Holzbalken zur optimalen Lastenverteilung, Versuchshaus 4, Bad Aibling (rechts)



Abb.45: Tragende Innenwand aus schweren Lehmsteinen, Versuchshaus 4, Bad Aibling

dienen z.B. Strohlehm, Faserlehm und Leichtlehm. Der Stroh- und Faserlehm unterscheidet sich durch sein Trockengewicht von 1200 bis 1700 kg/m³ vom Leichtlehm und wird vor allem für Wand- und Deckenausfachungen oder als dicke Putzschicht verwendet. Vom Prinzip her ist die Herstellung von Strohlehm ähnlich zu der des Wellerlehms, wobei der erstgenannte über bessere Wärmedämmeigenschaften verfügt.

Faserlehm wird mit verschiedenen Fasern vermengt und eignet sich als dünne Putzschicht, als Spritzmörtel und kann für die Produktion von Bausteinen genutzt werden.⁴³

Am häufigsten nutzt man Stroh- und Faserlehm um Geflechte, Stakungen und Lattungen einer Holzkonstruktionen auszufachen. Die einzelnen Gefache können sowohl vor Ort mit Strohlehm versehen werden, als auch herausgenommen, bearbeitet und als fertiges Lehmwandelement ins Gefüge eingestetzt werden. Ein weiterer wichtiger Anwendungsbereich ist die Sanierung von Bestandsgebäuden.⁴⁴

Als Leichtlehm wird grundsätzlich ein Baustoff beschrieben, der, wie Strohlehm, aus Lehm und Stroh oder anderen leichten Zuschlägen besteht, wobei diese den Hauptbestandteil des Materials ausmachen und der Lehm nur als Bindemittel fungiert. Die Rohdichte reicht von 400 bis 1200 kg/m³. Bei Zugabe von sehr fettem Lehm sind auch 300 kg/m³ möglich. Die Zuschläge können auch mineralischer Natur sein (z.B. Blähton).

Der Vorteil, den das Bauen mit Leichtlehm mit sich bringt, ist, dass man nicht wetterabhängig ist. Wird der Lehm in ei-

[43] Volhard, 2021, S.33

[44] ebenda, S.33f

nem lastabtragenden Holzskelettbau verarbeitet, kann man das Dach vor dem Einbau decken und ist somit vor Regen und Nässe geschützt. Auch die Konstruktion selbst kann wegen der guten Wärmedämmeigenschaften des Leichtlehms viel reduzierter geplant werden, als es im traditionellen Fachwerkbau der Fall war.

Im Gegensatz zu anderen Baustoffen werden die Leichtzuschläge mit flüssigem Lehm gemischt und danach in flexible Schalungen eingebracht. Die Leichtlehm-masse wird folglich zum Bauteil hin verdichtet. Wegen der Formbarkeit der Masse, ist diese Methode zeitsparender als die der Lehmstein-, Stampflehm- oder Wellerbauweise. Aufgrund der Frostgefahr sollte jedoch am Anfang der Sommermonate mit dem Bauen begonnen werden. Auch die Zeit, die die Wand zum Austrocknen benötigt sollte nicht außer Acht gelassen werden. Sollte dennoch in den Wintermonaten gebaut werden, ist es sinnvoll Leichtlehm-bausteine als Ausfachungsmaterial zu verarbeiten, da diese, abgesehen vom Mörtel, keine zusätzliche Trocknungszeit verlangen.⁴⁵

Beim feuchten Einbau von Leichtlehm wird die Mischung in Kletterschalungen, verloren Schalungen oder vollflächigen Schalungen eingebracht und zum Bauteil hin ausreichend verdichtet. Wird Strohleichtlehm oder schwerer Holzleichtlehm verarbeitet, kann auf diesem, mittels Kletterschalung, direkt der nächste Satz gestampft werden. Mineralischer Leichtlehm oder leichte Holzleichtlehm-mischungen benötigen hingegen bis zur Austrocknung eine vollflächige Schalung. Die Luftzu-

[45] Volhard, 2021, S.36ff



Abb.46: Außenwand, Freier Auftrag von Leichtlehm auf eine Lattung (ca.1000 kg/m³), Wohnhaus J, Volhard, 2012

fuhr muss durch Fugen zwischen den Schalbrettern gegeben sein, da pflanzliche Zuschläge anfällig für Schimmelbildung sind oder bei nicht ausreichender Trocknung von innen verrotten können.⁴⁶

Die Dicke von Außenwänden beschränkt sich beim feuchten Einbau auf 30 cm. Ab einer Stärke von 35 cm trocknen die Wände zu langsam aus und sind daher in dieser Form nicht zu empfehlen. Aus diesem Grund wird bei Wandaufbauten ab 30 cm die Leichtlehmsteinbauweise bevorzugt.

Zusätzlich gibt es die Möglichkeit eine weitere Dämmschichten hinzuzufügen, wodurch ein noch besseres Wärmedämmverhalten geschaffen wird. Aus der Praxis heraus hat sich Leichtlehm mit 5 cm starken Schilfrohrplatten als sehr gut erwiesen. Bei Innenwänden reicht ein Maß von 10 bis 15 cm aus um genug Wärme zu speichern und auch den Schall ausreichend zu dämmen.

Wird für das Bauvorhaben eine Lehm-Hybridbauweise ausgewählt, gibt es mehrere Varianten das Tragskelett auszuführen. Grundsätzlich sind alle herkömmlichen Holzbausysteme geeignet, um mit einer Ausfachung aus Leichtlehm versehen zu werden. Denkbar ist es natürlich auch ein Tragskelett aus Stahl oder Stahlbeton zu planen und es dementsprechend mit Leichtlehm-elementen zu füllen. Kommt ein Skelettbau aus Holz zur Anwendung übernimmt dieser die Lastabtragung und die Aussteifung der Konstruktion. Weiters bildet es die Ausfachung, die den Raum abschließt und gibt nach seiner Bemessung die Wandstärke für den Bau vor. Zwischen den

[46] Minke, 2022, S.96

tragenden Stützen wird ein schmaleres und leichteres Füllskelett vorgesehen. Ein wichtiger Aspekt ist, dass der richtige Abstand der Ständer im Füllskelett eingehalten wird, um ein Ausbauchen der Schalung zu verhindern. Dieser sollte max. 150 cm betragen.

Beim Innenwandbau kommen ähnliche Methoden wie bei den Außenwänden zur Anwendung. Hier ist es aufgrund des geringen Gewichts auch möglich Wandelemente am Boden zu stampfen und nach Fertigung - samt Schalung - aufzustellen.

In der folgenden Grafik werden unterschiedliche Außenwand- und Innenwandtypen mit feuchtem Einbau von Leichtlehm beschrieben, die als Ausfachung von Holzkonstruktionen dienen.⁴⁷

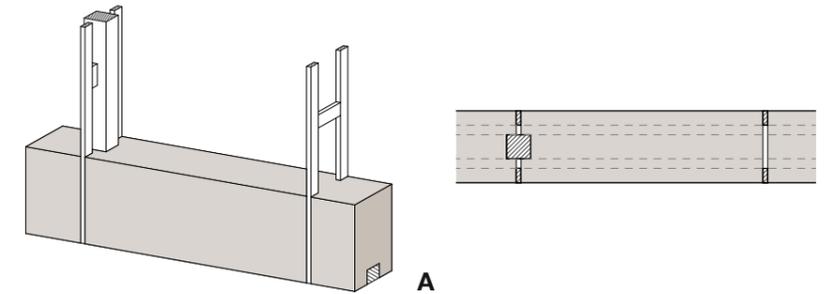


Abb.47: Holzkonstruktion mit feuchter Leichtlehmausfachung

[47] Volhard, 2021, S.81ff

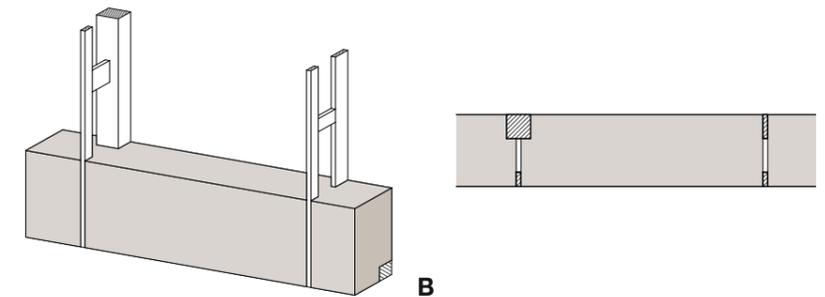
A:

Im Wandkern befindet sich eine allseitig umschlossene Stütze. Alle 40 - 50 cm wird eine waagrechte Stakeinlage benötigt. Der Schlitz wird anschließend ausgestopft.



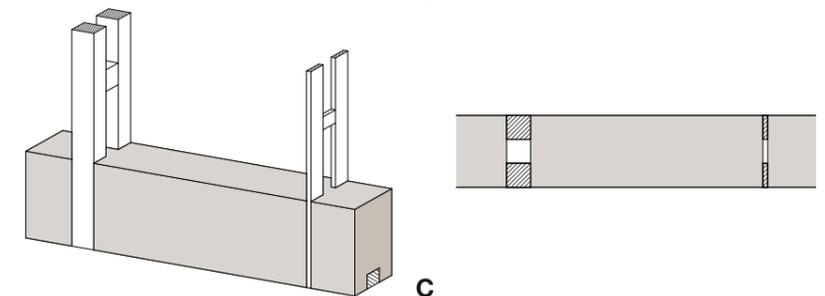
B:

Die tragende Kantholzstütze bleibt innen oder außen sichtbar und schließt bündig mit der Ausfachung ab. Durch die Gleitlehre verbindet sich die Ausfachung mit der Tragkonstruktion.



C:

Tragende Doppelstützen bleiben an beiden Seiten sichtbar und halten die Ausfachung ohne zusätzliche Gleitlehren.



D:

Tragende Bohlen geben die Wandstärke vor. Aufgenagelte Latten oder Langlöcher verbinden die Ausfachung mit der Konstruktion

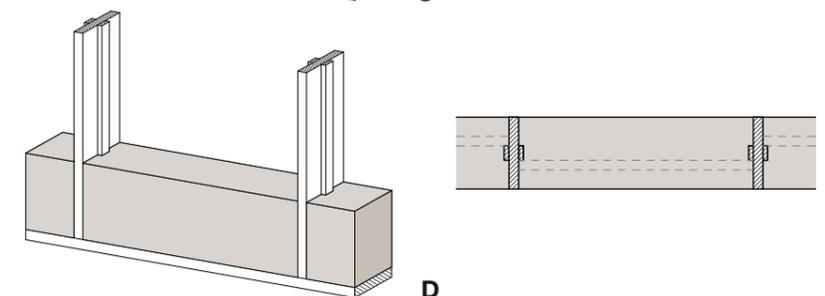
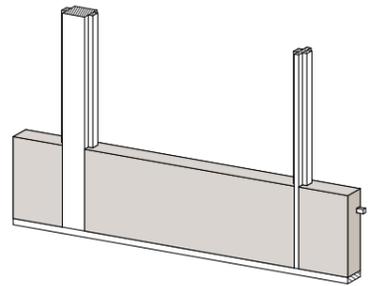


Abb.48: Außenwände mit feuchtem Einbau

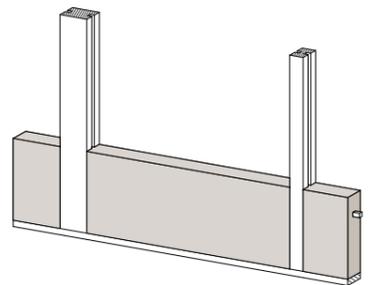
A:
Stütze mit aufgenagelten
Leisten



A



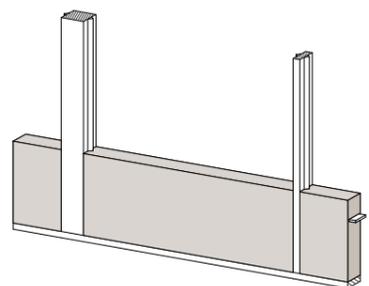
B:
Stütze mit eingefrästen Nuten



B



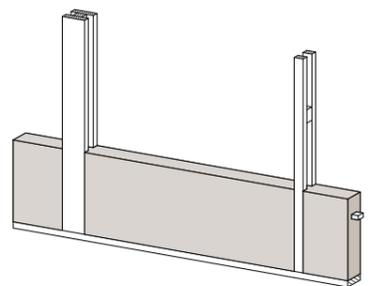
C:
Stütze mit aufgenagelten
Dreikantleisten



C



D:
Doppel-T Stütze



D



Abb.49: Innenwände mit
feuchtem Einbau, verschie-
dene Ausführungsvarianten
(auch bei dünnen Außenwän-
den)



Normalformat NF
24 x 11,5 x 7,1 cm



Dünnformat DF
24 x 11,5 x 5 cm



2 Dünnformat 2DF
24 x 11,5 x 5 cm



3 Dünnformat 3DF
24 x 17,5 x 11,5 cm



4 Dünnformat 4DF
24 x 24 x 11,5 cm

Abb.50: Formate von
Leichtlehmbausteinen

Das Pendant zum feuchten Einbau bildet der trockene Einbau von bereits gefertigten Leichtlehmabaustoffen. Dazu zählen Leichtlehmabausteine, Lehm-trockenbauplatten oder Putz- und Mauermörtelprodukte. Die Herstellung und Trocknung ist zwar aufwändiger als bei feuchtem Einbau, hat aber den Vorteil, dass die Ausführung wegen der geringen Baufeuchtigkeit über das ganze Jahr vollzogen werden kann. Zudem sind größere Abstände beim Füllskelett möglich, weil die Notwendigkeit einer Schalung entfällt.

Die Anwendungsarten von Leichtlehmabausteinen sind vielseitig und reichen von Fachwerkausfachungen bis zur Errichtung von Innenwänden. Durch ihre guten Wärmedämmeigenschaften und ihre Unempfindlichkeit bei Bewitterung und Frost können Leichtlehmsteine sehr gut im Außenbereich angewendet werden. Oft werden großformatige Steine hergestellt, da sie aufgrund ihres geringen Gewichts auch als Block leicht zu vermauern sind. Die gängigsten Formate sind das Normalformat (NF) und das Dünnformat (DF) - jedoch in mehreren Varianten (2DF, 3DF, 4DF, etc.).

Leichtlehmabausteine werden genauso wie tragende Lehmabausteine in Formen eingebracht, nach dem Pressen getrocknet und danach mit Lehm-mörtel vermauert. Im Holz-skelettbau darf die Leichtlehmausfachung jedoch nur auf ihr Eigengewicht belastet werden. Die auftretenden Wandlasten werden über Fußbohlen an die Geschos-sdecke weitergegeben. Um das Traggerüst mit der Ausfachung zu verbinden werden Dreikantleisten an die Stützen genagelt, die das Kippen der



Abb.51: Formgeschlagener Leichtlehmstein, AK Ia, NF

Füllung verhindern. Durch das Einlegen von Brettern, die sich mittels Einkerbung mit der Dreikantleiste verbinden, kann man die Ausfachung zusätzlich stabilisieren. Diese Methode wird meist bei sehr dünnen Wänden genutzt.

Andere Anwendungsgebiete der Leichtlehmbausteine sind Fachwerksausmauerungen, ihr Einsatz als Innenschale zur Verbesserung der Wärmedämmung eines Bauteils oder als gestapelte Außenwand im leichtgedämmten Holzbau, bei der die Steine hochkant und ohne Mörtel aneinander geschichtet werden, wodurch die Akustik im Raum, die Wärmespeicherfähigkeit und der Schallschutz optimiert wird.⁴⁸

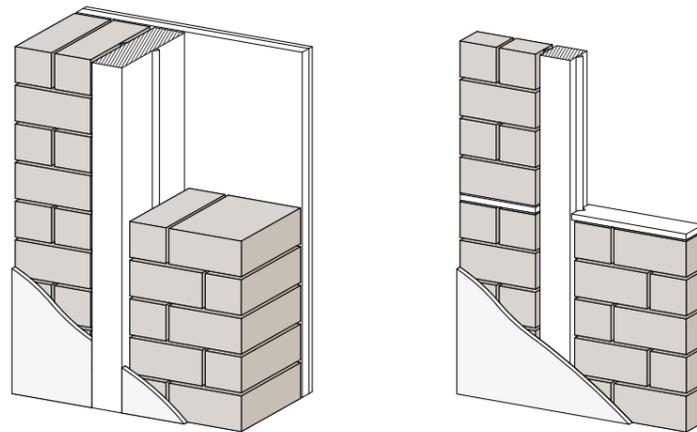


Abb.52: Ausfachungen, Tragendes Holzskelett mit Dreikantleiste und trockener Einbau von Leichtlehmsteinen (links)

Ausfachung einer Innenwand mit Leichtlehmsteinen (rechts)

[48] Volhard, 2021, S.133ff

Abb.53: Arten von Leichtlehm-mauerwerk

A: Leichtlehm-mauerwerk mit Außenputz

B: Leichtlehm-mauerwerk mit Kerndämmung

C: Leichtlehm-mauerwerk mit Innendämmung

D: Leichtlehm-mauerwerk mit Außendämmung

E: Leichtlehm-mauerwerk mit Außendämmung und vorge-setzter Holz-fassade

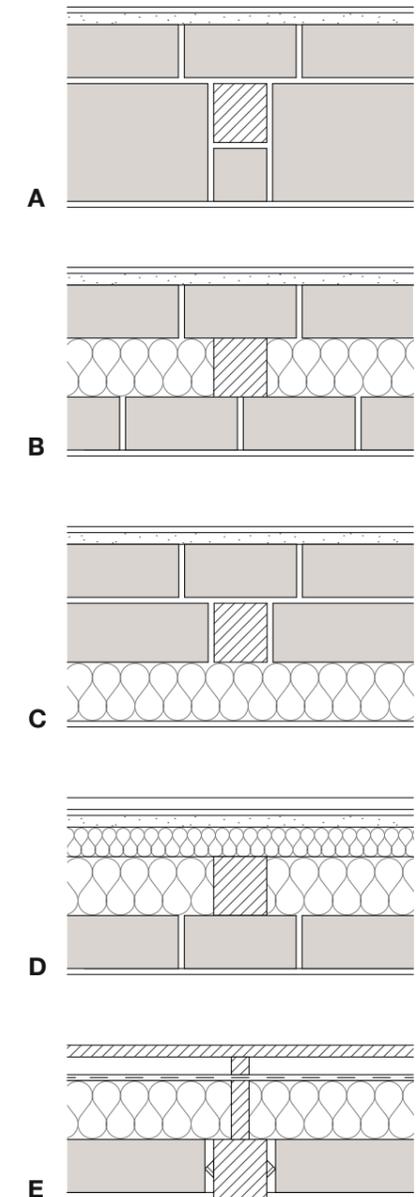




Abb.54: Ausfachungen aus Leichtlehmsteinen im EG, Wohnhaus J, Volhard, 2012



Abb.55: Ausfachungen aus Leichtlehmsteinen im OG, Wohnhaus J, Volhard, 2012

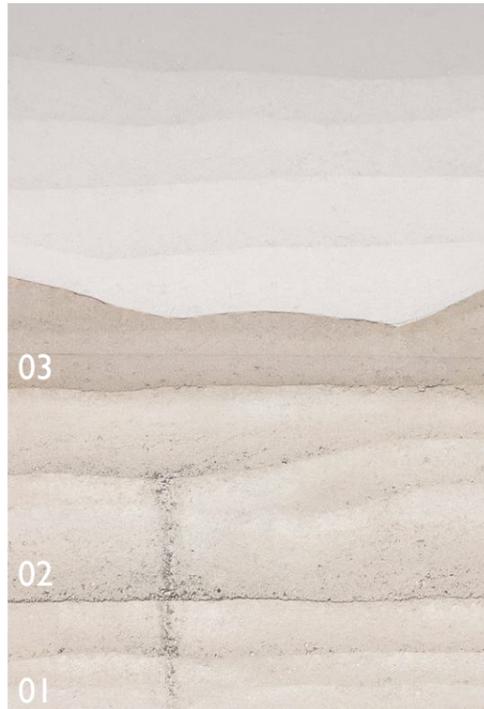


Abb.56: Facade, Aerecura
Earth Rammed Builders

03

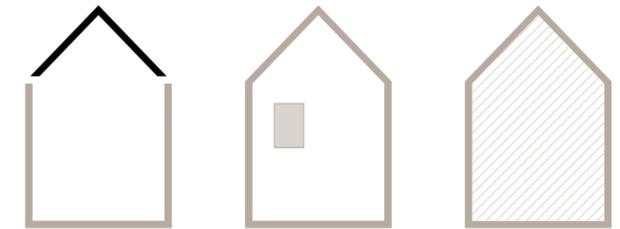
BAUKASTENSYSTEM

Verwendungsmöglichkeiten des Baustoffs
Lehm anhand fiktiver Beispiele.

03

BAUKASTENSYSTEM

Auf den folgenden Seiten werden einzelne Elemente in Form eines Baukastensystems näher erläutert. Hierfür wird der Boden, die Wand, die Decke, das Dach, die Öffnung und die Oberfläche grafisch und textlich herausarbeitet und aufgezeigt, wie diese Themengebiete mit dem Einsatz von Lehm konstruktiv umgesetzt werden können. Wie es auch beim Bauen üblich ist, werde ich zuerst den Boden behandeln und folglich die Wand, die Geschosdecke und das Dach analysieren. Das Ende des Kapitels bildet die Öffnung in der Wand und mögliche Oberflächengestaltungen eines Lehmbaus.

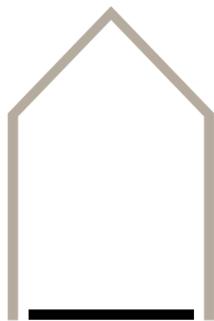


BODEN | SOCKEL

Im Sockelbereich ist es wichtig, dass die Lehmwand vor Regen und Nässe geschützt ist. Dies beinhaltet einerseits den Schutz vor direktem Regeneinfall mitsamt Spritzwasser und andererseits muss dafür gesorgt werden, dass keine aufsteigende Kapillarfeuchtigkeit in das Lehmbauteil gelangt. An der Stelle des Sockels kann kein Lehm verwendet werden, da es durch seine Wasserlöslichkeit zur Durchfeuchtung des Bauteils und in weiterer Folge zum Verlust der Tragfähigkeit kommt. Aus diesem Grund verwendet man bei der Herstellung eines Sockels alternative Materialien, wie z.B. Stahl- und Magerbeton, Naturstein oder Ziegel. Die Höhe sollte mindestens 30 cm betragen, wobei eine Ausführung von 50 cm noch empfehlenswerter ist, um die Lehmwand vor den vom Boden nach oben spritzenden Regentropfen zu schützen.⁴⁹

Bei Gebäuden in Hanglage ist es nicht immer möglich einen durchgehenden Sockel auszuführen. Falls der Höhenunterschied vom Gelände bis zur Lehmaußenwand zu gering ist, besteht die Möglichkeit die Abdichtungsbahnen nach oben zu verlängern und eine Reihe aus Schlammziegel als zusätzlichen Spritzwasserschutz anzubringen. Weiters ist bei erdberührten Lehmwänden eine Dämmschicht und eine vertikale Abdichtung unbedingt erforderlich.⁵⁰

Eine Lehmaußenwand muss ebenso wie herkömmliche gemauerte Wände aus Stein oder Ziegel gegen aufsteigende Feuchtigkeit aus den Fundamenten oder aus dem Sockel gesichert werden. Horizontale Feuchtigkeitssperren aus bituminösen Bahnen, Kunststofffolien, sowie mineralische



[49] Minke, 2022, S.124

[50] Kapfinger/Sauer, 2022, S.84

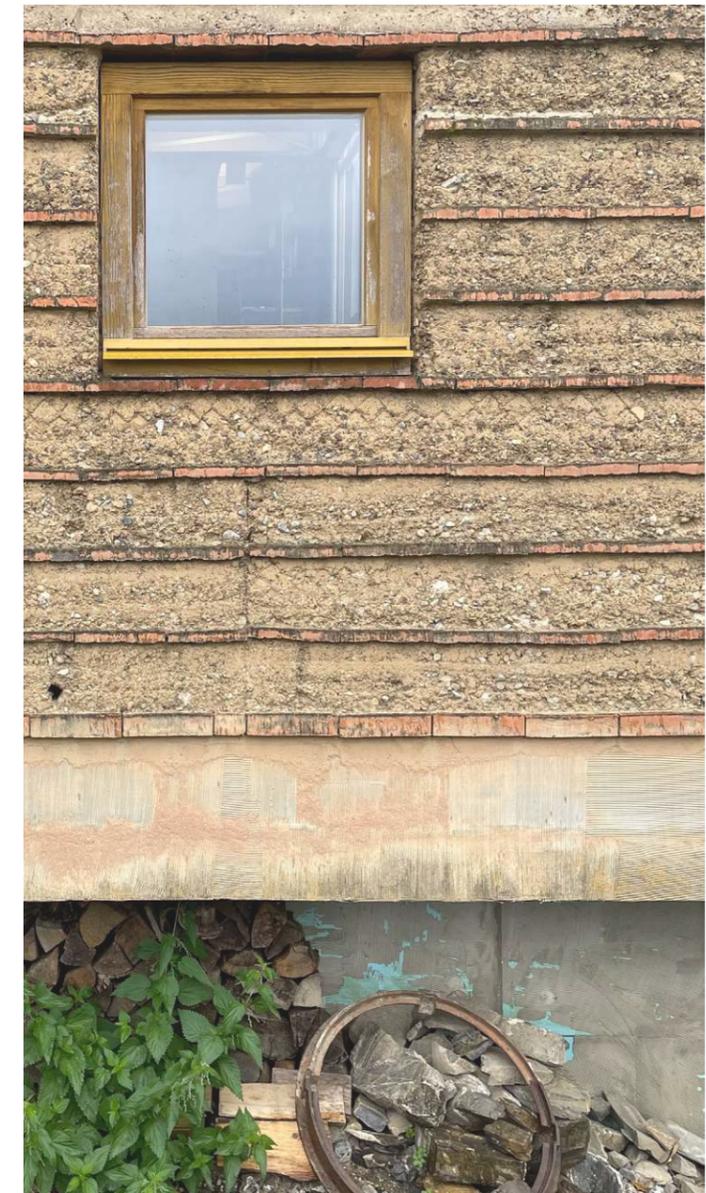


Abb.57: Stampflehmwand mit Sockelzone, Schlins, Vorarlberg

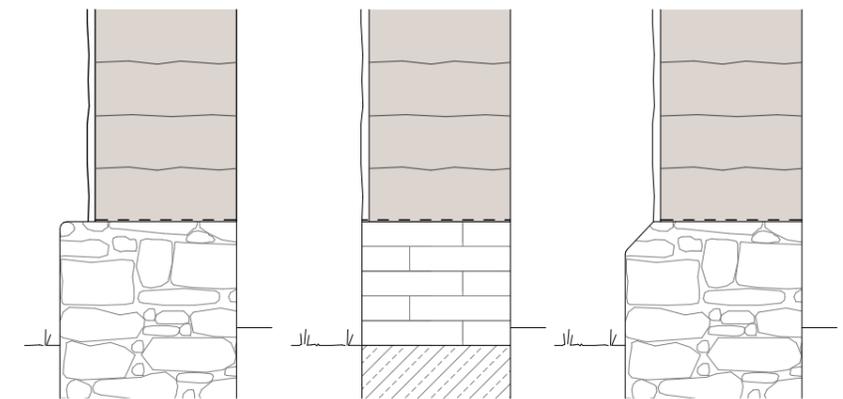
Dichtschlämmen und bituminöse Anstriche in Verbindung mit Lehmmörtel kommen hier zum Einsatz.⁵¹

In der folgenden Grafik werden verschiedene Ausführungsvarianten eines Sockels gezeigt. In der oberen Reihe befinden sich fehlerhafte Ausführungen, welche es zu vermeiden gilt. Bei diesen Beispielen kann das Wasser nicht ungehindert ablaufen, sondern bleibt wegen der Ausführung der Sockelkante darauf stehen und kann dadurch ins Bauteil eindringen. Ein weiterer Fehler ist, dass die Sockel nicht durch einen Wasserabweisenden Putz oder Anstrich geschützt werden, wodurch es wegen aufsteigender Feuchtigkeit zu Schäden in der Lehmwand kommen kann.

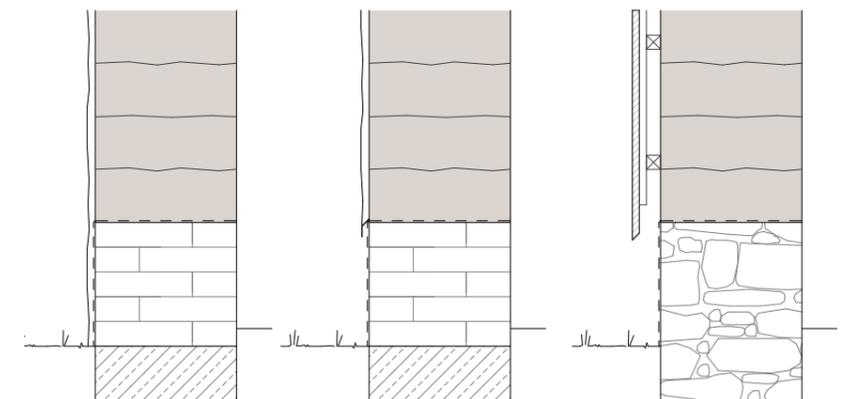
Im Gegensatz dazu befinden sich in der unteren Reihe drei Konstruktionsmethoden, die funktionieren ohne Schaden an der Außenwand zu verursachen. Die ersten beiden Abbildungen sind Lehmwände, die mit einem Außenputz versehen sind. Den besten Schutz bietet aber die letzte Abbildung. Hier wird die Lehmwand durch eine vorgehängte Holzfassade vor Schlagregen oder anderen Witterungseinflüssen bewahrt. Das Spritzwasser wird durch die vertikale, wasserabweisende Schicht am Sockel ferngehalten.

Zu beachten ist, dass es bei den Darstellungen nur um den Fußpunkt der Lehmwand geht.⁵²

Abb.58: Sockelausbildungen,
Obere Reihe
Falsche Sockelausbildungen



Untere Reihe
Richtige Sockelausbildungen



[51] Minke, 2022, S.124

[52] ebenda, S.124

Bodenaufbau A:

- Wachsschicht
- 2 cm Schicht aus Sägemehl, Zement, Sand (mit Wasserglas gehärtet)
- 4 cm fetter Lehm mit Leichtzuschlägen (mit Zement und Sand stabilisiert)
- 10 cm fetter Lehm mit Leichtzuschlägen (Strohhäcksel, Spreu, od Holzspäne)
- 20 cm Schotterschicht gegen Kapillarwasser fetter Lehm gegen drückendes Wasser
- 15 cm

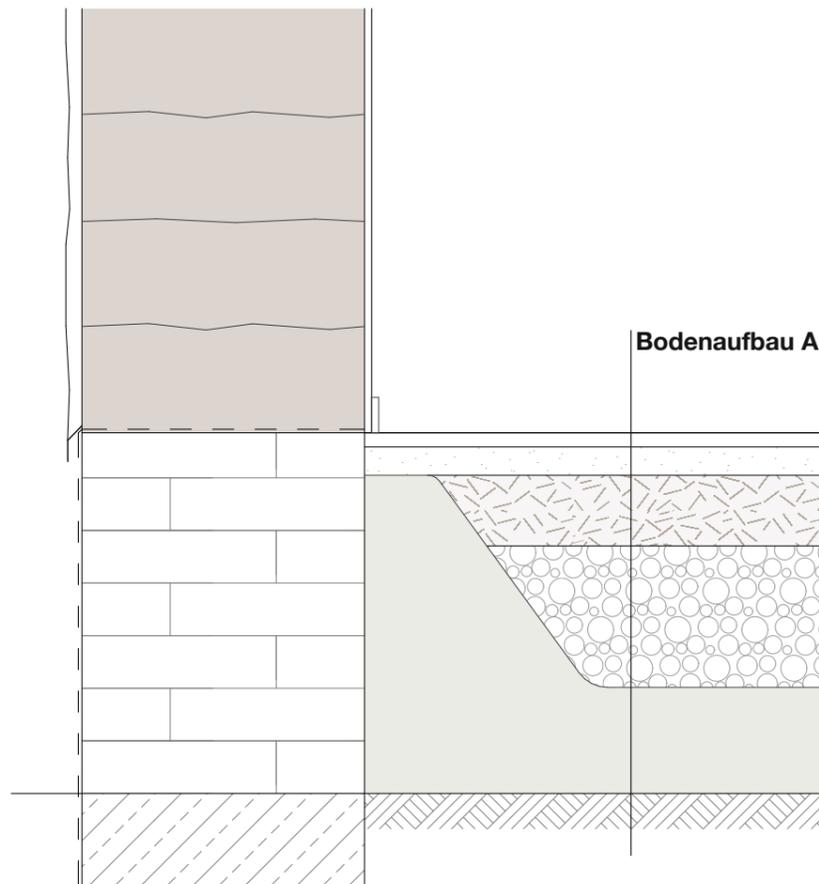


Abb.59: Aufbau eines traditionellen Lehmfußbodens, 1947 (Niemayer)

Fußböden aus Lehm müssen, wie auch andere Fußbodenoberflächen, verschiedenen Einflüssen des Alltags entgegenwirken können. Der Boden wird auf Abrieb, Druck, Wasserfestigkeit und Rissbildung beansprucht, wobei die ausreichende Abriebfestigkeit die größte Herausforderung darstellt und es deswegen einer sehr genauen Ausführung bedarf.

Bei der Herstellung eines traditionellen Fußbodens aus Lehm wird zuerst eine zweilagige Schicht aus fettem Lehm mit mindestens 15 cm Dicke gestampft. Diese wird direkt auf den gewachsenen Boden aufgebracht und schützt vor drückendem Wasser aus dem Untergrund. Darüber folgt eine 20 cm Schotterschicht, die dem kapillaren Feuchtigkeitsaufstieg entgegenwirkt. Die nächsten Schichten bestehen ebenfalls aus fettem Lehm, dem Leichtzuschläge wie z.B. Strohhäcksel, Sägemehl, Holzspäne oder Spreu hinzugemengt werden.

Um größere Lasten aufnehmen zu können wird die folgende Leichtlehm Lage zusätzlich mit Zement und Sand stabilisiert. Die abschließende Schicht bildet ein 2 cm dicker Estrich aus Sand, Sägemehl und Zement, welche durch 1-2 Lagen aus Wasserglas gehärtet wird. Nach etwa 2 Monaten Trocknungszeit wird der Fußboden mit einer polierten Wachslage fertiggestellt.

Einzelne Schichten können sich im historischen Bau eines Lehmfußbodens unterscheiden. So war es auch möglich, dass man zur Verbesserung der Abriebfestigkeit Hammerschlag, Rindergalle, Rinderblut oder Teer mit in die oberste Schicht eines Fußbodens mit einschlug. Vor allem auf Bauernhöfen konnte man solche Aufbauten vorfinden.⁵³

[53] Minke, 2022, S.134

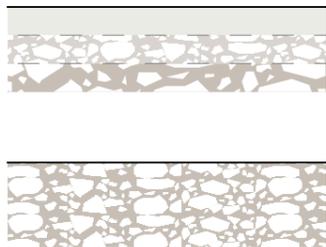


Abb.60: Lehm Böden. Sie wurden meist aus mehreren unterschiedlichen Schichten erstellt. (oben)
Ein zeitgemäßer Fußboden kann aus einer einzigen Mischung errichtet werden. (unten)

Eine weitere Technik einen Fußboden aus Lehm herzustellen ist der Aufbau aus verschiedenen Stampflehmschichten. Diese unterscheiden sich in der Zusammensetzung und Mischung der Korngrößen in den Zuschlägen. Grundsätzlich wird dem Steingranulat ein Lehmanteil von etwa 30 bis 40% beigemischt, was ungefähr dem Materialverhältnis einer Stampflehmaußenwand entspricht. Bei der konventionellen Herstellung eines Lehmbo­dens besteht die unterste Schicht aus einer groben Mischung, welche viele großkörnige Gesteinszuschläge beinhaltet. Die darüberliegende Schicht ist etwas feinkörniger als die vorherige und bildet die Mittelschicht. Die letzte Lage ist zugleich die Nuttschicht und besteht aus einer feinen Mischung, die so gut wie keine Steine mehr enthält. Durch das Stampfen verbinden sich die einzelnen Lagen und der gesamte Boden wird gefestigt.

Da die Nuttschicht allerdings nicht mit Zusatzstoffen stabilisiert und somit nicht künstlich gehärtet wird ist sie anfällig für mechanische Belastungen, wodurch die eher weiche Oberfläche geschädigt werden kann. Im Grunde macht es dem Lehmbo­den nichts aus, da man durch das Anfeuchten des Bodens die Druckstellen und Kratzer wieder aufarbeiten und einfach ausbessern kann. Die Vorteile, die der Lehmbo­den mitbringt, sind die fugenlose Ausführung, die Wärmespeicherkapazität und die positive Auswirkung auf das Raumklima.

Es bedarf jedoch viel Zeit und täglicher Pflege einen traditionellen Lehmbo­den in Stand zu halten. Dieser Aufwand wiederholt sich täglich, was nicht unbedingt dem Anspruch

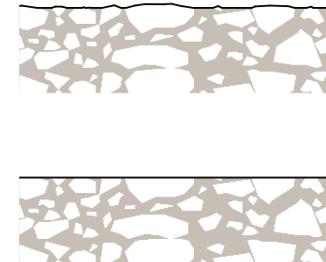


Abb.61: Oberflächenbeschaffenheit. Ein geschlämmter Boden weist Unregelmäßigkeiten auf. (oben)
Durch Schleifen lässt sich ein Terrazzo-Effekt mit glatter Oberfläche erzeugen. (unten)

eines Bodens im modernen Wohnen entspricht.

Durch die Anpassung der Mischung und neue Verarbeitungsmethoden ist es möglich die drei Schichten auf eine zu reduzieren und den Lehmbo­den an die Anforderungen einer heutigen Baustelle anzupassen. Er kann mit Bauteilaktivierung und Trittschalldämmung schwimmend in einem mehrschichtigen Bauteil verlegt werden. Das gleichbleibende Materialverhältnis bietet durchgehende Festigkeit unter der Nuttschicht.⁵⁴

Zum Verdichten des Materials wird beim zeitgemäßen Lehmbo­den ein Plattenrüttler verwendet. Grobe Steine werden dadurch nahe an der Oberfläche gerichtet und es entsteht eine stabile Nuttschicht.

Folgende Arbeitsschritte sind bei der Herstellung eines Lehmfußbodens durchzuführen:

- Untergrund schlämmen, damit sich der Lehm mit diesem verbinden kann.
- Feuchtes, krümeliges Material mit einer Überhöhe (Drittel bis Hälfte zum fertigen Boden) einbringen und ausziehen. Die Dicke des fertigen Fußbodens sollte 10 cm nicht unterschreiten.
- Die lose Lehm­masse vorverdichten und anschließend mit einem Plattenrüttler nachverdichten.
- Die verdichtete Oberfläche mit einer Schlämme des selben Materials versehen und trocknen lassen. Für die Schlämme wird der Lehm angerührt und danach stehen gelassen, sodass sich feste Teile senken und überschüssiges Wasser abgeseigt

[54] Kapfinger/Sauer, 2022, S.53ff

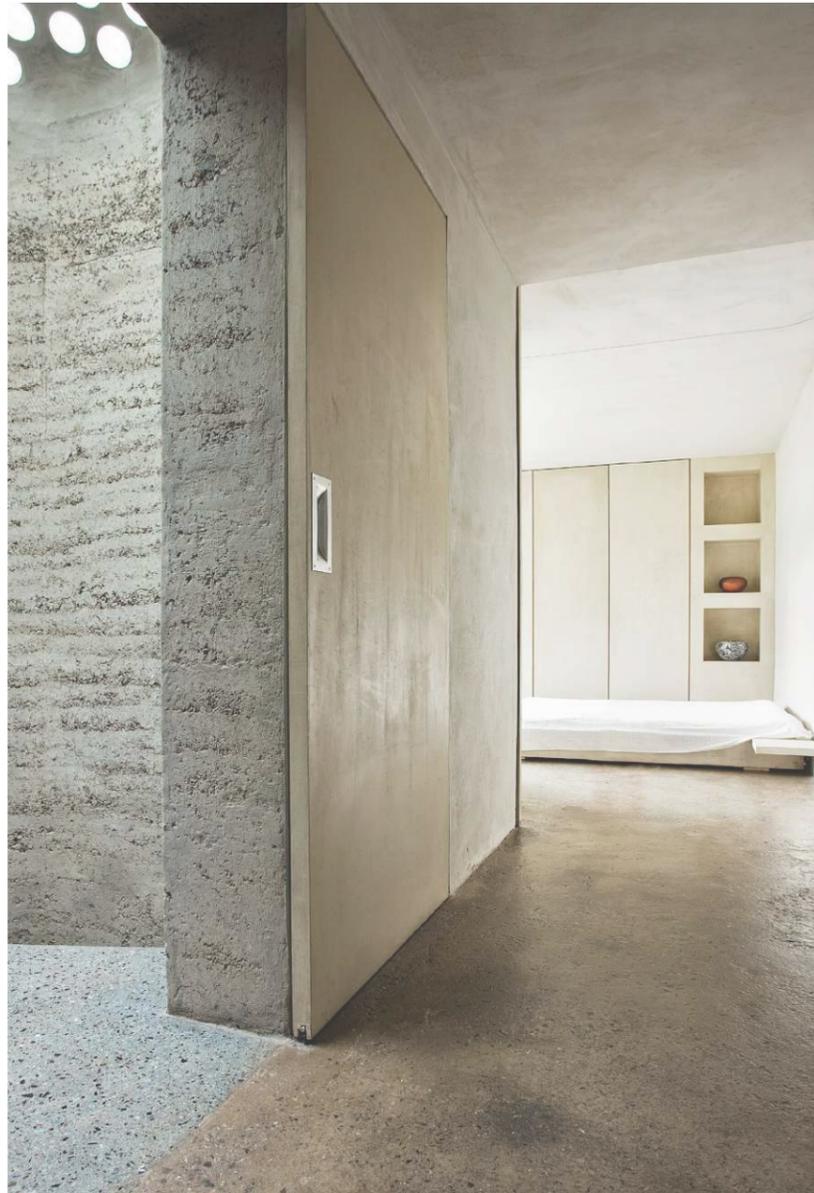


Abb.62:
Stampflehmfußboden, Haus
Rauch, Schlins

sen werden kann. Mithilfe einer Gummilippe lässt sich das Gemisch auf dem Boden verteilen.

- Die angetrocknete Oberfläche kann nun mit einer Poliermaschine mit weichem Aufsatz und Quarzsand erstmals geschliffen werden. Durch diesen Vorgang können Unebenheiten im Boden ausgeglichen werden, da der feine Lehm in den Löchern liegen bleibt. In diesem Schritt können etwaige Fehler ausgebessert werden. Mit einem Diamantflächenschleifer ist es möglich die Steine so anzuschleifen und erlangt dadurch einen Terrazzo-Effekt.

- 2 bis 3 Wochen Trocknungszeit. Abhängig von der Witterung und Dicke des Fußbodens.

- Nach dem Trocknen wird der Boden gereinigt und mit einer Grundierung aus Kasein versehen.

- Folgend wird eine Wachsemulsion aufgetragen.

- Die Oberfläche wird poliert und fehlerhafte Stellen nachgebessert.

- Nochmals Wachsemulsion auftragen und polieren.

- Im letzten Schritt wird Carnaubawachs aufgetragen und nach dem Trocknen auf Glanz poliert.⁵⁵

Betrachtet man den Untergrund eines Lehmbodens ist es wichtig, dass dieser stabil und vor allem nicht beweglich ist, damit der Lehm Boden darüber ausreichend verdichtet werden kann. Leichte Deckenkonstruktion können mit der Frequenz des Plattenrüttlers mitschwingen und das Verdichten negativ beeinflussen. In den meisten Fällen kann der Stampflehm

[55] Kapfinger/Sauer, 2022, S.60f

direkt auf die Trittschalldämmung gestampft werden. Wird zusätzlich eine Fußbodenheizung ausgeführt, werden die Heizschläuche mit einem Lehm-Sandgemisch eingehüllt und in weiterer Folge durch den Druck des Stampfens mit dem Lehm verbunden. Eine weitere Möglichkeit ist den Lehm Boden direkt auf eine druckfeste Wärmedämmplatten zu stampfen. Als Materialien eignen sich Holzfaserplatten, Schaumglas oder XPS. Die Voraussetzung dafür ist, dass sie hohlraumfrei und fest verklebt sind.⁵⁶

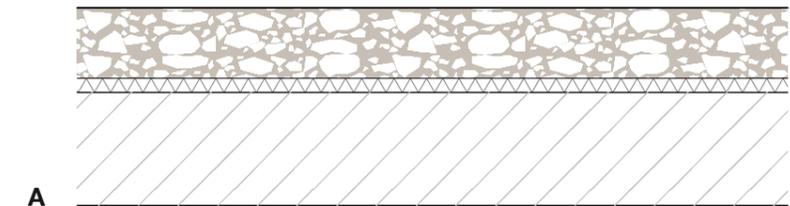
Falls es aus statischer Sicht nicht möglich ist einen schweren Stampflehm Boden einzubauen, bietet sich die Alternative des Leichtlehm Bodens an. Dieser wird in mehreren Schichten mit unterschiedlicher Zusammensetzung verlegt. Die unterste Schicht besteht aus einer Lehm-Kork-Trasskalkmischung. Die Zwischenlage setzt sich aus Lehm-Stroh-Sand und Trasskalk zusammen. Die oberste Nutzschicht bildet eine Lehm-Stroh-Kaseinmischung. Durch den natürlichen Kleber Kasein, der aus dem Protein der Milch gewonnen wird, verhärtet die obere Schicht und wird somit sehr belastbar. Im Laufe der Jahre kann es dennoch vorkommen, dass der Fußboden durch Wasser oder mechanische Belastung beschädigt wird. Diese Stellen lassen sich in der Regel ohne Farbunterschied ausbessern, sofern man eine kleine Menge der ursprünglichen Lehmmischung aufbewahrt, in die Oberfläche einarbeitet und anschließend mit der Wachsemulsion und dem Carnaubawachs aufpoliert.

Beim Austrocknen bilden sich auf dem Boden Mikrorisse,

Abb.63: Fußbodenaufbauten

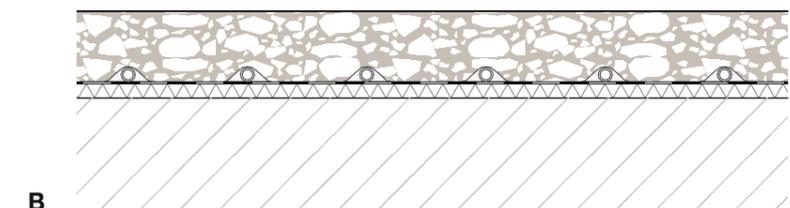
A:

- Wachsschicht
- 10-12 cm Stampflehm
- 2 cm Trittschalldämmung
- Untergrund (Holz, Beton,..)



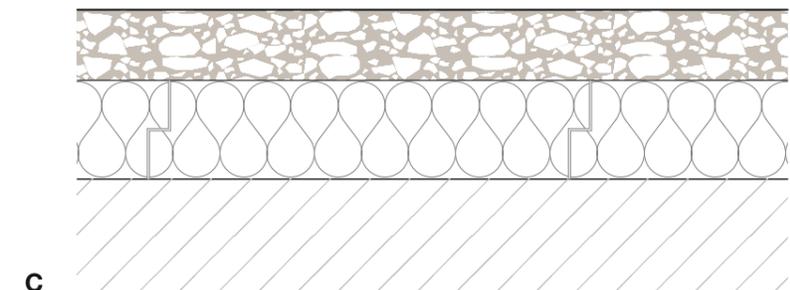
B:

- Wachsschicht
- 10-12 cm Stampflehm
- Heizleitungen in Mörtelbett
- Folie
- 2 cm Trittschalldämmung
- Untergrund (Holz, Beton,..)



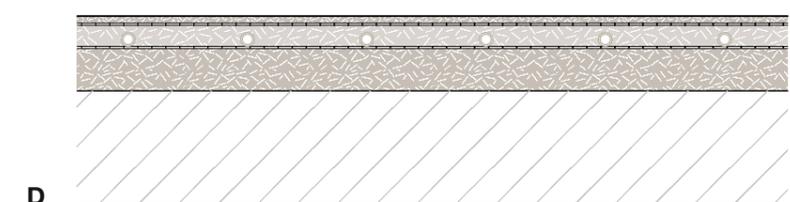
C:

- Wachsschicht
- 10-12 cm Stampflehm
- 12 cm Dämmung druckfest
- Untergrund (Holz, Beton,..)



D:

- 1 cm Lehm-Kasein-Stroh
- Gewebe
- 3cm Lehm-Stroh-Sand-Trasskalk
- Heizleitungen
- Gewebe
- 6 cm Lehm-Kork-Trasskalk
- Untergrund (Holz, Beton,..)



[56] Kapfinger/Sauer, 2022, S.62

wodurch er aber nicht geschädigt wird. Die Risse nehmen die Spannungen auf bauen sie selbst wieder ab. Sie tragen somit dazu bei den Lehm Boden in jeder Größe und fugenlos verlegen zu können.

Neben den Fußböden ist es auch möglich Niveauunterschiede im Innenraum zu überbrücken. Mit Stampflehm lassen sich Treppen und einzelne Stufen herstellen. Den Untergrund bildet eine Schicht aus grobkörnigem Kies. Darüber wird der Lehm in zwei Gängen verdichtet. Die weitere Abfolge beim Bau einer Stampflehmtreppe folgt sinngemäß der Herstellung eines Lehm Bodens. Der einzige Unterschied ist, dass ein Keil aus Trasskalkmörtel mit eingestampft wird, um die Festigkeit der Stufenvorderkante zu erhöhen.⁵⁷

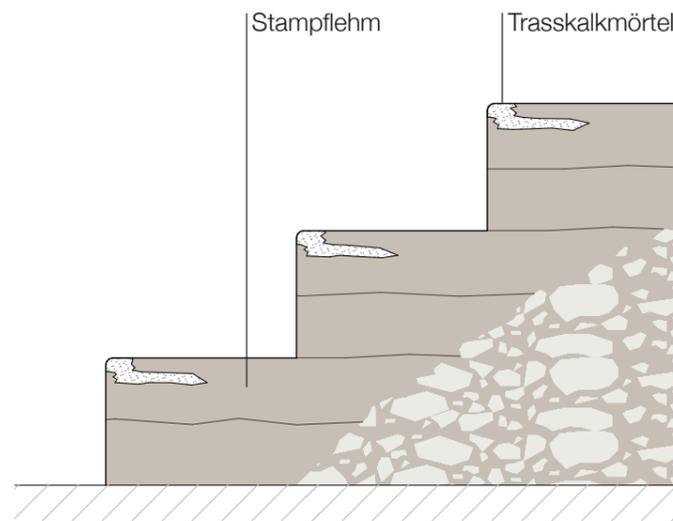


Abb.64: Treppe aus Stampflehm, Stufenkante aus Trasskalkmörtel

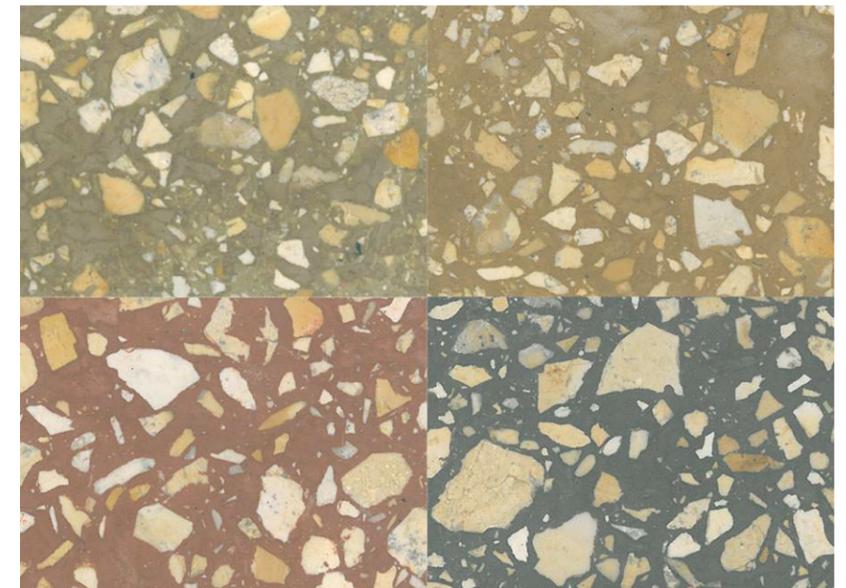


Abb.65: Eingefärbte Lehmfußböden mit geschliffener Oberfläche (Terrazzo-Effekt)

[57] Kapfinger/Sauer, 2022, S.64f

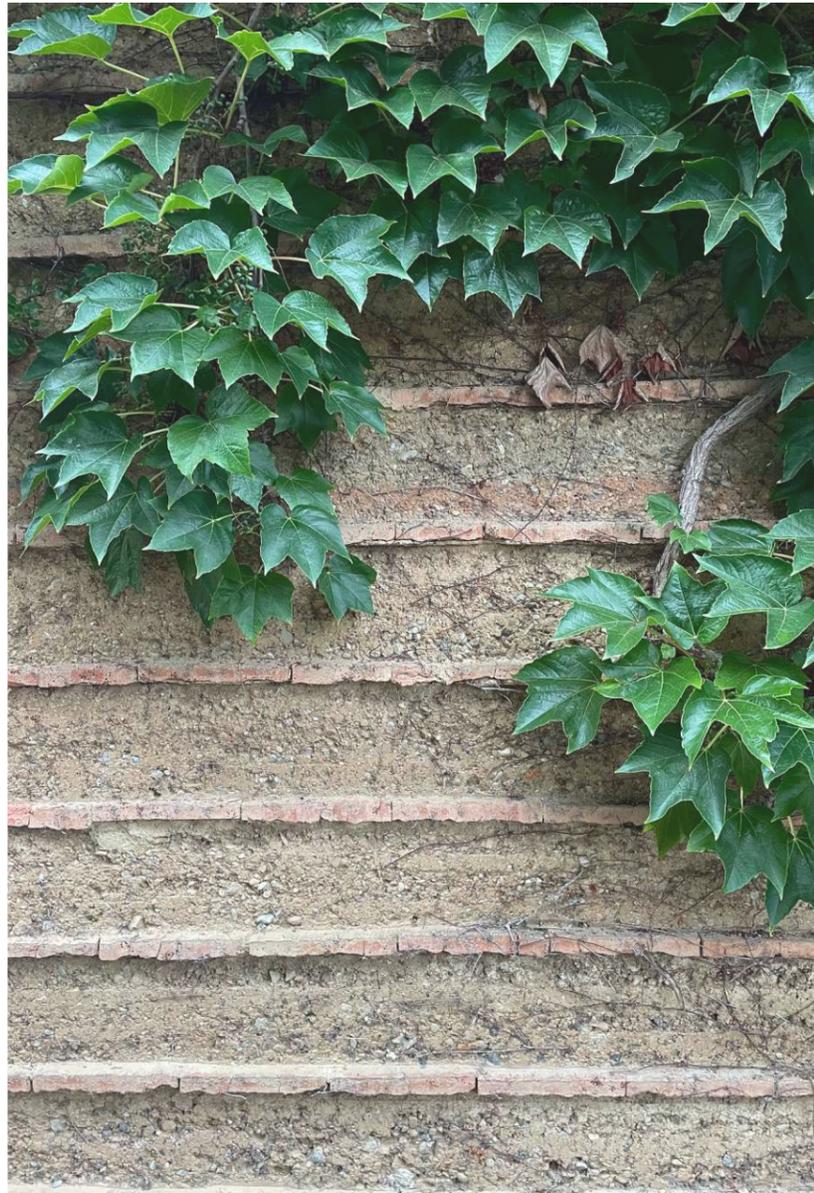


Abb.66: Außenwand aus Stampflehm, eingearbeitete Erosionsbremsen, Vorarlberg



WAND

Im modernen Lehmbau gibt es eine Vielzahl an Möglichkeiten und Techniken Wände herzustellen. Im folgenden Abschnitt werden verschiedene Methoden mit der Hilfe von Beispielschnitten dargestellt und anschließend ihre Zusammensetzung erläutert. Besonders im Fokus stehen die Punkte der Herstellung, der Anschlüsse von Elementen in den Außenwänden, statische Notwendigkeiten, sowie die Vielfalt der Einsatzmöglichkeiten der Lehmbaustoffe.

Den vier Wandaufbauten liegen unterschiedliche Herstellungsarten zugrunde. Der erste Schnitt zeigt eine erdbeberührte Stampflehmwand mit Wohnraum im oberen Geschoss. Gestampft wurde vor Ort. In der zweiten Darstellung handelt es sich ebenfalls um eine Stampflehmwand. Der Unterschied ist, dass die einzelnen Elemente vorgefertigt und danach mit einem Kran versetzt wurden. Die dritte Darstellung ist ein Fachwerk aus Holz, welches mit Leichtlehmbausteinen ausgefüllt wurde. Diese Methode kommt oft bei Sanierungen von historischem Bestand zum Einsatz. Das Zusammenspiel von Holz und Lehm steht an dieser Stelle im Vordergrund. Die letzte Grafik zeigt ein tragendes Skelett mit einer Ausfachung aus Lehm und vorgehängter Holzfassade. Hierbei handelt es sich um einen Vorschlag für eine Lehmfassade, wie sie im heutigen Wohnbau angewendet werden könnte. Der Lehm übernimmt hier keine tragende Rolle. Der positive Einfluss von Lehm auf das Raumklima steht im Vordergrund. Bei jedem der Schnitte werden grundsätzliche Regeln erläutert, auf die es beim zeitgemäßen Bauen mit Lehmbaustoffen zu achten gilt.

**BEISPIEL | SCHNITT I:
VOR ORT GESTAMPFTE
LEHMWAND**

Die Tragstruktur des gezeigten Fassadenschnitts besteht aus vor Ort hergestellten Stampflehmwänden, die mit einer Innendämmung versehen worden sind. Die Wände im unteren Geschoss sind zum Teil erdberührt, wodurch es einer speziellen Lösung bedarf. Ein frostfrei gegründetes Stahlbetonfundament mit einer Abdichtung gegen Feuchtigkeit aus dem Boden bildet den Untergrund der Stampflehmwand. Die Abdichtungsbahn wird seitlich an der Kellerwand hochgeführt und im oberen Geschoss am Fensterprofil eingeklemmt. Zusätzlich dienen Schaumglasschotter und eine Schicht aus fettem Lehm als Feuchtigkeitsschutz für die erdberührten Teile.

Um horizontale Lasten aufnehmen zu können, wird in die Stampflehmwände ein Ringanker aus Vollholz eingearbeitet. Dies erfolgt sowohl im Untergeschoss, als auch im Obergeschoss. Durch das Miteinstampfen einer Flachstahlplatte wird der Ringanker fest mit der Wand verbunden. Dieses Prinzip wird auch für den Einbau eines Fensters ausgeführt, indem der Flachstahl als Sturz dient. Da Lehm eine geringere Ausgleichsfeuchte als Holz besitzt, wird der Ringanker mit einer Lehmschicht ummantelt, sodass sich keine Feuchtigkeit am Holz bilden kann.

Im Sockelbereich schützen vorgehängte Natursteinplatten vor Schlagregen und eindringender Feuchtigkeit. Über der Sockelzone verlangsamen eingestampfte Trasskalkschichten die Fließgeschwindigkeit des Wassers. Dadurch wird die Erosion „berechenbar“ und kann in die Planung einer Stampflehmwand aufgenommen werden.⁵⁸

[58] Hebel/Wappner, 2023, S.211

Wandaufbau A

Außenwand:

- 50 cm Stampflehm mit Trasskalkleisten
- 16 cm Holzsparren mit Dämmung
- 4 cm Lehmbauplatte mit Lehminnenputz

Wandaufbau B

Sockelzone:

- 3 cm Spritzwasserschutz aus Natursteinplatten
- Abdichtungsbahn
- 50 cm Stampflehm
- 16 cm Holzsparren mit Dämmung
- 4 cm Lehmbauplatte mit Lehminnenputz

Wandaufbau C

Keller:

- Schicht aus fettem Lehm
- Schaumglasschotter als Perimeterdämmung
- Abdichtungsbahn
- Noppenbahn
- Abdichtungsbahn
- 50 cm Stampflehm

Abb.67: Beispielschnitt einer Stampflehmwand mit Innendämmung im OG, erdberührte Stampflehmwand im UG
M 1:20

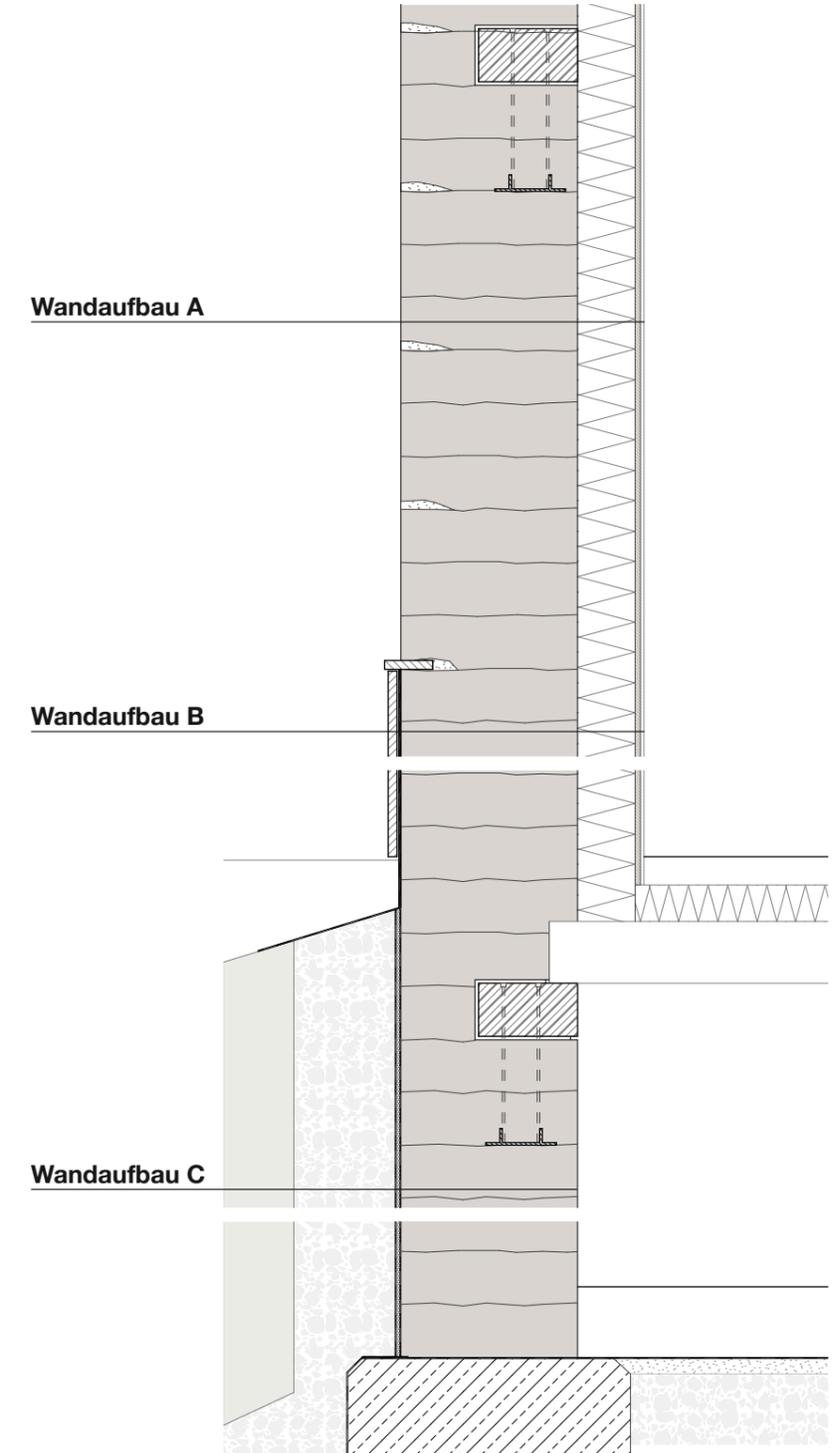




Abb.68: Liniengrafik und Ansicht, Stampflehmwand mit Trasskalkleisten und Sockelschutz aus Natursteinplatten

**BEISPIEL | SCHNITT 2:
VORGEFERTIGTE
STAMPFLEHMELEMENTE**

In diesem Beispiel übernehmen vorgefertigte Stampflehmelemente mit Kerndämmung und thermisch getrennte Ringanker aus Stahlbeton die Abtragung der Lasten. Die Wand steht auf einem Stahlbetonfundament und als Perimeterdämmung kommt wieder Schaumglasschotter zum Einsatz. Dazwischen verläuft die doppellagige Abdichtungsbahn, welche auch eine Noppenbahn miteinschließt. Als Spritzwasserschutz für den Sockel wird ein wasserabweisender Außenputz auf einer Putzträgerplatte aufgetragen. Die Höhe des Spritzschutzes beträgt hier 50 cm.⁵⁹

Das vorgefertigte Stampflehmelement ist selbsttragend und mehrschalig. Dadurch kann die Wand ebenfalls eine Außenhaut aus sichtbarem Lehm behalten. Das verwendete Dämmmaterial ist ungebundener Schaumglasschotter, da sich die Steine beim Stampfvorgang ineinander verkrallen und dadurch eine hohe Festigkeit erlangen. Hanf, Korkschröt, etc. eignen sich nicht als Kerndämmung, weil sie sich nach dem Verdichten wieder ausdehnen und sie dadurch das Bauteil schädigen können. Um die beiden Lehmschalen zusammenzuhalten wird ein Geogitter aus Kunststoff verwendet.⁶⁰

Nach jedem Geschoss wird ein Ringanker aus Stahlbeton auf die Wände gesetzt. Dieser übernimmt die Horizontallasten und ist ebenfalls kerngedämmt. Um die Fließgeschwindigkeit des Wassers an der Außenhaut zu reduzieren, wird direkt unter dem Ringanker eine Trasskalkleiste und eine Abdichtungsbahn eingearbeitet. Dies verhindert eine zu große Erosion des darunterliegenden Lehms.⁶¹

Wandaufbau A

vorgefertigt:

- 10 cm Außenhaut aus Stampflehm mit Trasskalkleisten
- 12 cm Kerndämmung
- 24 cm Stampflehm mit integr. Heizschlangen an der Innenseite

Wandaufbau B

Sockelzone:

- 2 cm Spritzwasserschutz, wasserabweisend
- Putzträger
- Abdichtungsbahn
- 10 cm Außenhaut aus Stampflehm mit Trasskalkleisten
- 12 cm Kerndämmung
- 24 cm Stampflehm mit integr. Heizschlangen an der Innenseite

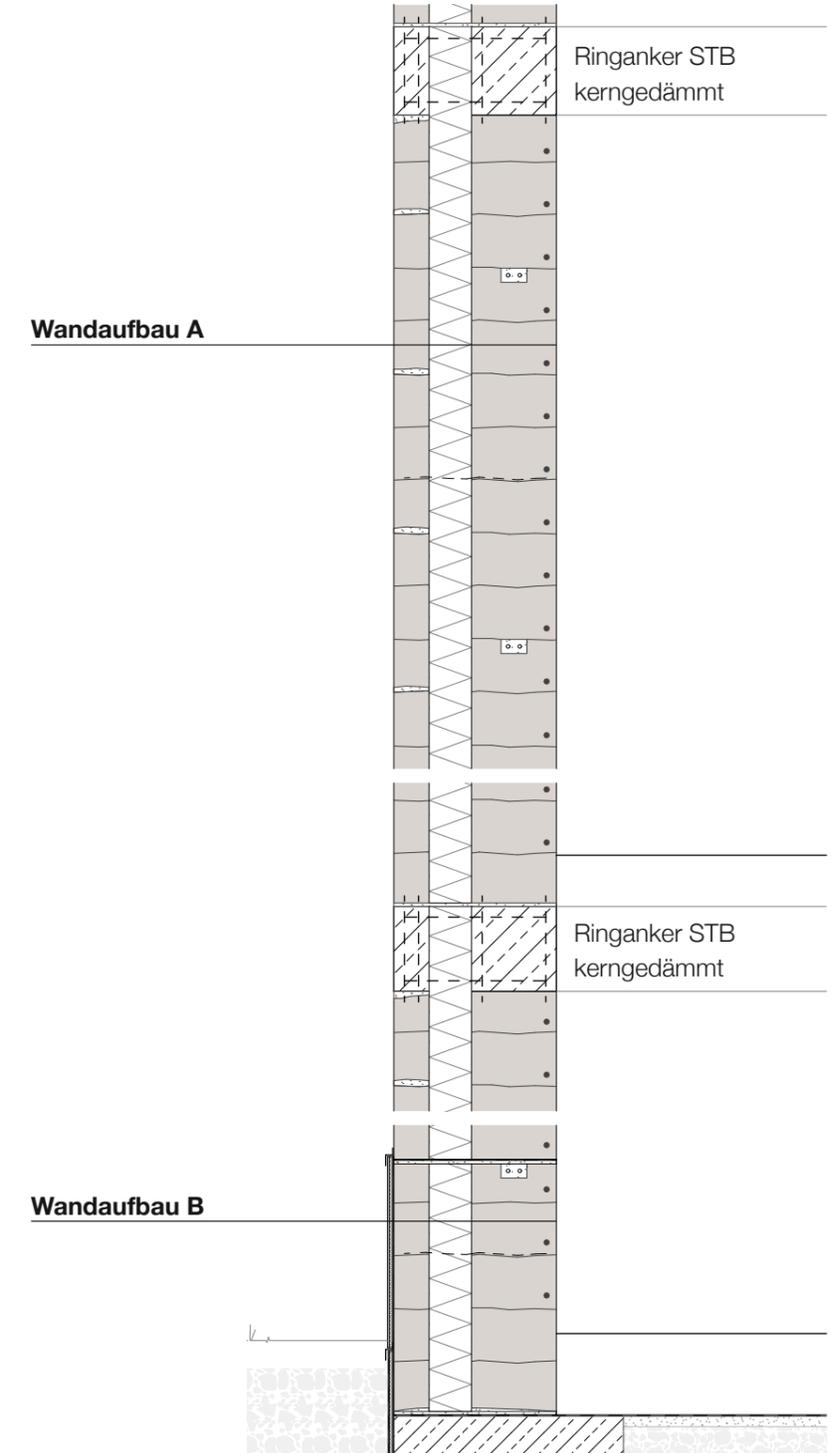


Abb.69: Beispielschnitt einer Stampflehmwand aus vorgefertigten Elementen mit Kerndämmung
M 1:20

[59] Hebel/Wappner, 2023, S.215
 [60] Youtube: gbl tuwien, Martin Rauch - Stampflehm vorfertigung Neue Perspektiven, 2020
 [61] Kapfinger/Sauer, 2023, S.83

Abb.70: Liniengrafik und Ansicht, Stampflehmwand mit Trasskalkleisten und Ringankern aus Stahlbeton



BEISPIEL | SCHNITT 3: VORGEFERTIGTE HYBRIDWAND

Im folgenden Fassadenschnitt wird eine Konstruktion aus Lehm und Holz beschrieben, die auch bald im mehrgeschossigen Wohnbau Anwendung finden könnte. Es handelt sich um ein tragendes Stahlbetonskelett, welches mit vorgefertigten Holz-Lehm-Hybridelementen ausgefacht wird. Der Lehm befindet sich in der Ebene des Stahlbetons und sorgt mit seiner Massivität für genügend Speichermasse, ist nicht brennbar und verleiht dem Raum Behaglichkeit. Die Dämmebene wird gemeinsam mit der Holzfassade vorgehängt.

Die einzelnen Ausfachungselemente sitzen auf einem Stahlwinkel, der auf die Stahlbetondecke gehoben und dort befestigt wird. Die Bautoleranzen werden beim Fertigteil miteinkalkuliert, weswegen eine Fuge von 2 cm zwischen der Unterkante der Decke und der Aufachung erst im Nachhinein ausgestopft und verkleidet wird.

Die äußerste Schicht der Wand ist eine liegende Holzschalung hinter der eine 4 cm Hinterlüftung für die Luftzirkulation sorgt. Die Wärmedämmung besteht aus zwei Lagen Mineralwolle. Sie füllen eine Holzrahmenkonstruktion, die die Fassade stabilisiert. Das Lehm-Holz-Hybridelement wird an der Innenseite mit einer Schicht aus Lehmputz versehen. Der Vorteil dieser Konstruktion ist, dass sie einen hohen Vorfertigungsgrad besitzt und deshalb der Bauablauf schnell vollzogen werden kann. Die vertikalen und horizontalen Lasten übernimmt in diesem Beispiel das Stahlbetonskelett. Eine Alternative zum Stahlbeton wäre, das Skelett in Holzbauweise auszuführen.

Wandaufbau A

vorgefertigt:

- 2 cm Holzfassade, liegend
- 4 cm Hinterlüftung, stehend
- 1 cm OSB-Platte, flächig
- 8 cm Wärmedämmung, Mineralwolle
- 20 cm Wärmedämmung, Mineralwolle
- 4 cm Dreischichtplatte flächig
- 18 cm Holz-Lehm-Hybridelement
- 2 cm Lehmputz

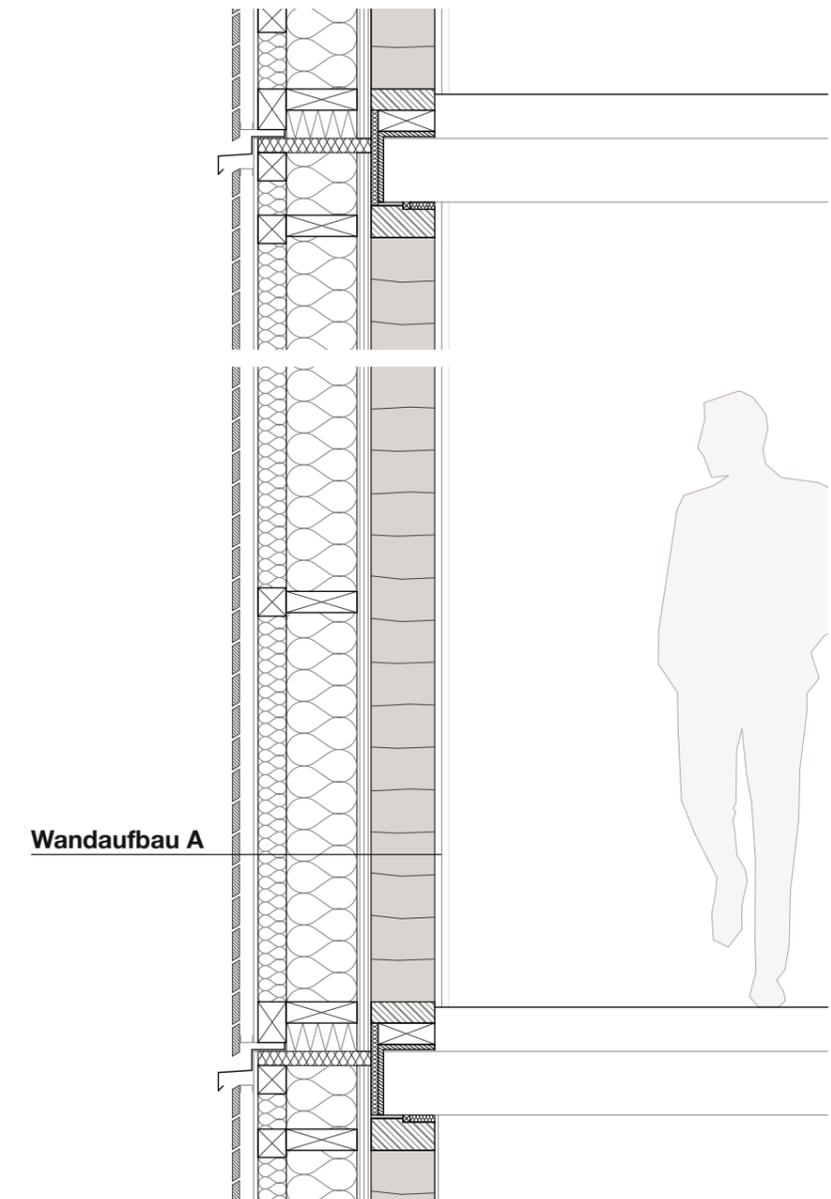


Abb.71: Beispielschnitt einer vorgefertigten Hybridfassade aus Lehm und Holz, Ausfachung für ein Stahlbetonskelett

M 1:20

Abb.72: Liniengrafik und Ansicht, vorgefertigte Hybridfassade aus Lehm und Holz, Ausfachung für ein Stahlbetonskelett



**BEISPIEL | SCHNITT 4:
SANIERUNG MIT
LEHMBAUSTEINEN**

Der vierte Fassadenschnitt zeigt eine hybride Konstruktion aus Holz und Leichtlehm. Das Holzfachwerk trägt die auftretenden Lasten ab und wird folglich mit Leichtlehm- bausteinen ausgefüllt, wobei ein Lage Kalkputz die äußerste Schicht bildet.

Das Stahlbetonfundament wird frostfrei auf einer Sauberkeitsschicht aus Sand ausgeführt. Als Sockel dient ein Natursteinmauerwerk. Dahinter verläuft eine Abdichtungsbahn, die gegen aufsteigende Bodenfeuchtigkeit schützt. Gegen seitlich eindringendes Wasser wird am Fundament und am Natursteinmauerwerk eine Noppenfolie zwischen zwei Abdichtungsbahnen angebracht.

Wie auch beim Beispielschnitt 2 ist dieser Wandaufbau kerngedämmt. Mithilfe von Gewebefolien aus Schilfrohr, sowie Geogittern, halten die beiden Mauerwerksschalen zusammen. Um die Leichtlehmsteine mit der Tragkonstruktion zu verbinden, nutzt man Dreikantleisten. Diese werden im Gefach umlaufend befestigt, was ein Herausfallen der Lehmsteine verhindert. Im Gegensatz zu herkömmlichen Ziegelmauerwerken reicht eine dünne Schicht aus Trasskalk- oder Lehm- mörtel als verbindende Masse. Horizontale Lasten, die bei den vorherigen Schnitten vom Ringanker aufgenommen wurden, werden hier von den Diagonalstäben im Fachwerk abgetragen.⁶²

Besonders bei Sanierungen von historischen Bestands- gebäuden kommt der Austausch von Fachwerken mit Lehm- baustoffen zum Einsatz. In dieser Grafik dient der Lehm als Speichermasse und trägt zur Wohngesundheit bei.

Wandaufbau A

Sanierung:

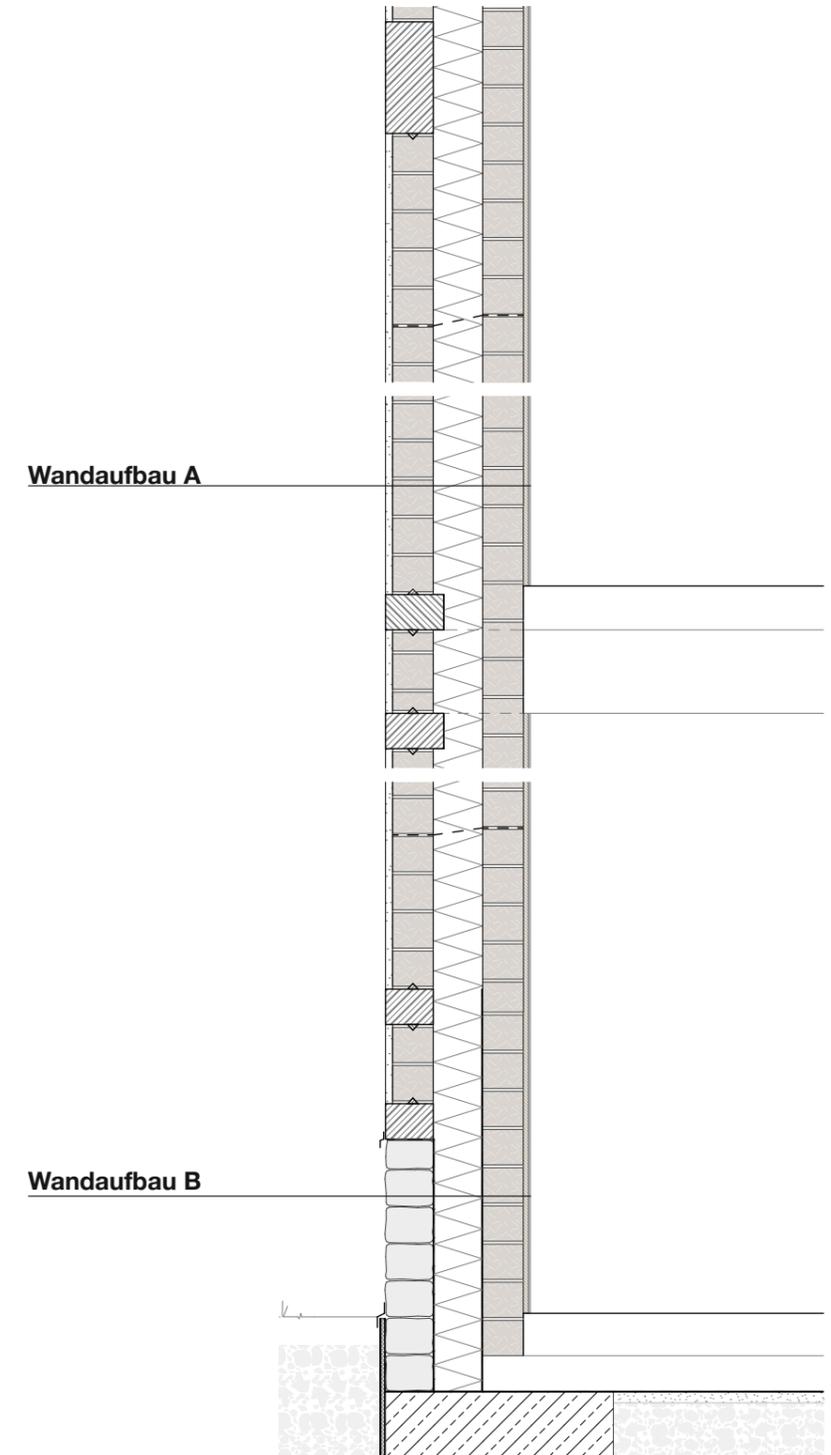
- 3 cm Außenhaut aus Kalkputz
- 14 cm Fachwerk aus Holz mit Leichtlehm- ausfachung
- 14 cm Dämmung (Schilf- rohr, Hanf, etc.)
- 12 cm Leichtlehmsteine, gemauert
- 4 cm Lehm- bauplatte mit Lehmputz

Wandaufbau B

Sockelzone:

- 14 cm Sockel Naturstein
- Abdichtungsbahn
- 14 cm Dämmung (Schilf rohr, Hanf, etc.)
- Abdichtungsbahn
- 12 cm Leichtlehmsteine, gemauert
- 4 cm Lehm- bauplatte mit Lehmputz

Abb.73: Beispielschnitt eines Fachwerks mit Leichtlehm- ausfachung und Natur- steinsockel
M 1:20



[62] Hebel/Wappner, 2023, S.219

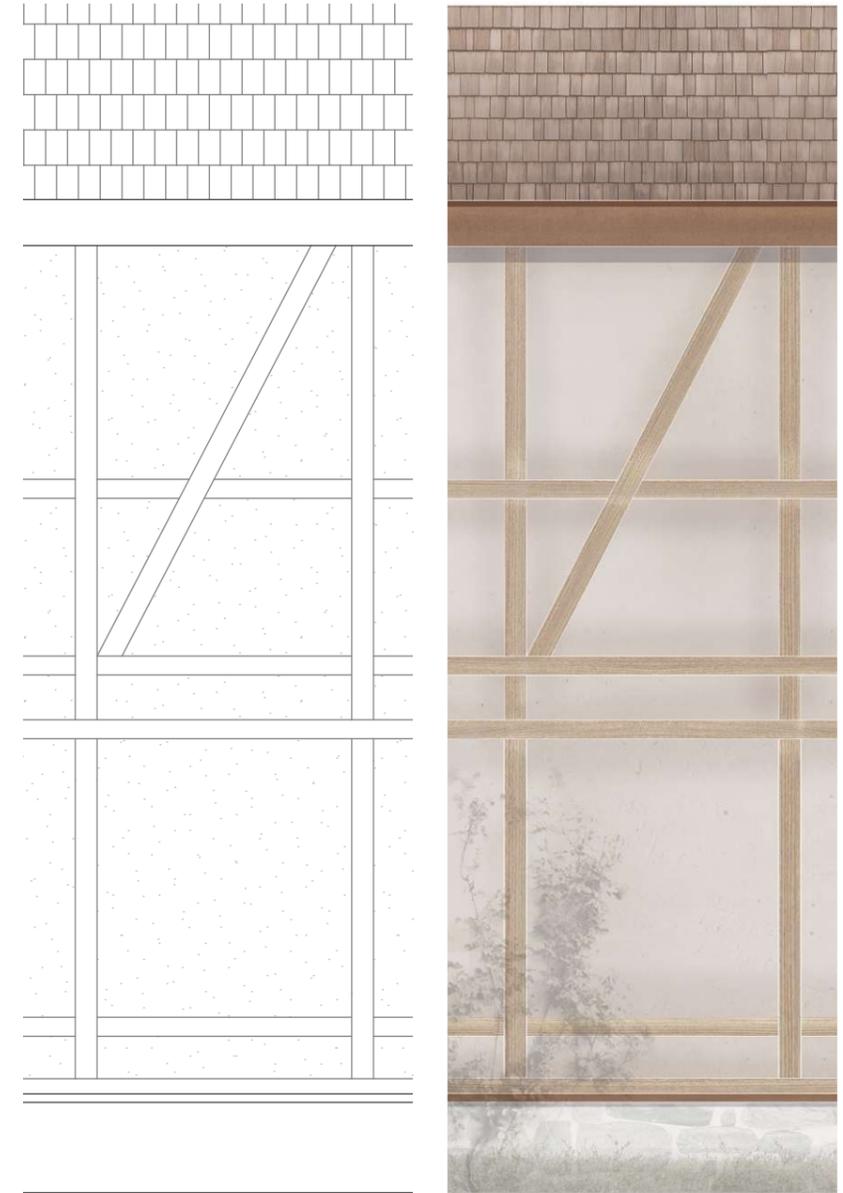


Abb.74: Liniengrafik und Ansicht Fachwerkhauses mit Leichtlehmausfachung und Natursteinsockel

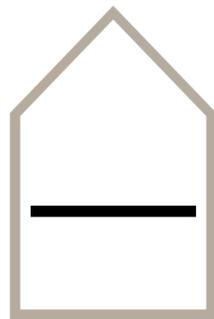
DECKE

Will man Distanzen mit Lehm überspannen, ist es nötig zusätzliche Baustoffe, wie Holz oder Stahlbeton, für die Konstruktion heranzuziehen, da Lehm keine Zugkräfte aufnehmen kann. Aus diesem Grund müssen diese Lasten von anderen Materialien, in Form von Balken, Trägern, Deckenscheiben, etc., aufgenommen und abgetragen werden.

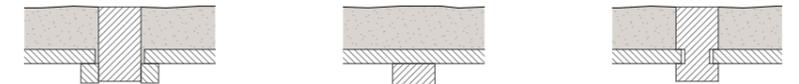
Als besonders gute Deckenkonstruktion hat sich Lehm in Verbindung mit Holz erwiesen. Durch die geringere Ausgleichsfeuchte von rund 6 - 7 % kann Lehm das feuchtere Holz schützen und kann somit Bauschäden durch Feuchtigkeitsbildung verhindern.⁶³

Im traditionellen Lehmbau werden verschiedenste Techniken für die Herstellungen von Lehmdecken genutzt. Die tragende Bretterschicht der Geschossdecke liegt im Fachwerkbau meist direkt auf den überspannenden Holzbalken auf. Vereinzelt können sie auf seitlich am Balken genagelten Leisten liegen, oder in eingefrästen Nuten eingescho-ben sein. Auf die Bretterschicht wird erdfeuchter Lehm aufgebracht und durch Stampfen leicht verdichtet. Als Rieselschutz für den darunterliegenden Raum kam oft eine Lage aus Stroh oder fettem Lehm zum Einsatz.

Eine andere Methode ist die Spalierdecke, bei der Rundhölzer, Spalhhölzer oder Kanthölzern die Lasten der Decke übernehmen. Von oben wird ein Gemisch aus Stroh und Lehm zwischen die Hölzer gedrückt, wodurch sich an der Unterseite 8-10 cm lange „Zungen“ bilden, die später mit einem Reibebrett geglättet werden, um eine homogene Untersicht zu erzeugen.

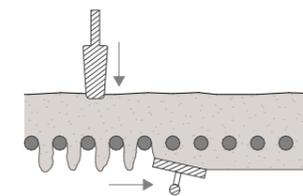


A:
Tragende Holzkonstruktion mit Stampflehmdecken:
- tragende Bretter auf Dreikantleisten
- tragende Bretter auf Holzbalken
- tragende Bretter in Nut eingeschoben



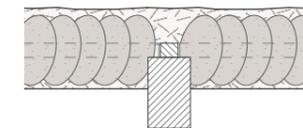
A

B:
Spalierdecke:
Lehm wird von oben durch die Freiräume zwischen den Stäben gedrückt und von unten mit einem Reibebrett geglättet



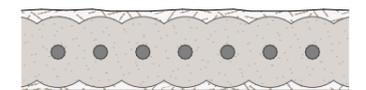
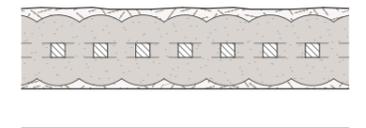
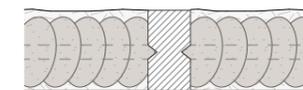
B

C:
Wickeldecken:
Holzstäbe werden vor dem Versetzen mit Lehm umwickelt und auf Holzbalken gelegt oder in Nuten eingeschoben



C

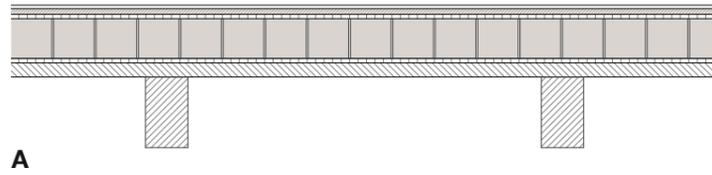
Abb.75: Traditionelle Methoden zur Herstellung von Lehm-Holz-Decken



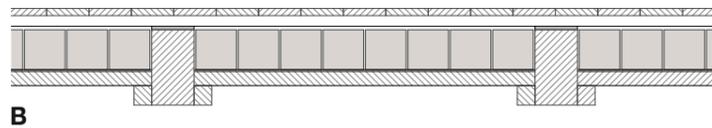
[63] Kapfinger/Sauer, 2022, S.109

A:

Tragende Holzkonstruktion mit einer Schicht aus vorge-trockneten Lehmsteinen als Speicher-masse

**B:**

Tragende Holzkonstruktion mit einer Schicht aus Lehm-steinen in der Tragebene (reduzierte Aufbauhöhe durch Holzleisten am Balken)

**C:**

Kappendecken:
Lehmsteine tragen die De-ckenlasten wie ein flaches Tonnengewölbe in die Balken bzw. Träger ab (Holz, Stahl,..)

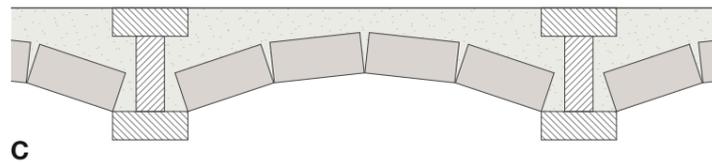
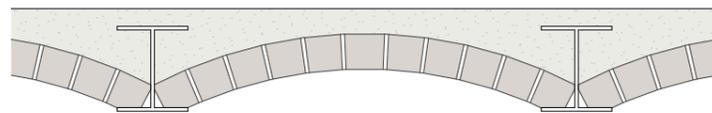


Abb.76: Neuere Methoden zur Herstellung von Decken aus Lehm



Eine ähnliche Vorgehensweise findet man bei Wickeldecken. Auch hier werden Rundhölzer, Kanthölzer, etc. verwendet, die aber bereits vor dem Versetzen zwischen den Balken mit Strohleichtlehm umwickelt werden.

Im modernen Lehm-bau nutzt man diese Techniken eher selten. Zumeist aus denkmalpflegerischen Gründen wie z.B. bei der Sanierung von Bestandsgebäuden, da die Herstellung von traditionellen Decken sehr arbeits- und zeitaufwendig ist.

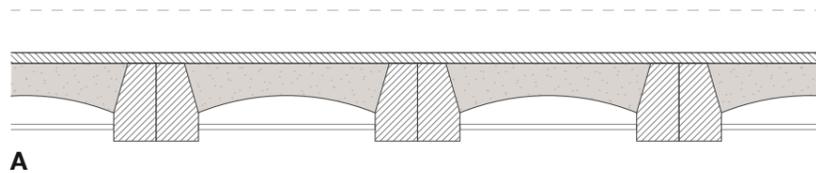
Bei neueren Deckenkonstruktionen werden die Arbeitsschritte vereinfacht. Anstatt des feuchten Lehms, eignen sich z.B. Lehmsteine zur Feuchtigkeits- und Wärmespeicherung, sowie zur Erhöhung der Schalldämmung. Die bereits vollständig getrockneten Lehmsteine können ohne zusätzliche Geräte zur Aufbereitung oder Transport verbaut werden, was im Selbstbau förderlich ist. Auch schwerere Leichtlehmsteine oder selbsttragende Platten aus Leichtlehm eignen sich zum Füllen einer Deckenkonstruktion.

Bei Kappendecken werden Lehmsteine in Form eines flachen Tonnengewölbes angeordnet und können dadurch Deckenlasten in die primäre Tragkonstruktion ableiten. Der Lehm zwischen den Trägern und den Lehmsteinen dient als Füllmaterial.⁶⁴

Eine positive Eigenschaft des Lehms ist, dass für das Überspannen von Räumen grundsätzlich alle zeitgemäßen Konstruktionstypen im Holzbau, wie die Brettstapeldecke, die Balkendecke, die Dippelbaumdecke oder eine Hohlkastendecke eingesetzt werden können. Decken aus Stahlbeton

[64] Minke, 2022, S.132f

- A:**
- Dreischichtplatten
 - Holzbalken, keilförmig
 - Stampflehm
 - Verbindungsmittel, Metall



- B:**
- Das Element wird zum Stampfen auf den Kopf gestellt und erst nach dem Trocken des Stampflehms umgedreht und versetzt

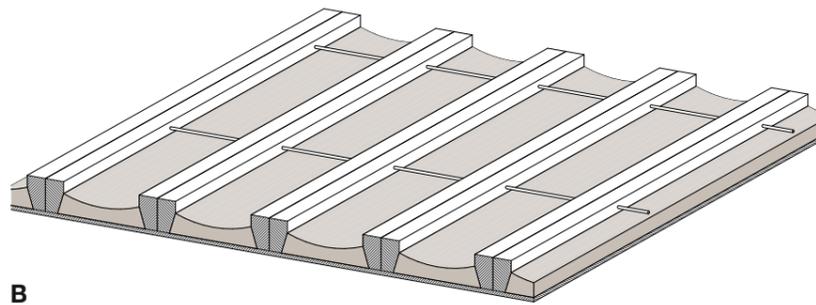


Abb.77: Schnitt und Axonometrie von vorgefertigten Deckenelementen, tragende Holzbalken, Stampflehm, Dreischichtplatten und Verbindungsstangen

oder Decken mit einer tragenden Stahlkonstruktion, welche folgend mit Trasskalkmörtel ausgefüllt wird, bieten zusätzliche Möglichkeiten für Deckenkonstruktionen im heutigen Lehmbau.⁶⁵

Aktuell wird an einer vorgefertigten Holz-Lehm-Elementdecke geforscht, die im Rasterbau Anwendung finden könnte. Keilförmige Holzbalken bilden die Tragstruktur. Zwischen den Balken werden flache Gewölbe aus Stampflehm verdichtet, die sowohl die Planungsschwerpunkte Brandschutz und Schallschutz übernehmen, als auch für ein behagliches Raumklima in den Räumen sorgen. Der oberste Abschluss des Elements besteht aus einer Dreischichtplatte, auf der der geplante Fußbodenbelag aufgebracht wird. Grundsätzlich bilden drei einzelne Baustoffe das gesamte Bauteil. Durch die Vorfertigung des Deckenelements kommt es zu kürzeren Bauzeiten. Laut Hersteller werden die Holzbalken des Systems durch Steckverbindungen zusammengesetzt und der Lehm naturbelassen, sodass die Baustoffe nach Gebrauch ohne Bedenken weiterverwendet, wiederverwendet oder in den Kreislauf zurückgeführt werden können.⁶⁶

[65] Kapfinger/Sauer, 2022, S.114f

[66] TU Braunschweig, Konstruktiver Ungehorsam: die Holz-Lehm-Decke und HORTUS., 2022

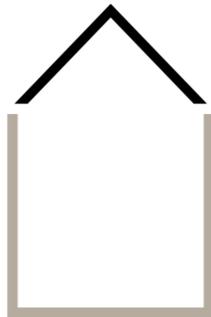
DACH

Um ein Dach in einem Lehmbau herzustellen ist es, genauso wie bei Geschossdecken, erforderlich, die Hilfe von Materialien heranzuziehen, die auf Zug beansprucht werden können. Dächer können, abgesehen von Gewölben, nicht aus Lehm als Mono-Material hergestellt werden. Ein weiterer Punkt, den man beachten muss, ist, dass Witterungseinflüsse in Form von Regen, Frost oder Schnee eine Dachhaut aus Lehm schädigen würden.

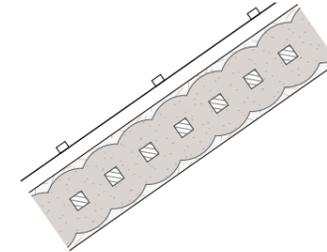
In regenarmen und trocken - heißen Klimazonen ist es durchaus möglich Flächdächer aus reinem Lehm zu bauen. Dies gehört auch zur seit Jahrhunderten zur traditionellen Architektur dieser Gebiete.⁶⁷

In Österreich herrscht hingegen gemäßigtes Klima, welches auch starke Niederschläge mit sich bringen kann und deswegen ein reines Lehmdach nicht ausführbar ist. Die Verbindung mit einer Holzkonstruktion als tragende Struktur ist an dieser Stelle sinnvoll. Grundsätzlich ist die Ausführung sehr ähnlich zu den vorhin beschriebenen Methoden eine Decke mit Lehm- baustoffen herzustellen. Die Dachschrägen werden mittels Leichtlehmwickel, auf Gleitschalung, verlorener Schalung oder auf Spalier erstellt.

Durch die, im Vergleich zu herkömmlichen Füllmaterialien, hohe Masse des Leichtlehms bieten diese Techniken einen guten Schutz vor sommerlicher Überhitzung und wirken sich positiv auf den Schallschutz aus. Aufgrund der vorherrschenden Temperaturen im Winter ist es trotzdem notwendig, die Dachkonstruktion mit einer Wärmedämmung zu versehen.



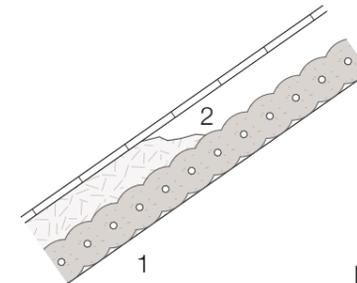
A:
Dach aus Leichtlehmwickel:
Schwerer Leichtlehm wird auf
Leisten gewickelt und zwi-
schen den Sparren versetzt



A



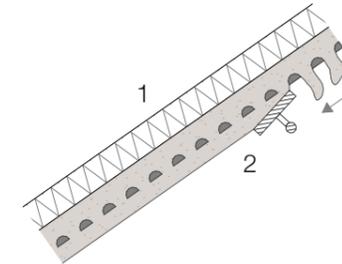
B:
Dach aus Leichtlehmwickel:
Die Wickel können auch dün-
ner ausgeführt werden. Der
Abstand zur Dachhaut wird
mit einer Einblasdämmung
ausgefüllt



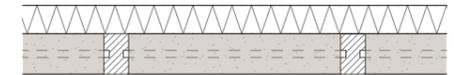
B



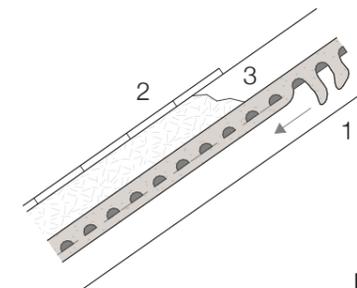
C:
Dach mit Spalierlattung:
Die Leichtlehmfüllung wird
von unten gegen die Dämm-
platte aufgebracht und
anschließend geglättet



C



D:
Dach mit Spalierlattung:
Die Leichtlehmfüllung wird
von oben auf ein Spalier auf-
gebracht und der Luftraum
zwischen Dachhaut und
Lehm ausgeblasen



D

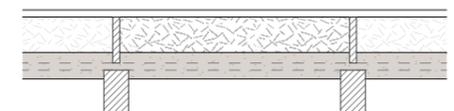


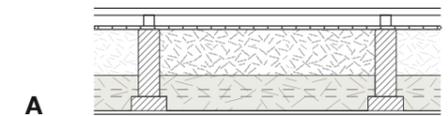
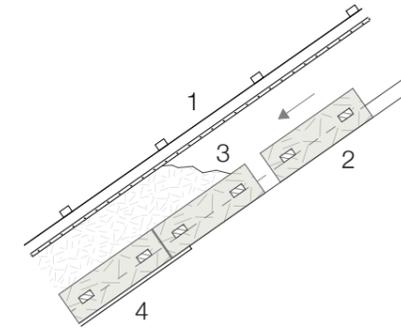
Abb.78: Traditionelle Me-
thoden zur Herstellung von
Lehm-Holz-Dächern (feuchter
Einbau)

[67] Minke, 2022, S.137

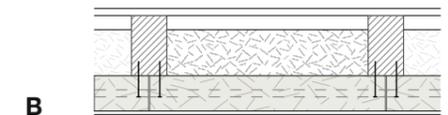
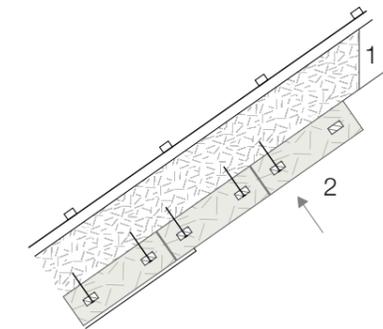
Die beschriebenen Methoden des feuchten Einbaus zwischen den Dachsparren ist ähnlich wie beim Füllen von Deckenkonstruktionen sehr arbeits- und zeitaufwendig. Auch hier kann man auf bereits getrocknete Baustoffe aus Leichtlehm zurückgreifen und sich die Trocknungszeit sparen.⁶⁸

Es handelt sich um selbsttragende Platten, die die Errichtung eines Daches erleichtern sollen. Die Bewehrungsstäbe aus Holz werden bereits vor dem Trocknen in das Leichtlehmgemisch eingelegt, danach mit einer Säge dem Gebrauch entsprechend zugeschnitten und lagern nach dem Versetzen entweder direkt auf einer Tragleiste auf dem Dachsparren auf oder werden von unten an die Dachkonstruktion geschraubt. Falls es bei der Montage zu einer Fugenbildung zwischen den Platten kommt, können diese mit Leichtlehm oder mit einem Mörtel aus Faserlehm geschlossen werden.⁶⁹

A:
Dachdämmung mit selbsttragenden Leichtlehmplatten:
Die Platten werden auf die Sparren geschoben und der Luftraum anschließend mit Dämmstoff ausgefüllt



B:
Dachdämmung mit selbsttragenden Leichtlehmplatten:
Durch die Bewehrungslatten ist es möglich die Platten direkt mit dem Sparren zu verschrauben



C:
Dachdämmung mit selbsttragenden Leichtlehmplatten:
Die Platten werden als letztes Element zum Aufbauhinzu-gefügt und werden in den Freiraum zwischen Dämmung und Wandverkleidung (verlorene Schalung) geschoben

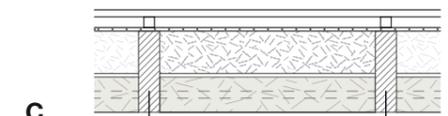
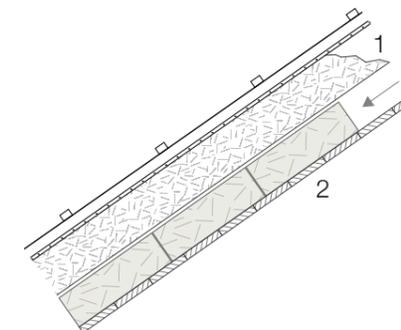


Abb.79: Traditionelle Methoden zur Herstellung von Lehm-Holz-Dächer (trockener Einbau)

[68] Volhard, 2021, S.119

[69] ebenda, S.151

ÖFFNUNG

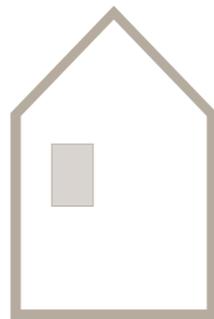
Betrachtet man historische Lehmbauten aus Stampflehm, kann man erkennen, dass die Größe und Menge von Wandöffnungen überschaubar sind. Tragende Lehmwände wurden nur mit kleinen und schmalen Fenstern versehen, da dadurch die Druckkräfte besser abgeleitet wurden, was grundsätzlich auch dem Wesen des Lehms entspricht.

Die Öffnungen in einem Lehmbau schwächen die Tragfähigkeit und müssen daher behutsam gesetzt werden. Im traditionellen Bauen wurde oftmals ein sichtbarer Sturz aus Holz eingelegt, was bis heute eine gängige Methode ist Fenster- oder Türöffnungen zu errichten. Durch seine geringe Ausgleichsfeuchtigkeit von 6-7% kann der Lehm miteingestampftes Holz (9%) gut in die Struktur einbinden und konserviert es zugleich. In Europa sind die meisten historischen Lehmbauten verputzt und darum ist dieser Aufbau nicht immer sichtbar.

Da es in Österreich bis heute keine anerkannten Normen und Berechnungsgrundlagen für das Bauen mit Lehm als tragenden Baustoff gibt, liegt es bei kleineren Öffnungen im Ermessen der ausführenden Fachkräfte die angemessene Konstruktion zu wählen und auszuführen.

Handelt es sich um jedoch um größere Spannweiten, müssen die Sturzelemente auf ihr Tragverhalten geprüft werden. Als Hilfsmaterialien können Stahlbeton, bewehrter Trasskalkmörtel oder Stahl dienen.⁷⁰

Auf den folgenden Seiten werden einige Methoden erläutert, wie man Öffnungen unterschiedlicher Größe in einer tragenden Lehmwand ausführen kann.



STURZVERMEIDEN

Beim Bauen mit Lehm bringt jede Öffnung einen konstruktiven Aufwand mit sich, bei dem es sowohl technische, als auch gestalterische Anforderungen zu lösen gilt.

In der ersten Variante wird der Sturz gänzlich weggelassen, was das Thema der konstruktiven Ausführung überflüssig macht. Die Wandscheiben stehen als massive Elemente zwischen den Öffnungen. Als Sturz dient in diesem Fall die Geschosdecke oder bei eingeschossigen Bauten das Dach, welche aus einem alternativen Material gefertigt sind.

Aus gestalterischer Sicht erscheint die Lehmmauer jedoch nicht mehr als durchgehende Außenwand, da sie durch die raumhohen Öffnungen in einzelne Teile segmentiert wird. Wird für den Einbau von Türen und Fenster diese Methoden angedacht eignen sich auch vorgefertigte Lehmelemente für das Errichten der Wände, da durch diese die Bauzeit verkürzt wird.⁷¹

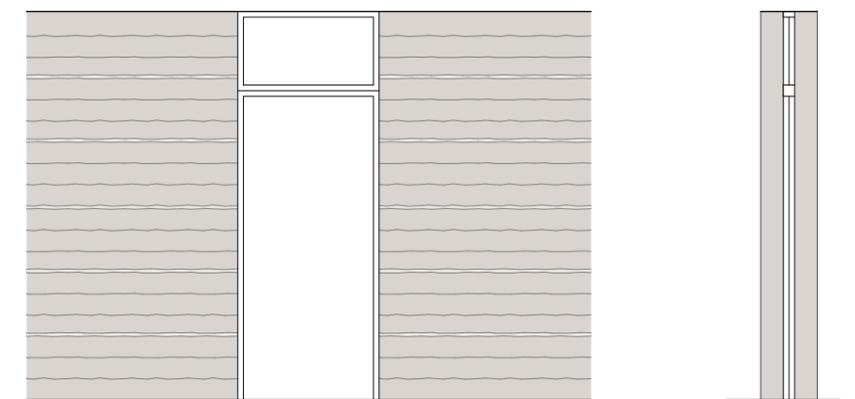


Abb.80: Lehmwand mit raumhoher Öffnung, Vermeidung eines Sturzes

[70] Kapfinger/Sauer, 2022, S.89

[71] Kapfinger/Sauer, 2022, S.94

STURZ ABHÄNGEN

Eine weitere Methode eine Öffnung auszuführen, bildet das Abhängen des Lehms von einer Geschossdecke oder von einem Ringanker. Der Sturz wird zeitgleich mit der Wand errichtet und die Stahlbügel werden folglich mit der tragenden Decke oder dem Ringanker vergossen. Die Unterkante des Sturzes besteht meist aus einer dünnen Metallplatte auf der die Bewehrungsbögen verschweißt sind. Die Platte sorgt dafür, dass die Kanten der Öffnung geschützt bleiben und durch die Bügel kommt es zu keiner Verformung des Sturzes aufgrund der schweren Lasten des Lehms.

Die Methode erweist sich als äußerst effizient, da es ohnehin ein überspannendes Element in Form einer Decke oder eines Ringankers geben muss, welches man sich mit dieser Ausführungsvariante gleich zunutze machen kann, um eine weitere Funktion der Lastenabtragung zu übernehmen.⁷²

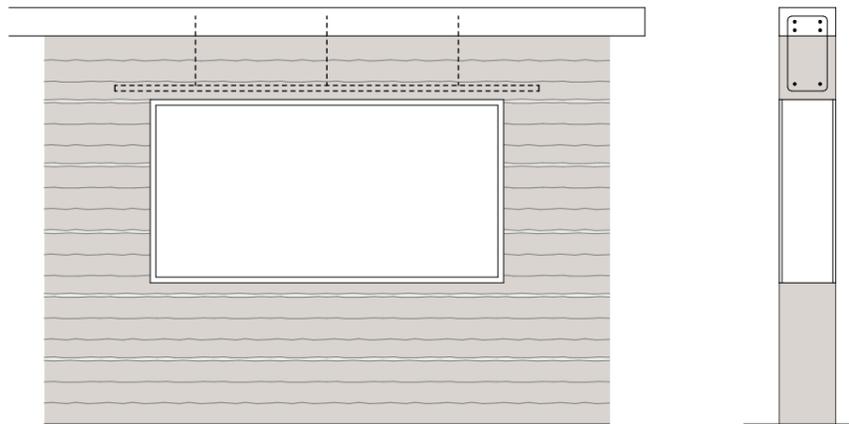


Abb.81: Fensteröffnung mit abgehängtem Lehmsturz

[72] Kapfinger/Sauer, 2022, S.94ff

STURZ AUS ANDEREM MATERIAL

Ein sichtbarer Sturz aus einem anderen Material steht für die traditionelle Detaillösung einer Öffnung im Lehmbau.

Wie bereits im einleitenden Text beschrieben, wurde ein Balken aus Holz in das Mauerwerk miteingestampft, da sich die beiden Baustoffe gut miteinander verbinden lassen. Lehm konserviert das Holz und es kommt zu keiner Feuchtigkeitsbildung, welche das Bauteil schädigt.

Die Erscheinung ist der Aufteilung von Zug- und Druckkräften entsprechend. Es ist klar erkennbar welches Material welche Lasten aufnimmt. Bei historischen Bauten wurde diese vermeintlich einfache Lösung verputzt und verziert, um eine komplexere Konstruktion nachzubilden. Heutzutage ist es eine Frage des gewünschten Erscheinungsbildes aus welchem Material ein sichtbarer Sturz bestehen soll (Beton, Naturstein, Trasskalk, etc.).⁷³

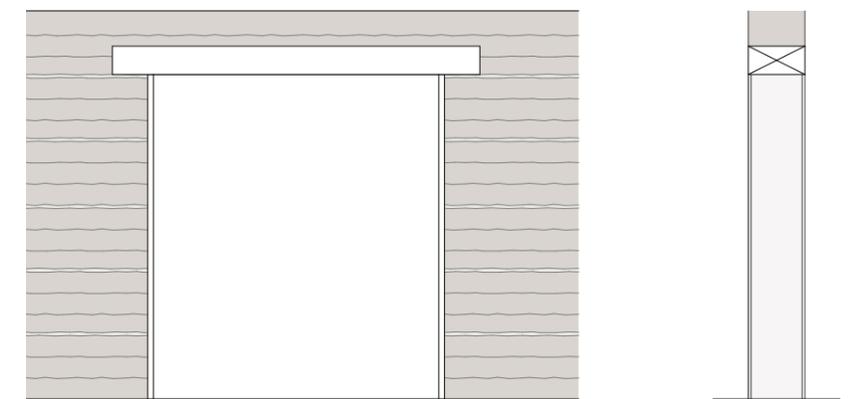


Abb.82: Öffnung mit sichtbarem Träger aus einem anderen Material

[73] Kapfinger/Sauer, 2022, S.94ff

ARMIRTER STURZ

Sind kleinere Öffnungen in der Lehmwand geplant, bietet es sich an Bewehrungsstäbe über der Öffnungen miteinzustampfen, was eine günstige Alternative bildet, da keine Konstruktion aus einem anderen Material benötigt wird. Bei solchen Öffnungen wird meist auf die Erfahrung und das Ermessen des Fachpersonals vertraut. Normen und Berechnungsgrundlagen gibt es nicht.

Da über der Öffnung auch Drucklasten herrschen, werden diese mithilfe einer Mischung aus Lehm und Trasskalk abgeleitet. Die Mischung wird, gemeinsam mit den Metallstäben, bogenförmig über dem Sturz aufgebracht und leitet nach dem Austrocknen die auftretenden Druckkräfte in die Wand ab. Die Größe der Öffnung bestimmt die Menge der Lehm - Trasskalkmischung.

Durch die Verwendung von Trasskalk wird auch die Unterkante des Sturzes geschützt, wodurch es keine zusätzlichen Maßnahmen braucht.⁷⁴

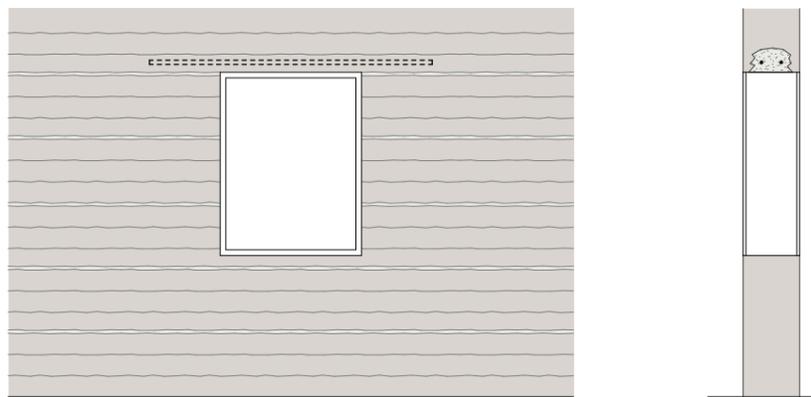


Abb.83: Kleine Fensteröffnung mit bewehrtem Lehmsturz

[74] Kapfinger/Sauer, 2022, S.94ff

VERSTECKTER STURZ

Wenn die Öffnungen in der Wand größer sein sollen, muss ein Träger aus Stahlbeton oder Stahl zum Überspannen eingebaut werden. Die eingestampften Bewehrungsstäbe in Kombination mit Trasskalk können diese schweren Lasten nicht mehr alleine ableiten.

Der Unterschied zum sichtbaren Sturz ist, dass das Tragelement bei dieser Variante hinter einer Schicht aus Lehm versteckt wird, um eine homogene Oberfläche zu kreieren. Es ist allerdings notwendig, dass der Träger von Statiker:innen berechnet wird, da die auftretenden Kräfte nicht immer gleich sind. Der Lehm selber trägt im Bereich des Sturzes nicht, sondern er wird mithilfe des Trägers getragen.

Bei liegenden Fensteröffnung ist diese Methode ausführbar und das Tragelement kann auch zeitgleich mit dem Errichten der Lehmwand miteingestampft werden.⁷⁵

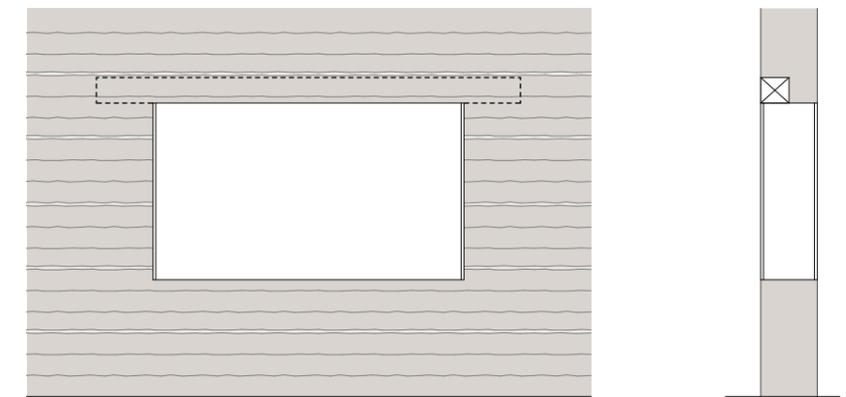


Abb.84: Liegende Öffnung mithilfe eines versteckten Trägers hinter der Fassade

[75] Kapfinger/Sauer, 2022, S.95, 99ff

ELEMENTE STAPELN

Diese Methode beschreibt das Stapeln von im Werk vorgefertigten Lehmelementen. Das Bauen mit Stampflehm ist in der Regel ein langsamer Prozess, bei dem man eher auf der Baustelle auf Schwierigkeiten stößt und danach entsprechend reagiert. Dies ist grundsätzlich kein Problem, kann sich aber auf den Bauablauf auswirken. Durch die Vorfertigung kann man bereits in der Planungsphase auf auftretende Turbulenzen von verschiedenen Fenstergrößen reagieren, wodurch die Bauzeit positiv beeinflusst wird.

Die auf Zug belasteten Sturzelemente werden in die Fertigteile integriert und müssen auf der Baustelle nur noch mit einem Kran versetzt werden. Die Unterkante des Sturzes wird von einer Metallplatte geschützt, welche im Bereich des Auflagers etwas zurückspringt, um in der fertigen Fassade unsichtbar zu sein. Aufgrund der Witterungseinflüsse ist es notwendig, dass die Unterkanten der Elemente vor Erosion geschützt werden.⁷⁶

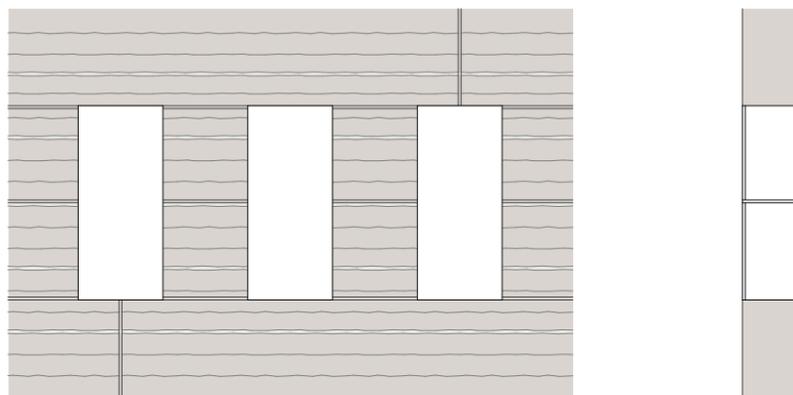


Abb.85: Öffnungen durch Stapelung von vorgefertigten Elementen, Träger bereits im Element eingearbeitet

[76] Kapfinger/Sauer, 2022, S.95, 102ff

TRAGENDER RAHMEN

Die abschließende Möglichkeit eine Lehmwand mit einer Öffnung zu versehen ist der Einsatz von statisch wirksamen Rahmen. Wenn ein Rahmen stabil genug ausgeführt ist, kann er als selbsttragendes Element eingesetzt werden und übernimmt, neben der Lehmwand, das Abtragen der Lasten. Beim Bauen mit vorgefertigten Stampflehmelementen kann der Rahmen als Trockenbauelement nahtlos an die bereits trockene Lehmwand anschließen. Einer speziellen Lösung für den Sturz bedarf es nicht und die Fertigteile können direkt auf dem Rahmen aufliegen. Die Methode eignet sich auch für vor Ort gestampfte Wände.

Der Rahmen kann z.B. aus Holz oder aus Metall bestehen, wobei die Dimensionierung immer von Tragwerksplaner:innen geprüft werden muss.⁷⁷

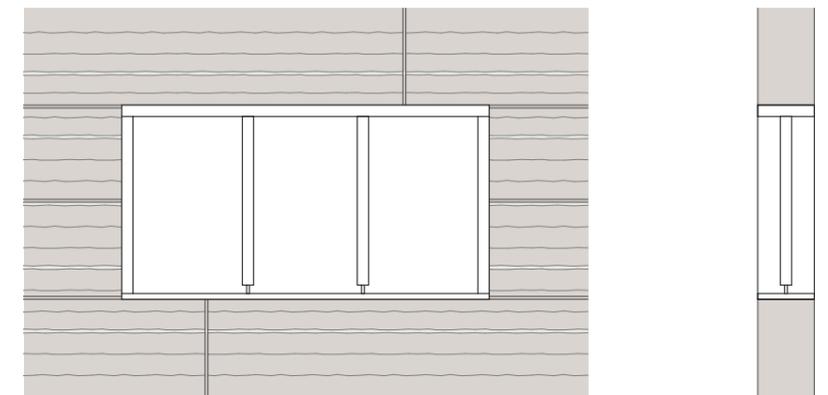


Abb.86: Öffnung durch einen statisch wirksamen Rahmen

[77] Kapfinger/Sauer, 2022, S.95, 106f

OBERFLÄCHE

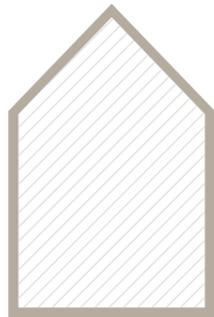
Es gibt eine Vielzahl an Möglichkeiten sowohl Wände, Decken oder, wie bereits beschrieben, Böden im Innenraum, als auch Außenwände mithilfe von Lehmstoffen zu gestalten. Auf den nächsten Seiten werden einige ausgewählte Beispiele näher erläutert.

OBERFLÄCHE AUSSEN STAMPFLEHMWAND

Wird eine Außenwand aus Stampflehm errichtet, lässt sich nach einiger Zeit erkennen, dass die Oberfläche der Wand zunehmend rauer wird. Dieser Effekt wird durch Erosion des Lehms hervorgerufen und findet verstärkt auf der wetterzugewandten Seite statt.

Die Fließgeschwindigkeit des Regenwassers spielt hier eine entscheidende Rolle, denn je schneller das Wasser an der Lehmfassade abläuft, desto mehr feiner Lehm wird aus der äußeren Wandschicht ausgespült. Dies lässt sich durch das Einstampfen von Trasskalkleisten oder einer Lage aus gebrannten Ziegeln verlangsamen und die Erosion wird dadurch berechenbar. Nachdem die äußerste Schicht freigelegt wurde, sind die Zuschläge im Lehm erkennbar und diese Steinschicht schützt die restliche Lehmwand bis letztlich keine Erosion mehr auftritt.

Die eingestampften Leisten werden Erosionsbremsen genannt und sind wegen ihrer horizontalen Lage in der Fassade maßgeblich am Erscheinungsbild einer Stampflehmwand mitbeteiligt. Durch das Auswaschen des Lehms treten die Leisten aus Trasskalk oder Ziegel aus der Fassade hervor und erzeugen aufgrund der Schattenbildung ein anderes Fassadenbild als es



bei der Errichtung der Wand der Fall war. Die Erosionsbremsen sorgen also nicht nur dafür dass die Wand nicht ausgewaschen wird, sondern bieten auch gestalterischen Potenzial. ⁷⁸

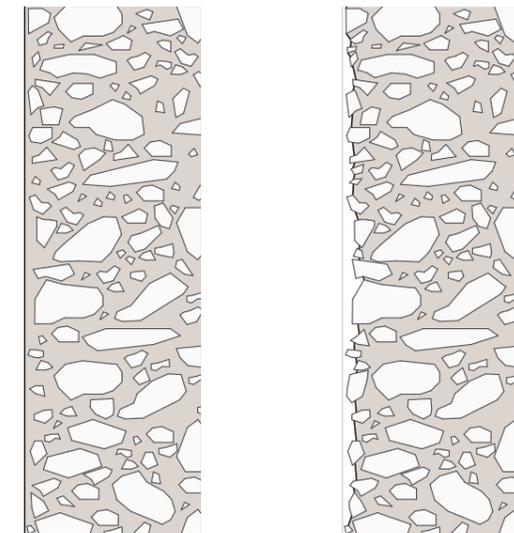


Abb.87: Erosion einer Lehmwand, Außenschicht wird mit der Zeit ausgewaschen



Abb.88: Ansicht einer erodierten Stampflehmwand

Es ist auch möglich ein anderes Material als Einlage gegen das schnelle Abfließen des Regenwasser zu verwenden. Holzleisten können ebenso eingearbeitet werden, um die Wand vor Schlagregen zu schützen und gleichzeitig sollen sie als Erosionsbremse dienen. Im Fall der RWTH Aachen wurde ein Wandstück aus vorgefertigten Stampflehmblöcken mit geschwungenen Holzleisten aufgebaut.

Vor allem die verwendeten Erosionsbremsen haben durch ihre markante Form das Potenzial das Erscheinungsbild einer Wand zu beeinflussen. ⁷⁹

[78] Kapfinger/Sauer, 2022, S.72ff

[79] Hoppe, LehmLabor „Gesteuerte Erosion“, 2023

- A:**
Stampflehmwand mit eingearbeiteten Trasskalkleisten, direkt nach Fertigstellung
- B:**
Erosion tritt ein und die Außenschicht der Wand wird ausgewaschen
- C:**
Trasskalkleisten treten nach fortschreitender Erosion weiter hervor, Erosion stoppt, fertige Oberfläche (ca. 2cm)
- D:**
Stampflehmwand mit gebrannten Ziegelleisten als Erosionsbremsen

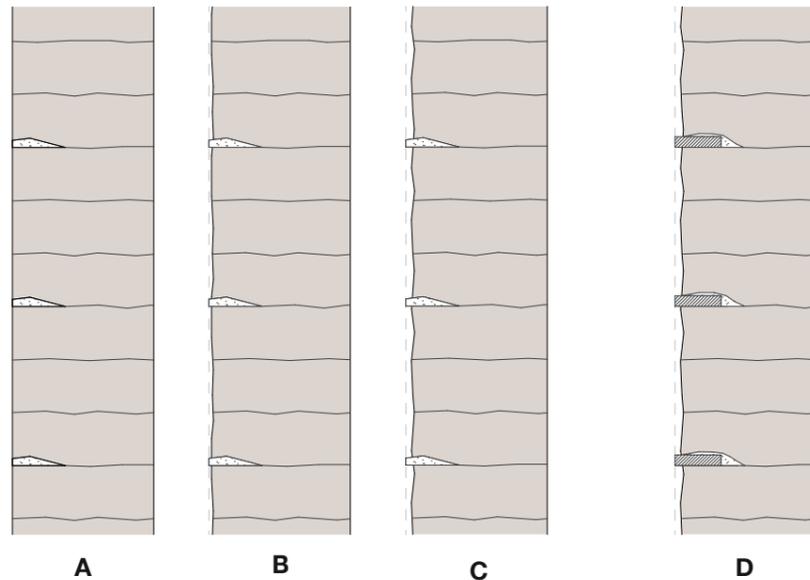


Abb.89: Fortschreitende Erosion

Abb.90: Mock-Up der RWTH Aachen, vorgefertigte Stampflehmblöcke mit geschwungenen Leisten aus Holz



LEHMPUTZE

Lehmputze setzen sich im allgemeinen aus Sand, Schluff und Ton zusammen. Der Tonanteil sollte so hoch sein, dass die Bindekraft und die Haftfähigkeit ausreichend ist, was bei einer Zugabe von 5% Ton schon genügen kann. Ab einer Zugabe von 10% Ton, können sich beim Trocknen unerwünschte Schwindrisse im Putz bilden.

Um ein geeignetes Mischungsverhältnis zu erhalten, lohnt es sich verschiedene Proben zu erstellen, da nicht nur das Verhältnis von Sand, Schluff und Ton die Wirkung des Putzes beeinflusst. Faktoren die zusätzlich berücksichtigt werden müssen sind die Tonart, die Zuschläge, der Wassergehalt und die Korngrößenverteilung des Sandes.

Lehmputze können, neben Lehmoberflächen, auch auf Ziegel-, Naturstein-, Kalksandstein- und Betonoberflächen aufgebracht werden. Der Putz übernimmt bei Letzteren in der Regel die raumklimatischen Anforderungen des Feuchteausgleichs, sowie gestalterische Funktionen. Voraussetzung für das Verputzen ist, dass der Untergrund ausreichend rau, trocken und frei von losen Rückständen ist.

Wird z.B. ein Mauerwerk mit einem Lehmputz versehen, werden Kerben in die noch feuchten Lagerfugen geschnitten. Bei großformatigen Lehmbausteinen wird die Wand genässt und mit einem Nageleisen durch diagonales Ritzen aufgeraut. Dadurch bildet sich ein geeigneter Untergrund auf dem der Putz haften kann.

Bei Stampflehmwänden wird ebenfalls durch Befeuchten und anschließendes Ritzen oder durch Einschlagen von klei-

LEHMPUTZ AUSSEN

nen Löchern ein geeigneter Haftgrund erzeugt. Werden jedoch Materialien eingesetzt, bei denen das Aufrauhnen nicht möglich ist, kann ein Spritzbewurf oder ein Putzträger aus einem anderen Material verwendet werden. Ziegeldraht, verzinkte Drähte, Kunststoffgitter oder Schilfrohrmatten eignen sich als Hilfskonstruktion zum Verputzen.⁸⁰

Außenputze sorgen grundsätzlich dafür, dass die Wandkonstruktion vor Wettereinflüssen geschützt wird. Sie müssen wetterfest sein oder mit einem wetterfesten Anstrich versehen sein. Zusätzlich müssen Außenputze elastischer als die Konstruktion sein, damit es zu keiner Rissbildung in der Außenhaut kommt. Weiters muss die Dampfdurchlässigkeit gewährleistet sein, sodass unter Umständen auftretendes Kondensat nach außen transportiert werden kann.

Wenn man einen reinen Lehmputz an der Außenwand anbringt, muss dieser frei von Rissen sein und darf zudem nicht an der Wetterseite liegen. Der Putz benötigt in diesem Fall einen wasserabweisenden Anstrich und zusätzlich sollte ein großer Dachüberstand das darunterliegende Bauteil vor Wettereinflüssen schützen.

Wasserabweisende Lehmputze können durch Zugabe von organischen oder mineralischen Bindemitteln, wie z.B. Kalk, Zement, Öle, Harze, Bitumenemulsion, Gips, etc., hergestellt werden.

Man spricht hier von stabilisierten Lehmaußenputzen. Bei

[80] Minke, 2022, S.106ff

LEHMPUTZ INNEN

historischen Fachwerksbauten wird in der Regel ein Kalkputz für die einzelnen Gefache verwendet.

Oftmals reichen für Außenwände mit geringer Wetterbelastung auch wasserabweisende Anstriche aus. Zu beachten ist bei der Wahl des Putzes, dass die Dampfdurchlässigkeit nicht zu stark beeinträchtigt wird.⁸¹

Nicht nur im Innenraum eines Lehmhauses bietet es sich an einen Putz aus Lehm zu verwenden, sondern auch bei betonierten Wänden oder im Ziegelbau. Wegen seiner Elastizität, Sorptionsfähigkeit, Diffusionsoffenheit, Festigkeit, sowie seiner einfachen Verarbeitung und Reparatur ist der Lehminnenputz der am öftesten eingesetzte Lehmbaustoff.

Durch die verschiedenen Eigenfarben von unterschiedlichen Lehmarten, lässt sich auch der Innenraum mit ihm gestalten. Zudem ist es möglich Erdfarbpigmente oder farbigen Ton in die Putzmischung zu mengen, um eine entsprechende Farbigekeit zu erlangen.

Beim Auftragen der Innenputze unterscheidet man zwischen dem Aufziehen, dem maschinellen Anspritzen und dem Anwerfen. Ersteres eignet sich besonders für dünne Lagen, wobei man bei dickeren Schichten, z.B. beim Ausgleichen von unebenen Wänden, Spritztechniken oder das Anwerfen bevorzugt. Durch unterschiedliche Putztechniken kann mit Lehm sowohl glatte, ruhige Oberflächen, als auch raue Strukturen erzeugen und dadurch den Innenraum individuell gestalten.⁸²

[81] Minke, 2022, S.112ff
[82] Volhard, 2021, S.169ff

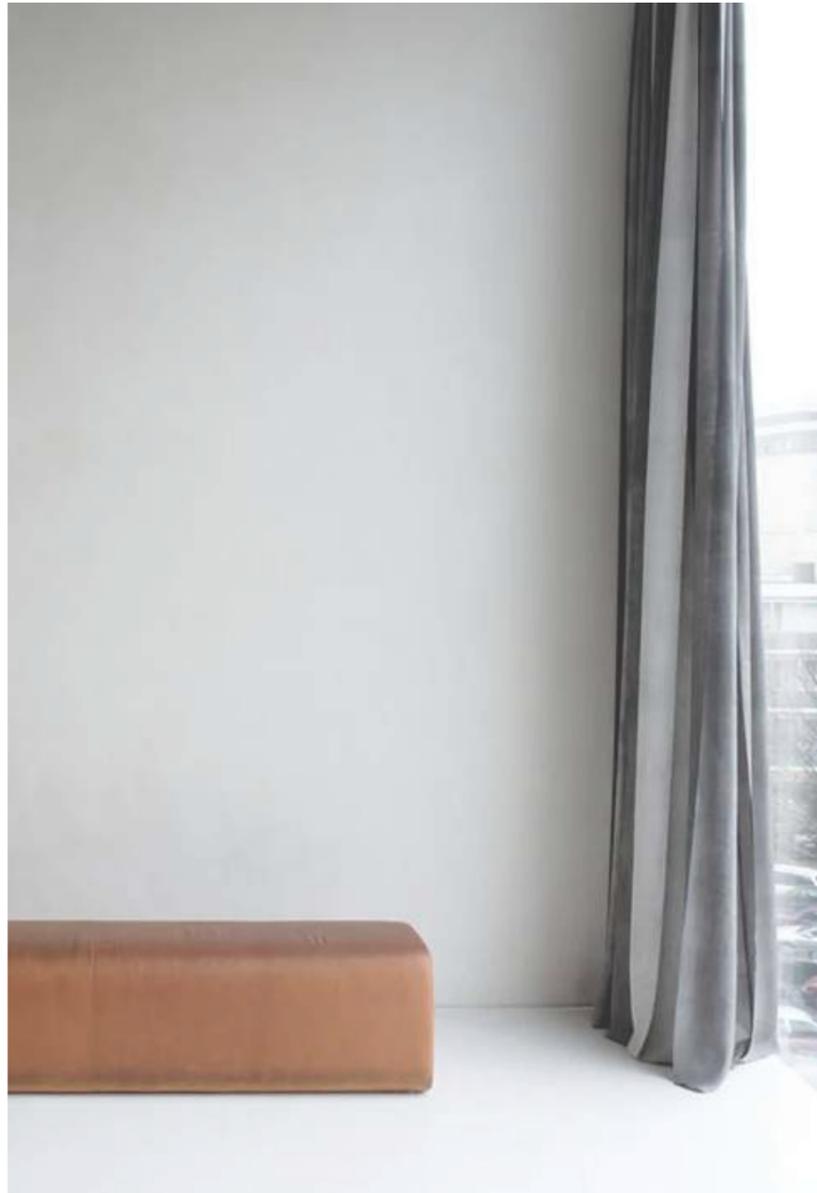


Abb. 91: Lehmputz, Kolumba Museum, Peter Zumthor, 2007

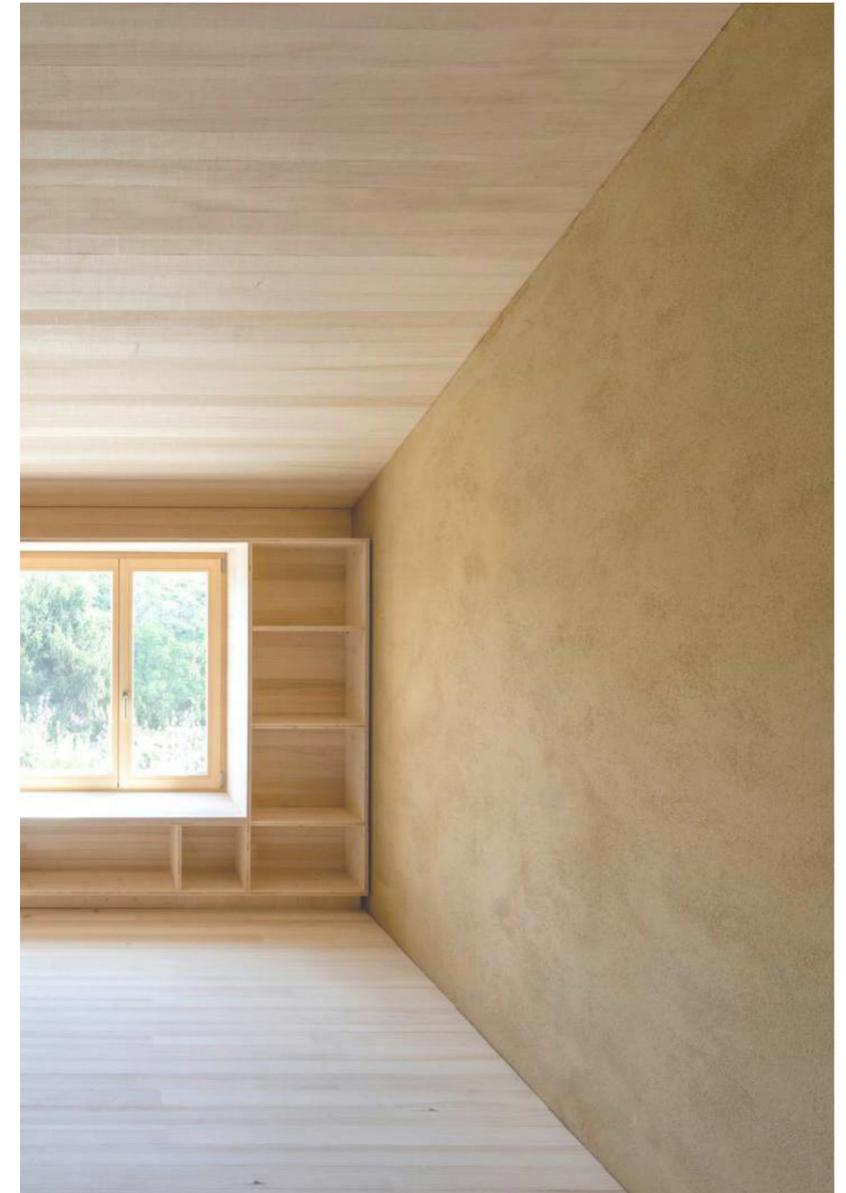


Abb. 92: Lehminnenputz, Haus ohne Beton, Andi Breuss, Breitenfurt (NÖ), 2020

„Fürchte nicht, unmodern gescholten zu werden. Veränderungen der alten Bauweise sind nur dann erlaubt, wenn sie eine Verbesserung bedeuten, sonst aber bleibe beim Alten. Denn die Wahrheit, und sei sie hunderte von Jahren alt, hat mit uns mehr inneren Zusammenhang als die Lüge, die neben uns schreitet.“⁸³

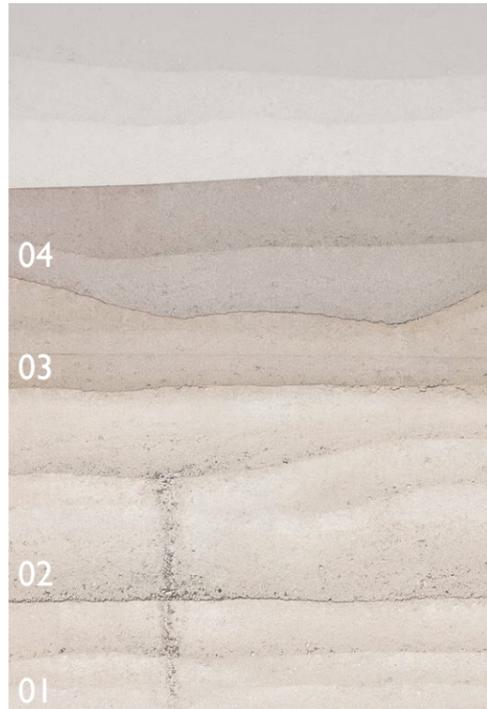
- Adolf Loos, 1913

[83] Loos, „Aber suche den Grund der Form auf“, Gedanken von Adolf Loos, 1909, S.73

TEIL ZWEI.

KONZEPT.
LEHM LEBEN.

Abb.93: Facade, Aerecura
Earth Rammed Builders



04

FRAGMENTE AUS LEHM

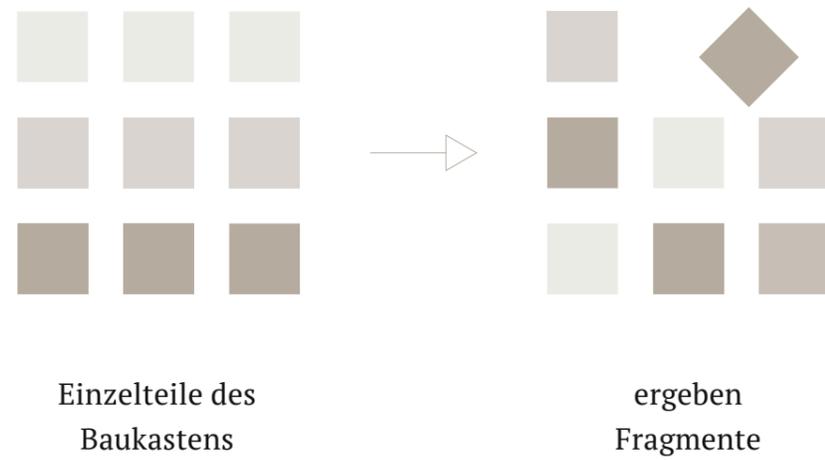
Lehm als Material, um architektonischen Raum im menschlichen Kontext zu schaffen.

Fragment:
Bruchstück, etwas Unvollendetes

04

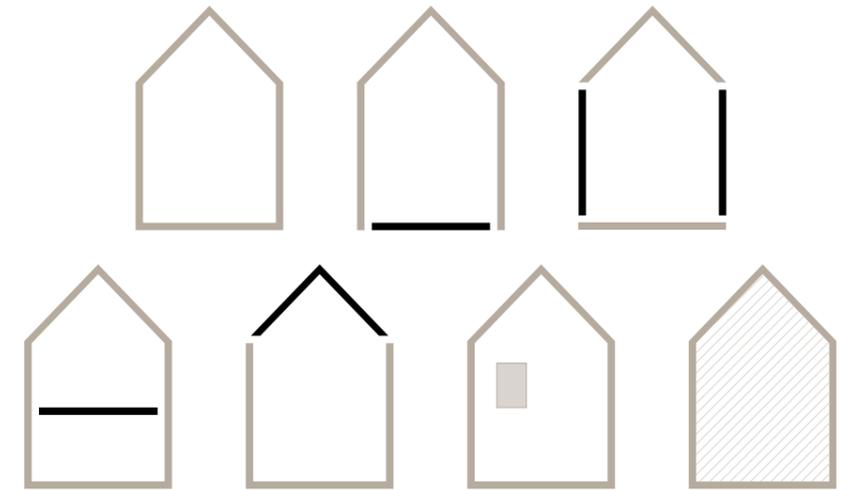
FRAGMENTE

Aus den beschriebenen Teilen des Baukastens, setzen sich nun unterschiedliche Fragmente zusammen. Jedes Fragment ergibt sich aus einer individuellen Konstellation an Teilen des Baukastens.



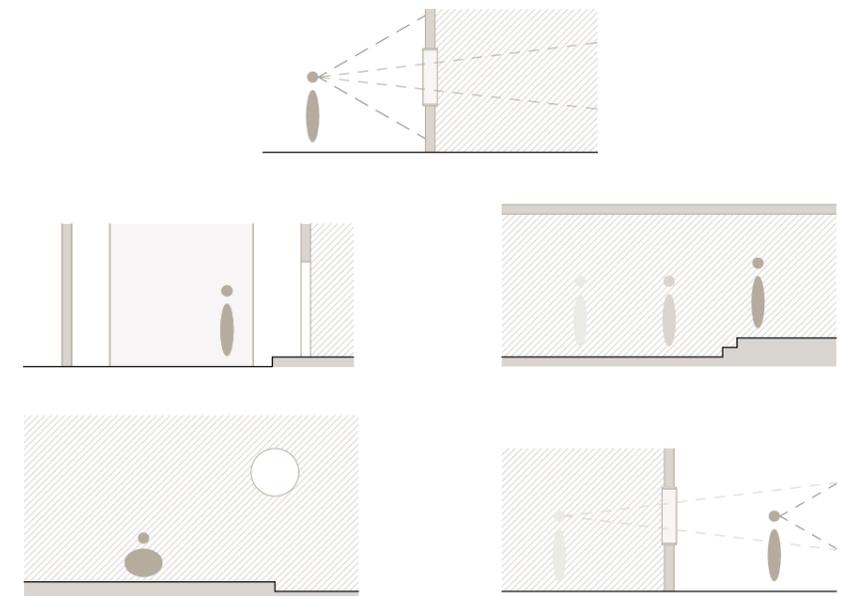
BAUKASTEN

- Boden
- Wand
- Decke
- Dach
- Öffnung
- Oberfläche



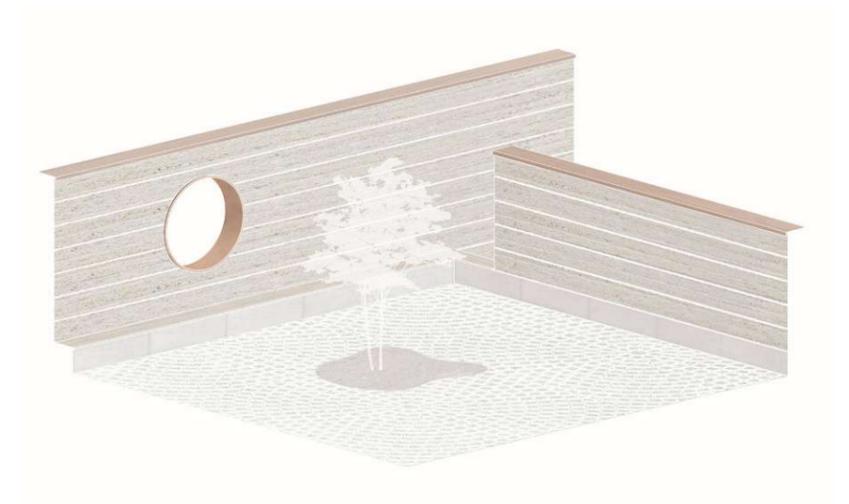
EINZELNE FRAGMENTE

- Begegnen
- Ankommen
- Durchschreiten
- Verweilen
- Verabschieden



Im folgenden Abschnitt werden verschiedene Situationen, Atmosphären und Stimmungen erzeugt, die jedoch alle das Ziel haben, einen Raum erlebbar zu machen. Diese Fragmente sind Bestandteil einer Geschichte, die das Durchschreiten einer Abfolge von Lehmräumen beschreibt. Themenschwerpunkte sind die Begriffe „Begegnen“, „Ankommen“, „Durchschreiten“, „Verweilen“ und „Verabschieden“.

Beispiel eines Fragments



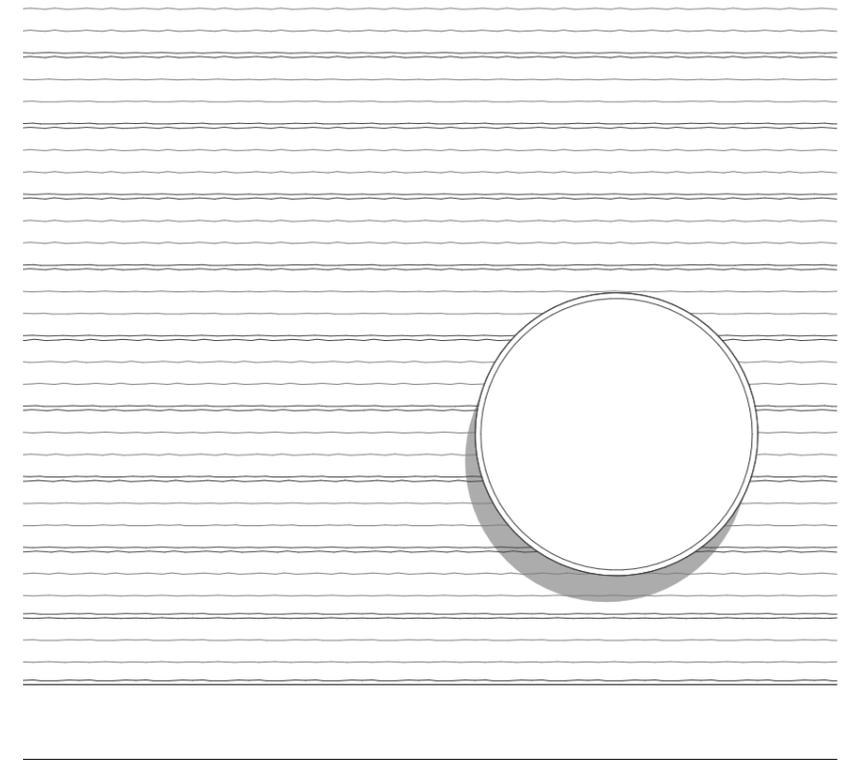
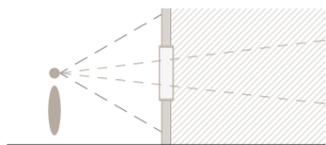
BEGEGNEN

Eine massive Lehmwand stellt sich uns in den Weg. Der Fuß dieser Wand besteht aus einem Betonsockel, welcher den Lehm vor aufsteigender Bodenfeuchtigkeit, sowie vor Schlagregen schützt. Den oberen Abschluss bildet eine einfache Blechabdeckung.

Miteingestampfte Trasskalkleisten bremsen die Fließgeschwindigkeit des Regenwassers an der Außenhaut und regulieren in Folge das Auswaschen der feinen exponierten Lehmschichten. Durch die horizontale Anordnung der Leisten, lässt sich die Wand in einzelne Schichten gliedern, wobei ihr leichtes Hervortreten das Fassadenbild prägt. Die natürlichen Wandeinschlüsse sorgen, in Verbindung mit seitlich einfallendem Licht, für eine lebhaftere Erscheinung.

Die waagrechte Linienführung lenkt den Blick weiter entlang des Volumens. Eine runde Öffnung unterbricht nun die sonst geschlossen wirkende Fassade. Dieses Fenster wird von einem stabilen Rahmen aus Metall gefasst. Er springt leicht aus der Ebene hervor und hebt sich durch die kupferfarbene Optik vom Rest der Wand ab. Einblicke und Ausblicke sind durch dieses Auge möglich.

Dahinter verbirgt sich jedoch kein Innenraum, sondern vielmehr eine zweite Wand mit halboffen stehender Tür. Der fragmentarische Blick erzeugt Spannung, weckt Neugierde und lässt Raum für Interpretation. Eine Einladung, aber keine Aufforderung.





vgl. Teil 1 Studie, 03 Baukastensystem:
Sockel S. 82, Wand S. 96, Öffnung S. 124

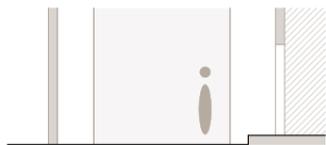
ANKOMMEN

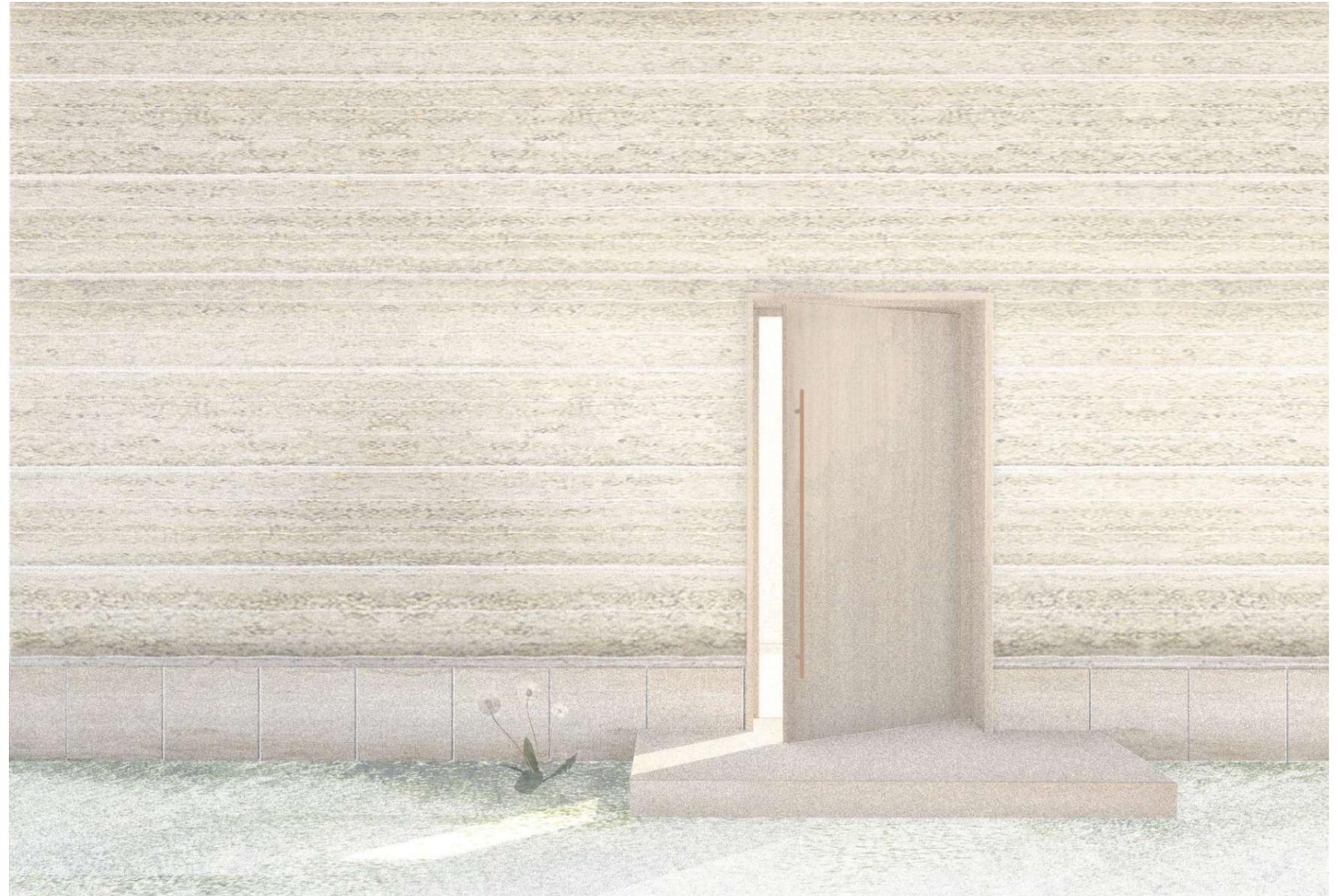
Wir befinden uns vor einer weiteren Wand aus Stampflehm. Die Oberflächen sind fast ident zur vorherigen. Man kann auf ihr ebenfalls den Unterschied der einzelnen Lehm- und Trasskalkschichten an der Außenhaut wahrnehmen. Einzig der Sockel unterscheidet sich aufgrund der vorgehängten Natursteinplatten, die ihn vor äußeren Einflüssen schützen sollen, von der ersten Mauer.

Sie bilden einen bewussten Übergang zur Erde und weichen aufgrund der unterschiedlichen Farblichkeit und Haptik vom Rest der Wand ab.

Mittig vor uns sehen wir eine halboffen stehende Tür, die einen Einblick in das helle Innere zulässt. Sie sitzt tief in der Lehmmauer und wird von einer dicken Laibung aus Holz umrahmt. Unmittelbar vor dem Eingang befindet sich eine einzelne massive Stufe, welche die Geste des Eintretens und des Ankommens hervorhebt. Durch den Spalt dringt Licht nach außen. Es zeichnet sich sowohl am Boden, als auch am Podest ab und lenkt den Blick vom Außenraum in den Innenraum, wodurch die Schwelle und der Moment des Übergangs auch visuell hervorgehoben werden.

Wir öffnen die Tür und treten ein.





vgl. Teil 1 Studie, 03 Baukastensystem:
Sockel S. 82, Wand S. 96 (Beispielschnitt I), Öffnung S. 124

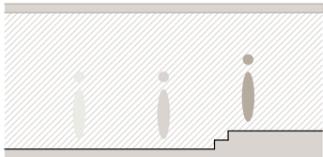
DURCHSCHREITEN

Wir erblicken den Innenraum eines Gebäudes. Natürliches Licht strömt von links in den Raum. Es wirkt weich, diffus und hebt gezielt die Beschaffenheit der Materialien hervor. Am Boden sind, neben den markanten Fugen am Übergang zur Wand, einige kleine Abnutzungsspuren zu erkennen, welche nicht störend, sondern vielmehr lebhaft erscheinen.

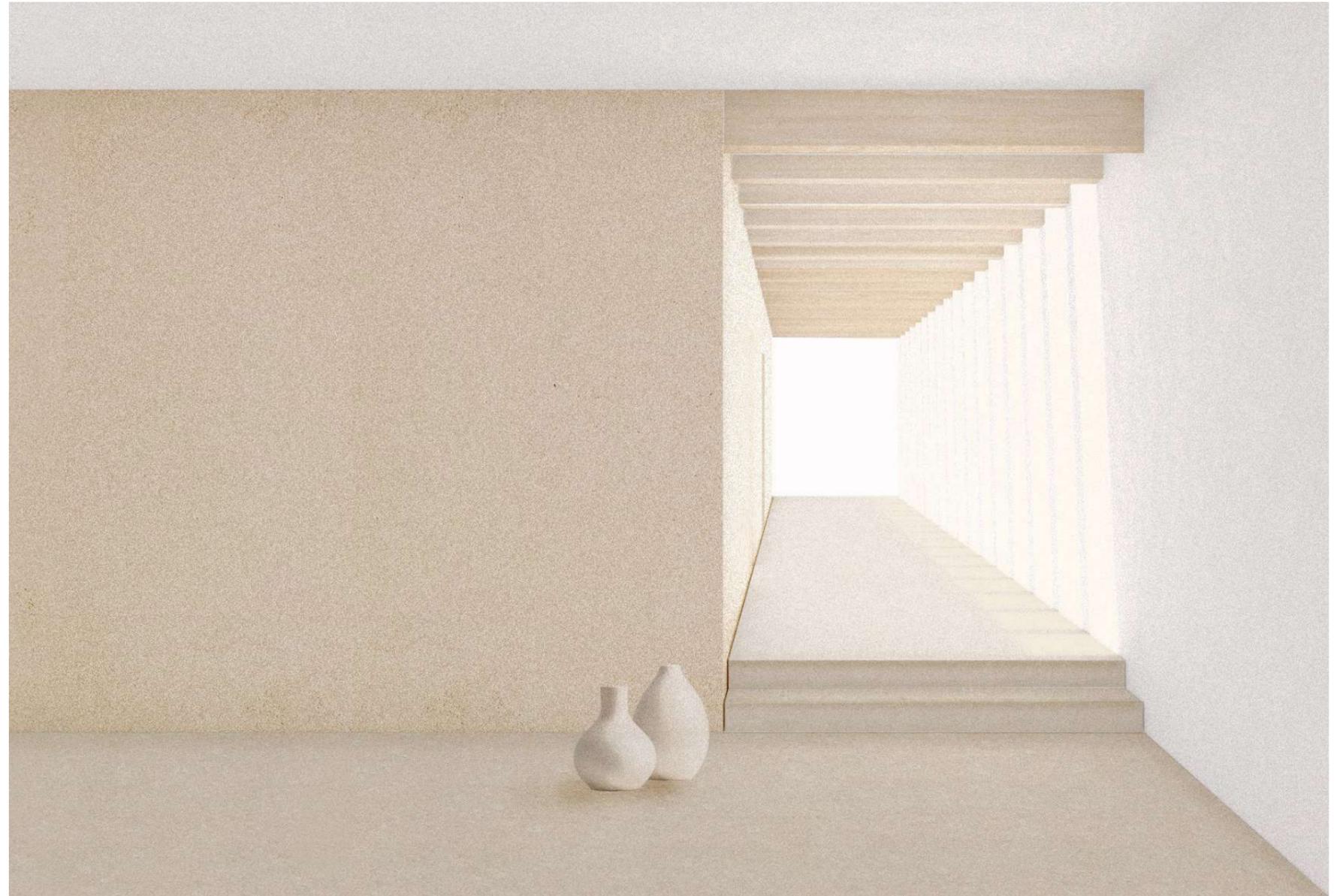
Der Blick wandert vom Boden über angedeutete Stufen nach oben zur Decke, wo sichtbare Holzbalken die tragende Deckenkonstruktion bilden. Da Lehm nicht überspannen kann, wird er folglich nicht nur statisch, sondern auch gestalterisch vom Holz ergänzt. Die warmen und erdigen Farbtöne erzeugen eine ruhige und natürliche Stimmung im Raum. Das einfallende Licht wird von den Oberflächen absorbiert, weich gestreut und harmonisiert mit der Farbe des Lehms. Das Material und seine Ehrlichkeit werden betont.

Wir folgen dem Licht in den angrenzenden Raumabschnitt und blicken auf einen Gang. Durch die Anordnung der Holzbalken lässt sich der Raum in der Vertikalen öffnen. Die regelmäßigen Abstände in der Konstruktion erzeugen ein Wechselspiel aus Licht und Schatten, wodurch der Raum rhythmisch inszeniert wird.

Ein weiteres Merkmal sind die Stufen aus Stampflehm. In ihre Vorderkanten sind Keile aus Trasskalk eingearbeitet, die die Festigkeit erhöhen. Unser Schritttempo verlangsamt sich beim Überwinden, wodurch uns der Niveausprung bewusst wird. Am Ende des Ganges zeichnet sich eine Öffnung ab. Wir gehen weiter.



vgl. Teil 1 Studie, 03 Baukastensystem:
Boden S. 82, Stufen S. 94, Decke S. 114, Oberfläche S. 132



vgl. Teil 1 Studie, 03 Baukastensystem:
Boden S. 82, Stufen S. 94, Decke S. 114, Oberfläche S. 132

VERWEILEN

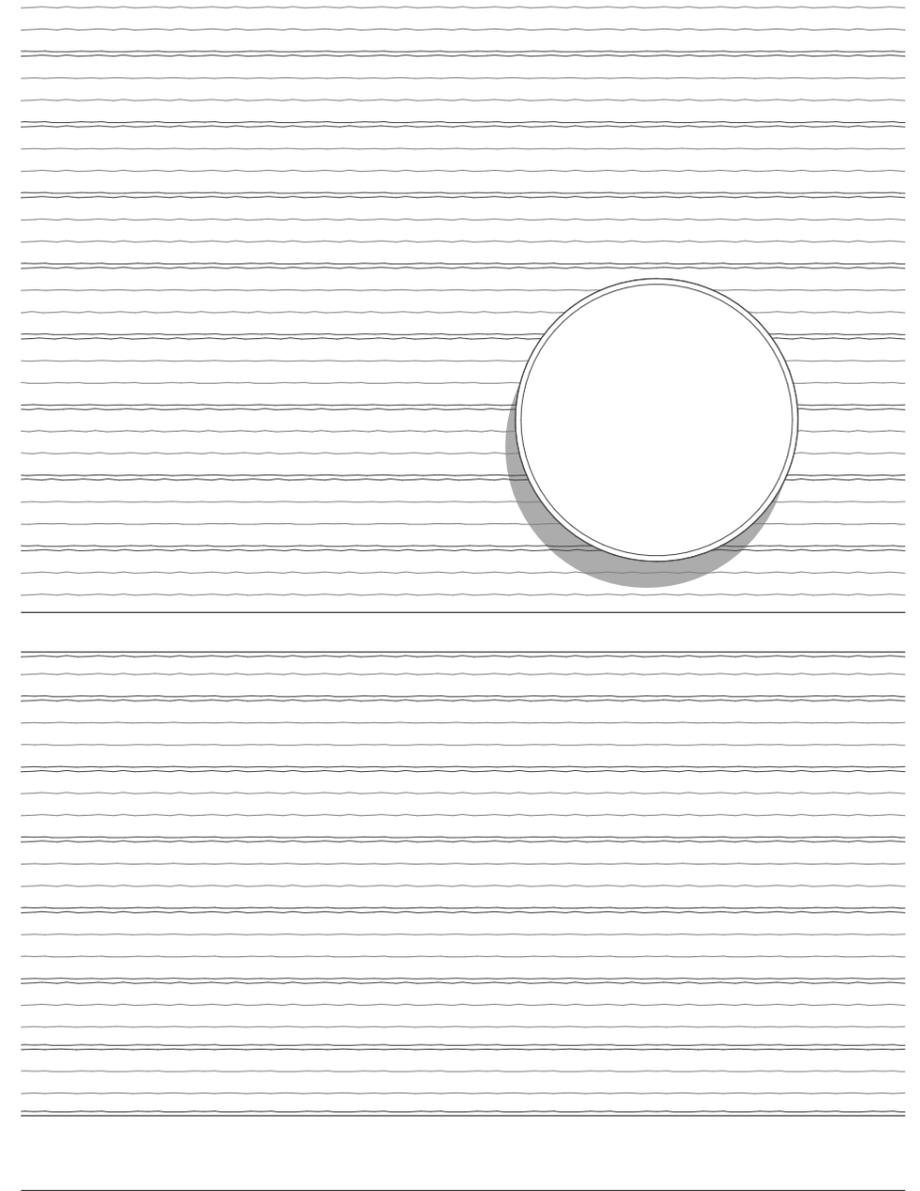
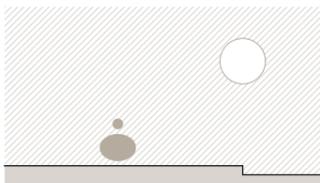
Nach dem Eintreten und dem ersten Orientieren eröffnet sich ein Innenraum, der durch verschiedene Lehmoberflächen und dem Wechsel von Licht und Schatten geprägt ist. Die Decke und der Boden sind durch mehrere Höhenversprünge gegliedert. Die gestaffelten Ebenen definieren unterschiedliche Zonen innerhalb des Raumes.

Ein wesentliches Gestaltungselement ist die runde Wandöffnung auf der rechten Seite, durch die natürliches Licht eindringen kann. Der daraus resultierende Lichtkegel wandert im Laufe des Tages über die Wände, den Boden und die Stufen, wodurch die unterschiedlichen Ebenen und Oberflächen des Raumes akzentuiert werden.

Das runde Auge ist oberhalb der gewöhnlichen Blickhöhe positioniert, was eine Hierarchie im Raum schafft und zusätzlich die Vertikalität betont. Der Außenraum wird nicht gezeigt. Es bleibt nur der Blick in den Himmel.

Im gesamten oberen Bereich des Raumes unterteilt ein umlaufender Ringanker aus Beton die Wände. Dieser nimmt einerseits die horizontal auftretenden Lasten auf und betont andererseits die Mehrgeschossigkeit des Volumens.

Wir setzen uns und sehen uns um.





vgl. Teil 1 Studie, 03 Baukastensystem:
Boden S. 82, Stufen S. 94, Wand S. 96 (Beispielschnitt 2), Decke S. 114, Öffnung S. 124,
Oberflächen S. 132

VERABSCHIEDEN

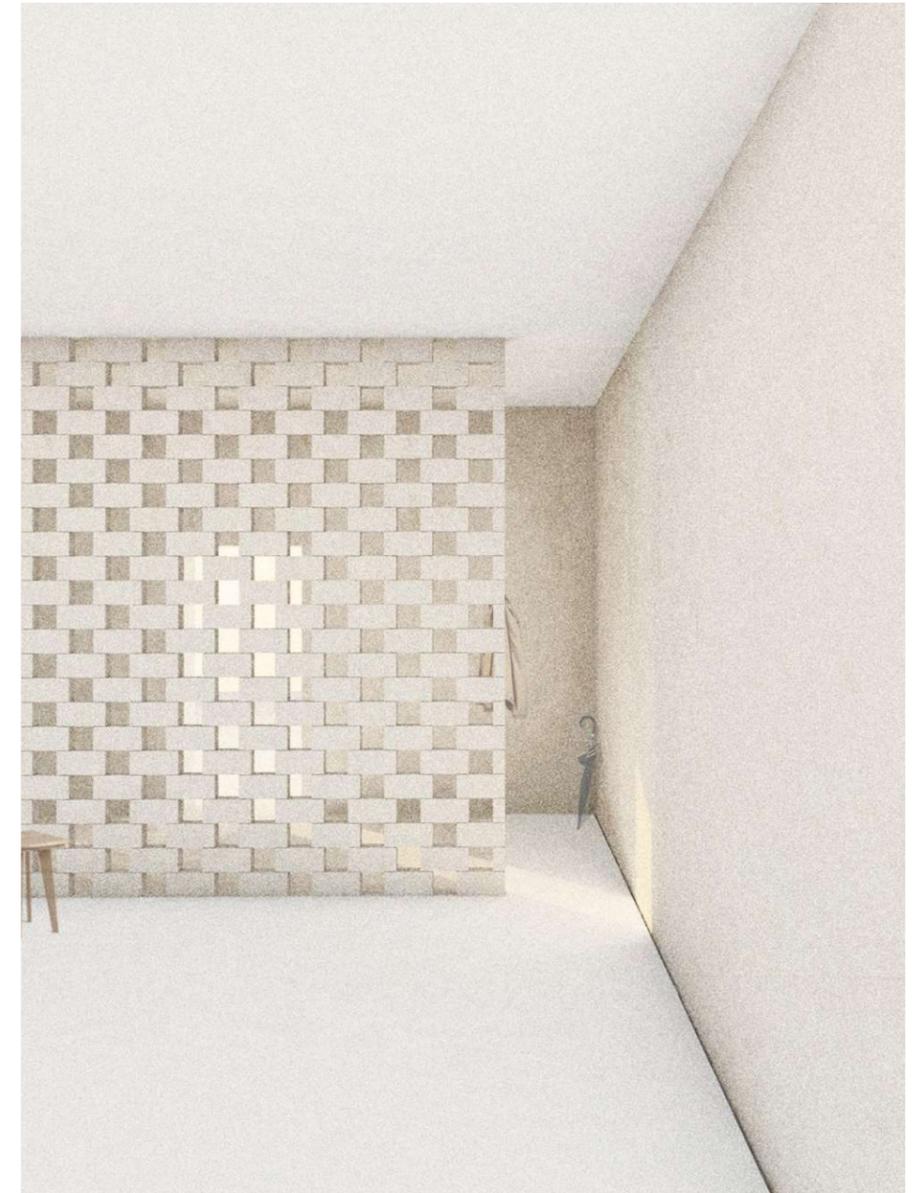
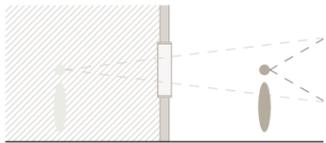
Nach einer kurzen Rast machen wir uns wieder auf den Weg und gelangen in den nächsten Raum.

Eine Wand aus Lehmsteinen tritt in Erscheinung. Auf der rechten Seite öffnet sich die Wand in Form eines raumhohen Durchganges. Die lockere Setzung der Steine ergibt ein Filtermauerwerk, das den Durchblick trennt, jedoch nicht vollständig verschließt.

Dosiertes Licht dringt durch die dahinterliegende Öffnung in den Raum und gibt somit wieder die Richtung und Orientierung vor. In den Zwischenräumen des Mauerwerks zeichnet sich ein Weg ins Freie ab. Es führt den Blick durch die perforierte Struktur hindurch, verzichtet auf einen klaren Bruch im Übergang von Innen nach Außen und wird folglich zu einem prägendem Element des Raumes.

Das Verlassen des Innenraumes geschieht nicht plötzlich, denn das Licht und die Architektur bereiten uns darauf vor. Sowohl die räumliche Verengung der Wandöffnung, als auch die gezielte Lichtführung dienen als Schwelle und bewirken durch die Verlangsamung des Schrittempos einen bewusst erlebbaren Übergang.

Wir treten nun aus dem Innenraum heraus und gewöhnen uns langsam an die Änderung der Lichtverhältnisse.



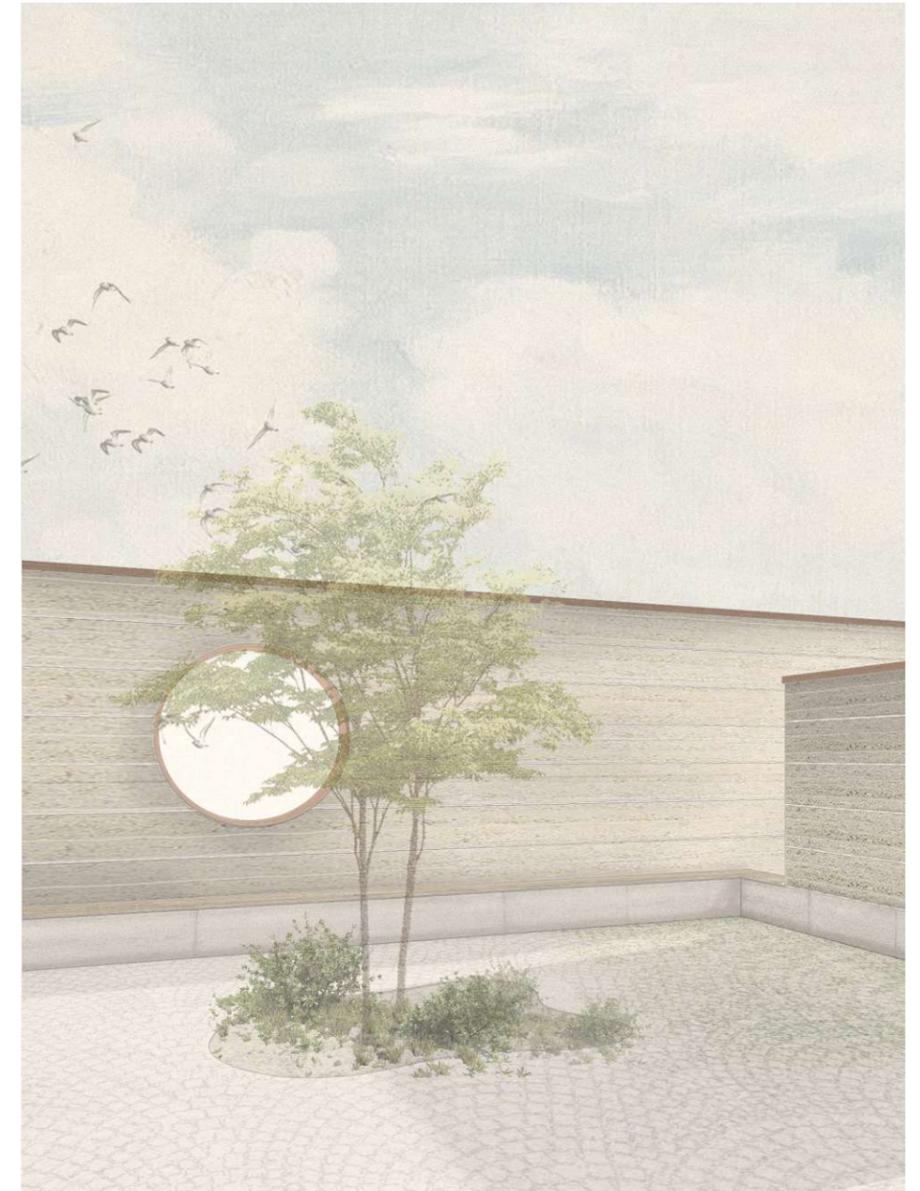
vgl. Teil 1 Studie, 03 Baukastensystem:
Boden S. 82, Wand S. 96, Oberflächen S. 132

Der Außenraum wird von zwei Wänden aus Lehm zu einem Hof gefasst. In seiner Mitte stehen mehrere junge Bäume, die trotz ihrer geringen Größe Schatten spenden. Zwischen den Fugen der Pflastersteine durchdringen vereinzelt Grasbüschel das Muster und begrünen zusätzlich die Fläche des Hofes.

Der Betonsockel der leicht erhöhten Lehmwand ist etwas breiter ausgeführt als eigentlich notwendig, sodass neben der Wand auch noch eine einfache hölzerne Sitzbank auf ihm Platz findet.

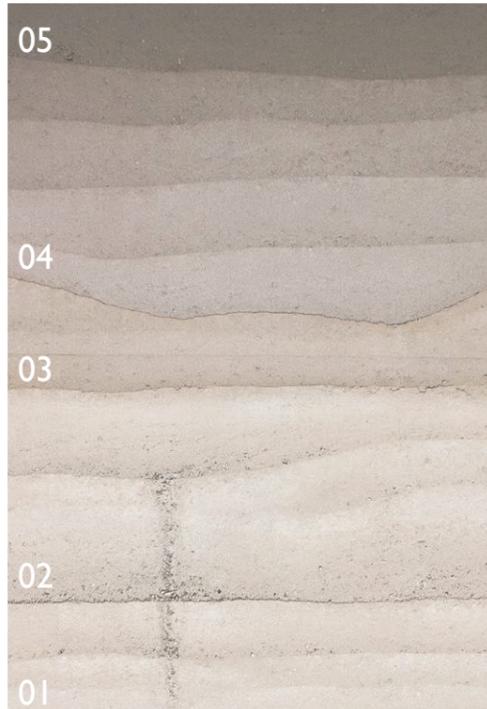
Eine runde Öffnung in der Wand erinnert uns an die erste Begegnung mit dem Volumen und an den Anblick, der in uns die Neugierde und Drang des Durchschreitens weckte. Dieses Mal wandert das Auge jedoch von Innen nach Außen.

Nach dem letzten Blick durch das runde Fenster, setzen wir uns auf die Bank und lassen die gesammelten Eindrücke nachwirken.



vgl. Teil 1 Studie, 03 Baukastensystem:
Sockel S. 82, Wand S. 96, Öffnung S. 124

Abb.94: Facade, Aerecura
Earth Rammed Builders



05 CONCLUSIO

Resümee und Wunsch für die Zukunft.

CONCLUSIO

Im aktuellen Kontext spielt das Bauen mit Lehm eine wichtige Rolle im Hinblick auf den Klimawandel und der Knappheit an Ressourcen. In meiner Arbeit zeige ich, dass Lehm nicht nur in der Vergangenheit genutzt wurde, sondern auch ein relevanter Baustoff der Zukunft sein kann. Als Mono-Material oder als hybride Konstruktion bietet das Bauen mit Lehm eine ökologische Alternative zu den konventionellen Baustoffen. Im ersten Teil meiner Arbeit verdeutlicht die Analyse die positiven Eigenschaften des Baustoffes und beschreibt die Vielzahl an aktuellen Einsatzmöglichkeiten. Folglich habe ich mich im konzeptuellen Teil mit der Wirkung und den Qualitäten von Lehm in Innen- und Außenräumen beschäftigt. Anhand räumlicher Fragmente habe ich Atmosphären erzeugt und versucht diese mittels des Durchschreitens von Räumen erlebbar zu machen.

Eine große Hilfe beim Erstellen dieser Eindrücke war der Besuch des Büros bzw. Werkshalle von LehmTonErde in Schlins, Vorarlberg, bei dem ich die Fertigungsprozesse vom Kamin bis zum Stampfen der Fertigteile beobachten durfte.

Weiters konnte ich beim Lehmbaumodul in Niedersulz einiges über die Zusammensetzung und Herstellung von Lehmziegel, Lehmputzen und Lehmoberflächen erfahren.

Im Hinblick auf die Zukunft des Bauens würde ich mir wünschen, dass die Bedeutung des Lehms weiter zunimmt, denn nicht immer ist ein Schritt zurück zu traditionellen Materialien auch ein Rückschritt in der Forschung.

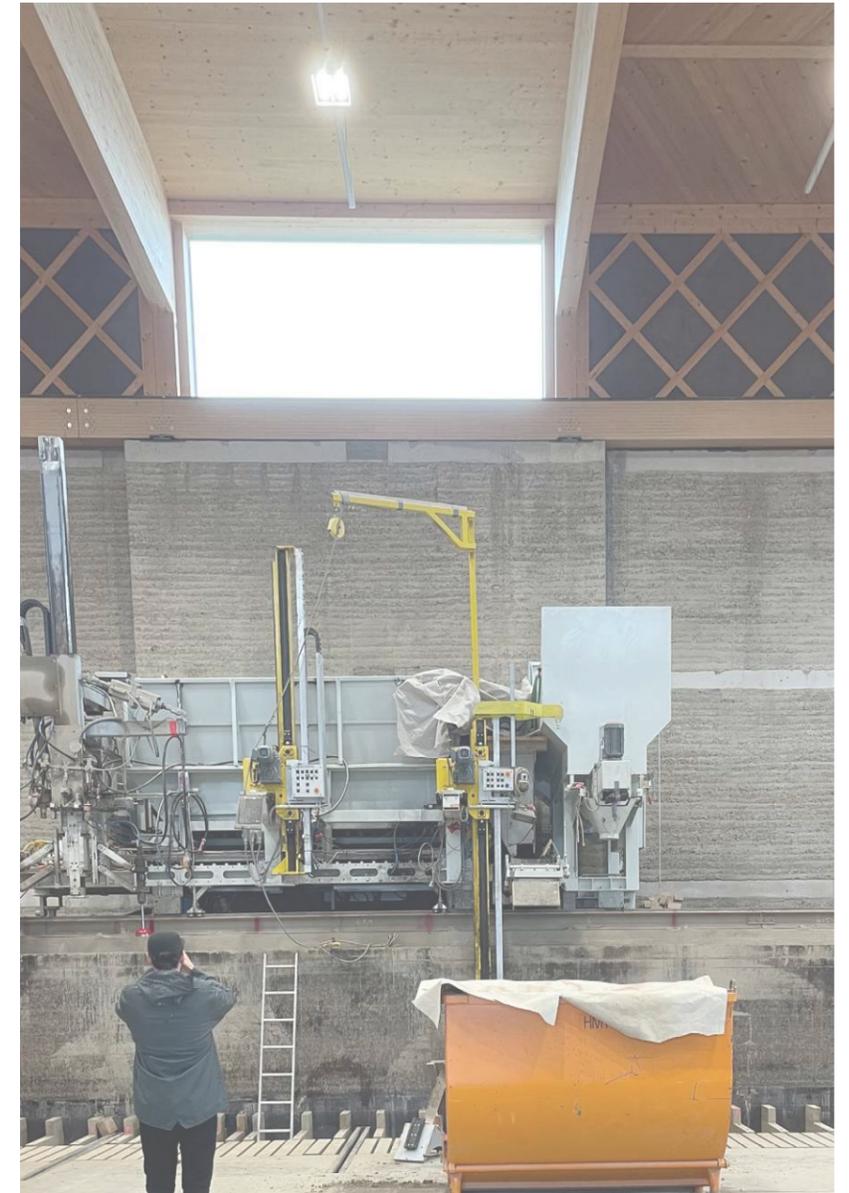


Abb.95: Stampfroboter der Werkshalle in Schlins, Vorarlberg

LITERATUR

MINKE, Gernot: Handbuch Lehmbau, Baustoffkunde - Techniken - Lehmar-chitektur, 10. überarbeitete Auflage, Rastede (Ökobuch Verlag GmbH) 2022

ROEHLEN, Ulrich / **ZIEGERT**, Christof: Lehmbau-Praxis, Planung und Aus-führung, Berlin (Bauwerk Verlag GmbH) 2010

KAPFINGER, Otto / **SAUER**, Marko: Martin Rauch, Gebaute Erde, Gestalten und Konstruieren mit Stampflehm, korrigierte und erweiterte Auflage, München (DETAIL Business Information GmbH) 2022

LEHNER, Erich: Elementare Architektur, Traditionen des Bauens ins außer-europäischen Kulturen, 2. Auflage, Wien (IVA-Verlag) 2016

DETHIER, Jean: Lehmbau Kultur, Von den Anfängen bis heute, München (DETAIL Business Information GmbH) 2019

VOLHARD, Franz: Bauen mit Leichtlehm, Handbuch für das Bauen mit Holz und Lehm, 7. neubearbeitete und ergänzte Auflage, Wien (Springer-Verlag) 2021

BOLTSHAUSER, Roger / **VEILLON**, Cyril / **MAILLARD**, Nadja (Hg.): Pisé. Stampflehm - Tradition und Potenzial, 2. Auflage, Zürich (Triest Verlag GmbH) 2020

SCHROEDER, Horst: Lehmbau, Mit Lehm ökologisch planen und bauen, 2. überarbeitete Auflage, Wiesbaden (Springer Vieweg Verlag) 2013

HEBEL, Dirk / **WAPPNER**, Ludwig: Sortenrein Bauen - Methode, Material, Konstruktion, erste Auflage, München (DETAIL Business Information GmbH) 2023

SCHUMACHER, E.F.: Die Rückkehr zum menschlichen Maß „Small is beau-tiful“. Rohwolt Verlag, Hamburg, 1977

ONLINEQUELLEN

2022 United Nations Environment Programme, 2022 Global Status Re-port for Buildings and Construction, https://globalabc.org/sites/default/files/2022-11/FULL%20REPORT_2022%20Buildings-GSR_1.pdf (letzter Zugriff: 08. Mai 2025)

GeoSphere Austria, Klimafakten Österreich

<https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klimaeubersichten/klimamittel-1971-2000> (letzter Zugriff: 08. Mai 2025)

Netzwerk Lehm - Fachverband zur Förderung des Lehmbaus sowie zur Vernetzung von Lehmbauschaaffenden in Österreich, Geschichte des Lehm-baus, <https://netzwerklehm.at/lehm/geschichte/> (letzter Zugriff: 08. Mai 2025)

Netzwerk Lehm - Fachverband zur Förderung des Lehmbaus sowie zur Vernetzung von Lehmbauschaaffenden in Österreich, Lehmbautechniken, <https://netzwerklehm.at/lehm/bautechniken/> (letzter Zugriff: 08. Mai 2025)

materialarchiv.ch, KB, Wellerlehm, 2014, https://materialarchiv.ch/de/ma:materi-al_1503?type=all&n=Anhang (letzter Zugriff: 08. Mai 2025)

hausinfo, Architektur-Reportage: Konsequenz ökologisch, <https://hausinfo.ch/de/bauen-renovieren/haus-planen/haustypen/architektur-neubauten/deitingen-konsequenz-oe-kologisch.html> (letzter Zugriff: 08. Mai 2025)

Stern Zürich Architekten, Projekt Lehmhaus, 2019, <https://www.szarc.ch/de/projekte/lehmhaus> (letzter Zugriff: 08. Mai 2025)

Bauverlag BV GmbH, Ausloten was geht, 2024, <https://www.dbz.de/artikel/aus-loten-was-geht-4169617.html> (letzter Zugriff: 08. Mai 2025)

gbl tuwien, Martin Rauch - Stampflehm vorfertigung Neue Perspektiven, 2020, https://www.youtube.com/watch?v=_ukhFTBHToc (letzter Zugriff: 08. Mai 2025)

TU Braunschweig, Konstruktiver Ungehorsam: die Holz-Lehm-Decke und HORTUS., 2022, <https://constructive-disobedience.com/die-holz-lehm-decke-und-hortus/> (letzter Zugriff: 08. Mai 2025)

Hoppe, Lehmlabor „Gesteuerte Erosion“, 2023, <https://www.lehmlabor.de> (letzter Zugriff: 08. Mai 2025)

Loos, „Aber suche den grund der form auf“, Gedanken von Adolf Loos, 1909, S.73 https://www.zobodat.at/pdf/nat-land_1980_3_0070-0074.pdf (letzter Zugriff: 08. Mai 2025)

ABBILDUNGEN

Abb.01: Stampflehm, Eigenes Foto, Vorarlberg, 2024

Abb.02: Facade, Aerecura Rammed Earth Builders, Foto: Riley Snelling, courtesy of Stone's Throw Design

Abb.03: Stadt Shibam, Jemen, Hochhäuser aus Lehm, Foto: Lutz Jäkel, 2018

Abb.04: Bezeichnung der Baulehme nach Bindekraft, VOLHARD, Franz: Bauen mit Leichtlehm, Handbuch für das Bauen mit Holz und Lehm, 7. neubearbeitete und ergänzte Auflage, Wien (Springer-Verlag) 2021, S.45

Abb.05: Vergleich der Korngrößen, Eigene Darstellung nach: VOLHARD, Franz: Bauen mit Leichtlehm, Handbuch für das Bauen mit Holz und Lehm, 7. neubearbeitete und ergänzte Auflage, Wien (Springer-Verlag) 2021, S.42

Abb.06: Unterschiedliche Konsistenzen der Tonpartikel, Eigene Darstellung nach: VOLHARD, Franz: Bauen mit Leichtlehm, Handbuch für das Bauen mit Holz und Lehm, 7. neubearbeitete und ergänzte Auflage, Wien (Springer-Verlag) 2021, S.42

Abb.07: Wiedenbrück. Erdschichten in einer Lehmgrube, Nähe Emssee, Foto: Kaspar1892, 2009

Abb.08: Achterlingtest, Foto: ZRS Architekten Ingenieure, Berlin (link: <https://www.zrs.berlin/project/eignungspruefung-von-baulehm/>)

Abb.09: Form zur Herstellung einer Lehmprobe, Foto: ZRS Architekten Ingenieure, Berlin (link: <https://www.zrs.berlin/project/eignungspruefung-von-baulehm/>)

Abb.10: „Lager der Götter“, Ägypten, Foto: Public Domain (link: <https://www.biblicalarchaeology.org/daily/ancient-cultures/ancient-egypt/pha-raohs-brick-makers/>)

Abb.11: Chan Chan, Peru, Foto: Phima Voyages, (link: <https://www.phima-voyages.com/de/chan-chan-nordkueste-peru/>)

Abb.12: Huaca del Sol, Peru, Foto: Mónica, 2020 (link: <https://www.denomades.com/blog/huacas-sol-luna/>)

Abb.13: Taos Pueblo, USA, Foto: David Muench (link: <https://whc.unesco.org/en/list/492/gallery/>)

Abb.14: Lehmvorkommen weltweit, Eigene Darstellung nach: DETHIER, Jean: Lehm bau Kultur, Von den Anfängen bis heute, München (DETAIL Business Information GmbH) 2019, S. 26f

Abb.15: Umfassungsmauern in Alhambra, Spanien, Foto: Wikipedia Commons gemeinfrei

Abb.16: Lehmhaus mit sechs Stockwerken, Deutschland, Foto: Gerold Rosenberg, (link: <https://www.kuladig.de/Objektansicht/KLD-306522>)

Abb.17: Zeichnungen aus „École d'architecture rurale“, Francois Cointeraux, 1793, Frankreich, (link: <https://drawingmatter.org/francois-cointeraux-the-architect-of-the-agricultural-proletariat/>)

Abb.18: Kellergasse von Raschala, NÖ, Foto: Marina Graser (link: <https://netzwerk-lehm.at/lehmbau/kellergasse-raschala/>)

Abb.19: Lehmwuzelmauer mit Bruchsteinsockel, NÖ, Foto: Feiglstorfer, Hubert/Meingast, Roland/Ottner, Franz (link: <https://memo.imareal.sbg.ac.at/wsarticle/memo/2023-feiglstorfer-et-al-lehmbau-ostoesterreich/>)

Abb.20: Lehm-Pfostenkonstruktion, NÖ, Foto: Feiglstorfer, Hubert/Meingast, Roland/Ottner, Franz (link: <https://memo.imareal.sbg.ac.at/wsarticle/memo/2023-feiglstorfer-et-al-lehmbau-ostoesterreich/>)

Abb.21: Lehmvorkommen Österreich, Eigene Darstellung nach: (link: <https://www.geologie.ac.at/en/research-development/mapping/commodities/clay>)

Abb.22: Haus Rauch, Schlins, Vorarlberg, 2010, Foto: Beat Bühler

Abb.23: Stiegenhaus im Haus Rauch, Schlins, Vorarlberg, 2010, Foto: Beat Bühler

Abb.24: Facade, Aerecura Rammed Earth Builders, Foto: Riley Snelling, courtesy of Stone's Throw Design

Abb.25: Grafik mit den zwölf relevantesten Lehm bautechniken, Eigene Darstellung nach: DETHIER, Jean: Lehm bau Kultur, Von den Anfängen bis heute, München (DETAIL Business Information GmbH) 2019, S. 30

Abb.26: Schalungen, Grafik: ITE (link: https://www.dbz.de/artikel/dbz_Robotische_Fabrikation_von_Bauteilen_aus_Stampflehm-3390495.html)

Abb.27: Schalungsroboter, Grafik: ITE (link: https://www.dbz.de/artikel/dbz_Robotische_Fabrikation_von_Bauteilen_aus_Stampflehm-3390495.html)

Abb.28: Stampflehm mit Sägeblättern, Eigenes Foto, Vorarlberg, 2024

Abb.29: Fugenbild einer historischen Stampflehm facade, Frankreich, Foto: Parc naturel régional Livradois-Forez (link: <https://www.parc-livradois-forez.org/preserve/architecture/le-pise/les-architectures-en-pise-du-parc/>)

Abb.30: Stampflehm facade, Haus Rauch, Schlins, Vorarlberg, 2010, Foto: Beat Bühler

Abb.31: Wellerlehm masse aus Baulehm und Stroh, Zürich, Foto: IG Lehm (link: <https://www.iglehm.ch/lehmbau/anwendung/massivbau>)

Abb.32: Abgestochene Mauer aus Wellerlehm, Zürich, Foto: IG Lehm (link: <https://www.iglehm.ch/lehmbau/anwendung/massivbau>)

Abb.33: Abstechen einer Wellerlehm mauer, Deitingen, 2010, Foto: ETH Material Hub

Abb.34: Innenansicht eines Wellerlehmbaus, Deitingen, 2010, Foto: ETH Material Hub

Abb.35: Außenansicht eines Wellerlehmbaus, Deitingen, 2010, Foto: Stefan Weber, Jens

Abb.36: Auflistung der Anwendungsklassen von Lehmsteinen, Eigene Darstellung nach Vorlage von: (link: <https://www.baunetzwissen.de/mauerwerk/fachwissen/mauersteine/lehmsteine-1628583>)

Abb.37: Schwerer stranggepresster Lehmstein, Foto: Claytec (link: <https://shop.claytec.at/produkt/lehmstein-gruenling-nf/>)

Abb.38: Verschiedene Formate von Lehmbausteinen, Eigene Darstellung nach: (link: <https://shop.claytec.at/produkt-kategorie/mauerwerk/>)

Abb.39: Fassadenkonzept, Meißen, 2022, Foto: Stern Zürich Architekten (link: <https://www.szarc.ch/de/projekte/lehmhaus>)

Abb.40: Herstellung eines Lehmmauerwerks, Meißen, 2022, Foto: Marco Zürich (link: <https://www.iglehm.ch/lehmbau/bauten/lehmsteinhaus-meissen-1>)

Abb.41: Tragende Mauer aus schweren Lehmsteinen, Meißen, 2022, Foto: Stern Zürich Architekten (link: <https://www.szarc.ch/de/projekte/lehmhaus>)

Abb.42: Stiegenhaus und Wohnungseingangstür mit gemauertem Sturz aus Lehmsteinen, Bad Aibling, Foto: Sebastian Schels (link: <https://www.dbz.de/artikel/ausloten-was-geht-4169617.html>)

Abb.43: Stiegenhaus und Stufen aus Konstruktionsvollholz, Bad Aibling, Foto: (link: <https://www.dabonline.de/architektur/einfach-bauen-ergebnisse-florian-nagler/>)

Abb.44: Tragende Innenwand mit Holzbalken zur optimalen Lastenverteilung, Bad Aibling, Foto: Sebastian Schels (link: <https://www.dbz.de/artikel/ausloten-was-geht-4169617.html>)

Abb.45: Tragende Innenwand aus schweren Lehmsteinen, Bad Aibling, Foto: ZRS Architekten Ingenieure (link: <https://www.zrs.berlin/project/erarbeitung-der-norm-fuer-tragendes-lehmsteinmauerwerk-din-18940>)

Abb.46: Außenwand, Wohnhaus J, Volhard, 2012, Foto: Franz Volhard (link: <https://www.dabonline.de/bautechnik/lehmbau-holzbau-kombination-leichtlehm-fachwerk-bausteine-platten-daemmung/>)

Abb.47: Holzkonstruktion mit feuchter Leichtlehmausfachung, Foto: Natur Point Unger GmbH (link: <https://natuno.de/sortiment/oekodaemmung/in-nendaemmung>)

Abb.48-49: Außenwände/Innenwände mit feuchtem Einbau, Eigene Darstellung nach: VOLHARD, Franz: Bauen mit Leichtlehm, Handbuch für das Bauen mit Holz und Lehm, 7. neubearbeitete und ergänzte Auflage, Wien (Springer-Verlag) 2021, S.84f

Abb.50: Formate von Leichtlehmbausteinen, Eigene Darstellung

Abb.51: Formgeschlagener Leichtlehmstein, Foto: Claytec (link: <https://shop.claytec.at/produkt/lehmstein-leicht-1200-q1/>)

Abb.52: Ausfachungen, Eigene Darstellung nach: VOLHARD, Franz: Bauen mit Leichtlehm, Handbuch für das Bauen mit Holz und Lehm, 7. neubearbeitete und ergänzte Auflage, Wien (Springer-Verlag) 2021, S.143f

Abb.53: Arten von Leichtlehmmauerwerk, Eigene Darstellung nach: VOLHARD, Franz: Bauen mit Leichtlehm, Handbuch für das Bauen mit Holz und Lehm, 7. neubearbeitete und ergänzte Auflage, Wien (Springer-Verlag)

2021, S.143

Abb.54-55: Ausfachungen aus Leichtlehmsteinen im EG/OG, Wohnhaus J, Volhard, 2012, Foto: Franz Volhard (link: <https://www.dabonline.de/bautechnik/lehmbau-holzbau-kombination-leichtlehm-fachwerk-bausteine-platten-daemmung/>)

Abb.56: Facade, Aerecura Rammed Earth Builders, Foto: Riley Snelling, courtesy of Stone's Throw Design

Abb.57: Stampflehmwand mit Sockelzone, Eigenes Foto, Vorarlberg, 2024

Abb.58: Sockelausbildungen, Eigene Darstellung nach: MINKE, Gernot: Handbuch Lehm, Baustoffkunde - Techniken - Lehmarchitektur, 10. überarbeitete Auflage, Rastede (Ökobuch Verlag GmbH) 2022, S.124

Abb.59: Aufbau eines traditionellen Lehmfußbodens, Niemayr, Eigene Darstellung nach: MINKE, Gernot: Handbuch Lehm, Baustoffkunde - Techniken - Lehmarchitektur, 10. überarbeitete Auflage, Rastede (Ökobuch Verlag GmbH) 2022, S.134

Abb.60-61: Lehmböden/Oberflächebeschaffenheit, Eigene Darstellung nach: KAPFINGER, Otto / SAUER, Marko: Martin Rauch, Gebaute Erde, Gestalten und Konstruieren mit Stampflehm, korrigierte und erweiterte Auflage, München (DETAIL Business Information GmbH) 2022, S. 58f, 62

Abb.62: Stampflehmfußboden, Schlins, Vorarlberg, Foto: Albrecht Schnabel

Abb.63: Fußbodenaufbauten, Eigene Darstellung nach: KAPFINGER, Otto / SAUER, Marko: Martin Rauch, Gebaute Erde, Gestalten und Konstruieren mit Stampflehm, korrigierte und erweiterte Auflage, München (DETAIL Business Information GmbH) 2022, S. 63f

Abb.64: Treppe aus Stampflehm, Eigene Darstellung nach: KAPFINGER, Otto / SAUER, Marko: Martin Rauch, Gebaute Erde, Gestalten und Konstruieren mit Stampflehm, korrigierte und erweiterte Auflage, München (DETAIL Business Information GmbH) 2022, S. 65

Abb.65: Eingefärbte Lehmfußböden mit geschliffener Oberfläche, Foto: Claytec (link: <https://claytec.de/produkt/lehm-terrazzo/>)

Abb.66: Außenwand aus Stampflehm, Eigenes Foto, Vorarlberg, 2024

Abb.67: Beispielschnitt einer Stampflehmwand mit Innendämmung im OG, Eigene Darstellung nach: HEBEL, Dirk / WAPPNER, Ludwig: Sortenrein Bauen - Methode, Material, Konstruktion, erste Auflage, München (DETAIL Business Information GmbH) 2023, S. 211

Abb.68: Liniengrafik und Ansicht, Eigene Darstellung

Abb.69: Beispielschnitt einer Stampflehmwand aus vorgefertigten Elementen mit Kerndämmung, Eigene Darstellung nach: HEBEL, Dirk / WAPPNER, Ludwig: Sortenrein Bauen - Methode, Material, Konstruktion, erste Auflage, München (DETAIL Business Information GmbH) 2023, S. 214

Abb.70: Liniengrafik und Ansicht, Eigene Darstellung

Abb.71: Beispielschnitt einer vorgefertigten Hybridfassade aus Lehm und

Holz, Eigene Darstellung

Abb.72: Liniengrafik und Ansicht, Eigene Darstellung

Abb.73: Beispielschnitt eines Fachwerks mit Leichtlehmausfachung und Natursteinsockel, Eigene Darstellung nach: HEBEL, Dirk / WAPPNER, Ludwig: Sortenrein Bauen - Methode, Material, Konstruktion, erste Auflage, München (DETAIL Business Information GmbH) 2023, S. 218

Abb.74: Liniengrafik und Ansicht, Eigene Darstellung

Abb.75: Traditionelle Methoden zur Herstellung von Lehm-Holz-Decken, Eigene Darstellung nach: MINKE, Gernot: Handbuch Lehm- und Baustoffkunde - Techniken - Lehmarchitektur, 10. überarbeitete Auflage, Rastede (Ökobuch Verlag GmbH) 2022, S.133

Abb.76: Neuere Methoden zur Herstellung von Decken aus Lehm, Eigene Darstellung nach: MINKE, Gernot: Handbuch Lehm- und Baustoffkunde - Techniken - Lehmarchitektur, 10. überarbeitete Auflage, Rastede (Ökobuch Verlag GmbH) 2022, S.132

Abb.77: Schnitt und Axonometrie von vorgefertigten Deckenelementen, Eigene Darstellung nach: ZPF Ingenieure (link: <https://constructive-disobedience.com/die-holz-lehm-decke-und-hortus/>)

Abb.78: Traditionelle Methoden zur Herstellung von Lehm-Holz-Dächer, Eigene Darstellung nach: VOLHARD, Franz: Bauen mit Leichtlehm, Handbuch für das Bauen mit Holz und Lehm, 7. neubearbeitete und ergänzte Auflage, Wien (Springer-Verlag) 2021, S. 121f

Abb.79: Traditionelle Methoden zur Herstellung von Lehm-Holz-Dächer, Eigene Darstellung nach: VOLHARD, Franz: Bauen mit Leichtlehm, Handbuch für das Bauen mit Holz und Lehm, 7. neubearbeitete und ergänzte Auflage, Wien (Springer-Verlag) 2021, S. 152f

Abb.80-86: Öffnungen, Eigene Darstellungen nach: KAPFINGER, Otto / SAUER, Marko: Martin Rauch, Gebaute Erde, Gestalten und Konstruieren mit Stampflehm, korrigierte und erweiterte Auflage, München (DETAIL Business Information GmbH) 2022, S. 94f

Abb.87: Erosion einer Lehmwand, Eigene Darstellungen nach: KAPFINGER, Otto / SAUER, Marko: Martin Rauch, Gebaute Erde, Gestalten und Konstruieren mit Stampflehm, korrigierte und erweiterte Auflage, München (DETAIL Business Information GmbH) 2022, S. 72

Abb.88: Ansicht einer erodierten Stampflehmwand, Haus Rauch, Schlins, Vorarlberg, 2010, Foto: Beat Bühler

Abb.89: Fortschreitende Erosion, Eigene Darstellung nach: KAPFINGER, Otto / SAUER, Marko: Martin Rauch, Gebaute Erde, Gestalten und Konstruieren mit Stampflehm, korrigierte und erweiterte Auflage, München (DETAIL Business Information GmbH) 2022, S. 75

Abb.90: Mock-Up der RWTH Aachen, Foto: Lehrstuhl Baukonstruktion, RWTH Aachen, 2022 (link: <https://www.lehmlabor.de>)

Abb.91: Lehmputz, Kolumba Museum, Köln, 2007, Foto: Claytec (link: <https://shop.claytec.at/kolumba-museum/>)

Abb.92: Lehminnenputz, Haus ohne Beton, NÖ, 2020, Foto: Romana Fürnkranz (link: <https://www.andibreuss.at/projekt/haus-ohne-beton-2020>)

Abb.93: Facade, Aerecura Rammed Earth Builders, Foto: Riley Snelling, courtesy of Stone's Throw Design

Abb.94: Facade, Aerecura Rammed Earth Builders, Foto: Riley Snelling, courtesy of Stone's Throw Design

Abb.95: Stampfroboter der Werkshalle in Schlins, Eigenes Foto, Vorarlberg, 2024

Alle weiteren Darstellungen, Grafiken und Fotobearbeitungen wurden vom Verfasser erstellt.

Sämtliche Abbildungen wurden zuletzt am 06. Mai 2025 aufgerufen.

DANKE

an Senior Scientist Arch. Dipl.-Ing. Günter Pichler.
Für Betreuung und Fachwissen.

an Mama und Papa.
Für eure Unterstützung und Zuspruch.

an meine Geschwister.
Für die willkommenen Ablenkungen zwischendurch.

an alle Freunde und Kollegen.
Für die unvergessliche Zeit - vor, während und nach dem
Studium.

an Monika. Für ALLES.