

BBSR-  
Online-Publikation  
40/2024

# Lehmtafelbauweise

## Vorgefertigte lasttragende Massivlehmwände

von

Larissa Daube

# Lehmtafelbauweise

Vorgefertigte lasttragende Massivlehmwände

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wohnen, Stadtentwicklung  
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**ZUKUNFT BAU**  
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-20.13

Projektlaufzeit: 01.2021 bis 03.2023

## IMPRESSUM

### Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)  
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)  
Deichmanns Aue 31–37  
53179 Bonn

### Fachbetreuer

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung  
Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“  
Daniel Wöffen  
daniel.woeffen@bbr.bund.de

### Autorin

Bauhaus-Universität Weimar  
Larissa Daube, M. Sc.  
larissa.daube@uni-weimar.de

### Korrektorat

Bauhaus-Universität Weimar  
Claudia Christine Zauke

### Stand

Januar 2024

### Gestaltung

Bauhaus-Universität Weimar

### Bildnachweis

Titelbild: Larissa Daube  
Weitere Nachweise siehe Seite 301 (Bildnachweis)

### Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

### Zitierweise

Daube, Larissa, 2024: Lehmtafelbauweise: Vorgefertigte lasttragende Massivlehmwände. BBSR-Online-Publikation 40/2024, Bonn.

# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	6
Abstract	8
Einführung	10
Themenfeld	10
Untersuchungsgegenstand	12
Problemstellung	13
Stand der Forschung/Baupraxis	13
Forschungslücke/Entwicklungsbedarf	15
Zielstellung	16
Konkrete Projektziele	16
Übergeordnete Ziele und der Beitrag des Projekts dazu	16
Forschungsdesign	18
Arbeitshypothesen	18
Methodischer Ansatz	18
Projektteam und Organisation, Kooperationspartner	18
Arbeitspakete und Meilensteine	21
Wärmedurchgangswiderstand	21
Festigkeit	21
Vorfertigung, Transport, Einbau	22
Bemessung LTBw	22
Architektursprache	22
Demonstrator	22
Projektverlauf	23
Wärmedurchgangswiderstand	24
Methodik	25
Leichtzuschläge	25
Ökologische Zuschlagstoffe	34
Simulation	59
Zusammenfassung Wärmedurchgangswiderstand	63
Festigkeit	64
Allgemeine Anforderungen und Eigenschaften	64
Herstellungsprozess	66
Druckfestigkeitsprüfung	68
Biegezugfestigkeitsprüfung	121
Untersuchungsreihe 1	124
Numerische Herleitung innerer Kräfte von Verbundquerschnitten aus Stahlbeton	130
Rezyklierbarkeit	140
Brandschutz	148
Elastizitätsmodul	197
Simulation	205

Bemessung LTBw	212
Referenzbaustoff Beton	212
Bemessung	216
Vorfertigung, Transport und Einbau	233
Vorfertigung	233
Transport und Einbau	235
Architektursprache	239
Lehre	240
Workshop	241
Umfrage	243
Auswertung	252
Demonstrator	253
Bauort	253
Entwurf	254
Bau des Demonstrators	258
Messungen	265
<b>Ergebnisse</b>	<b>277</b>
Zusammenführung der Zwischenergebnisse zum Endergebnis	277
Bewertung/Diskussion/Zielerreichung – Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext inkl. möglicherweise bekannt gewordener Ergebnisse von dritter Seite	278
Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit	279
<b>Mitwirkende</b>	<b>281</b>
<b>Kurzbiographien</b>	<b>283</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>290</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>298</b>
<b>Bildnachweis</b>	<b>301</b>
<b>Anlagen</b>	<b>302</b>

## Kurzfassung

Lehmbau hat global betrachtet eine lange Tradition. Archäologische Funde belegen beispielsweise 8.000 Jahre alte Lehmkonstruktionen in der Türkei und Palästina. Auch in Deutschland zählte Lehm lange Zeit zu den Hauptbaustoffen, beispielsweise in Form von Fachwerk- oder Stampflehmbau.

Im Zuge der Industrialisierung und der Entwicklung der Beton- und Zementindustrie verlor Lehm jedoch an Bedeutung und wurde durch moderne Baustoffe mit höherer Festigkeit ersetzt. Lediglich während der Weltkriege erlebte der Lehm aufgrund von Rohstoff- und Transportknappheit ein kurzes Revival. Ende des 20. Jahrhunderts wurde das Interesse an ökologischen Baustoffen wie Lehm durch die aufkommende Nachhaltigkeitsbewegung wieder geweckt. Lehm wird heute aufgrund seiner natürlichen Herkunft, lokalen Verfügbarkeit, des geringen Energieaufwands bei der Herstellung als besonders ökologisch betrachtet.

Während für den Lehmsteinbau in den letzten Jahren eine gute Basis für eine breite Anwendung geschaffen wurde, ist die Verwendung von Stampflehm nach wie vor mit einigen Hürden verbunden. So ist für den Bau eine besondere Genehmigung im Einzelfall notwendig, der Herstellungs-, Schalungs- und Trocknungsprozess ist zeitintensiv, was zu einer langen Bauzeit und höheren Baukosten führt. Zudem ist das Bauen mit Stampflehm mit großen Wandquerschnitten verbunden.

Im Zuge des Forschungsvorhabens „Lehmtafelbauweise – vorgefertigte lasttragende Massivlehmwände“ wird, unter Berücksichtigung der genannten Hürden, eine Stampflehmfertigbauweise entwickelt, welche die Ansprüche an zukunftsfähiges Bauen erfüllen kann.

Neben den umwelttechnischen Ansprüchen (wenig CO<sub>2</sub>-Emission, Ressourcenschonung etc.), sind die Vorgaben des Gebäudeenergiegesetzes (kurz: GEG) bindend. So soll die erforschte Wand mindestens einen U-Wert von 0,28 W/(m<sup>2</sup>K) einhalten.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass ein zweischichtiges Bauteil die wesentlichen bauphysikalischen und mechanischen Eigenschaften erfüllt und dabei effiziente Wandquerschnitte von 55 cm ermöglicht. Dabei ist das Bauteil in eine Trag- und eine Dämmschicht geteilt, wobei diese parallel zueinander kraftschlüssig gefertigt werden können. Um den Wärmedurchgang des Bauteils zu optimieren, muss der Stampflehmmischung ein Leichtzuschlag beigemischt werden. Analysen haben gezeigt, dass sich Korkgranulat mit einer Korngröße von 1 – 2 mm optimal eignet.

Für einen effizienten Wandaufbau wird der 25 cm starken Tragschicht 30 Vol. % Korkgranulat und für höhere Festigkeiten 3 Vol. % Tonmehl sowie ein Hochleistungsflachsgewebe als Geogitter zugefügt. Durch die beschriebene Mischung können Druckfestigkeiten von über 2,20 N/mm<sup>2</sup> erreicht werden.

Die Dämmschicht ist 30 cm stark und enthält 60 Vol. % Korkgranulat, 1 Vol. % Tonmehl und ebenfalls ein eingelegtes Geogitter aus Flachs. Da diese Schicht keine Lasten aufnehmen muss und somit als selbsttragend deklariert werden kann, genügt eine Druckfestigkeit von 1 N/mm<sup>2</sup>.

Zusätzlich wurde der statische E-Modul, sowie die Biegezugfestigkeit für die Tragschicht bestimmt. Der mittlere E-Modul lag bei 2.128 N/mm<sup>2</sup> und die mittlere Biegezugfestigkeit bei 0,74 N/mm<sup>2</sup>. Durch die Messungen konnte nachgewiesen werden, dass das gewählte Gemisch trotz 30 Vol. % Korkanteil eine hohe Steifigkeit aufweist. Die Biegezugfestigkeit schließt eine Verwendung als auf Biegung beanspruchtes Bauteil aus, stellt jedoch einen schadensfreien Transport sicher.

Das erforschte Fertigteil hat eine Breite von 2,00 m, ist 1,50 m hoch und 0,55 m stark. Für den privaten Wohnungsbau bilden somit zwei aufeinander gestapelte Fertigteile eine angenehme Raumhöhe. Für repräsentative Bauten wie bspw. Museen bilden drei Elemente eine geeignete Raumhöhe. Durch eine Falz-Verbindung werden die Bauteile auf der Baustelle kraftschlüssig gefügt. Für die äußere Erscheinung der Lehmhautafeln wurden unterschiedliche Oberflächenveredelungen erprobt. So sind

Sichtoberflächen mit Erosionsbremsen aus Tonscherben oder Trasskalkmörtel und gewachste Tafeln möglich. Alternativ können die Tafeln verputzt oder mit einer Holzfassade versehen werden. Durch die beschriebenen Maßnahmen kann ein Witterungsschutz im Bauteil sichergestellt werden, sodass die Wand unabhängig der baulichen Gegebenheiten sicher eingebaut werden kann.

Vereinfachte Brandversuche wiesen für die Lehmtafelbauweise einen Feuerwiderstand von 90 Minuten nach. Für die Einordnung in eine Baustoffklasse konnte anhand dieser Versuche für die Tragschicht A1 (nicht brennbar) und für die Dämmschicht B1 (schwerentflammbar) festgestellt werden.

## Abstract

Earth construction has a long tradition worldwide. Archaeological findings, for example, show 8,000-year-old earthen structures in Turkey and Palestine. In Germany as well, earth was a primary building material for a long time, in the form of framework or rammed earth construction.

However, with the industrialization and the development of the concrete and cement industry, clay lost its significance and was replaced by modern building materials with higher strength. Only during the World Wars did earth construction experience a short revival due to raw material and transport scarcity.

At the end of the 20th century, interest in ecological building materials like clay was rekindled by the emerging sustainability movement. Today, adobe is considered particularly ecological due to its natural origin, local availability, and low energy consumption during production.

While a good foundation has been created for the widespread use of adobe brick construction in recent years, the use of rammed earth is still associated with some hurdles. For example, a special individual approval is necessary for construction, and the manufacturing, formwork, and drying processes are time-consuming, leading to longer construction times and higher costs. Moreover, building with rammed earth is associated with large wall cross-sections.

In the course of the research project "Lehmtafelbauweise - prefabricated load-bearing solid rammed earth walls", a rammed earth prefabricated construction method is being developed that can meet the requirements for future-oriented building while considering the hurdles mentioned.

In addition to environmental requirements (low CO<sub>2</sub> emissions, resource conservation, etc.), the requirements of the Building Energy Act (Gebäudeenergiegesetz, GEG) are binding. The researched wall should comply with a U-value of at least 0.28 W/(m<sup>2</sup>K).

The investigations have shown that a two-layered building element fulfills the essential building physics and mechanical properties while enabling efficient wall cross-sections of 55 cm. The building element is divided into a load-bearing and an insulating layer, which can be manufactured in parallel with force-locking. To optimize the heat transfer of the building element, lightweight aggregate must be added to the rammed earth mixture. Analysis has shown that cork granulate with a grain size of 1-2 mm is optimal.

For an efficient wall construction, 30 % by volume of cork granulate and 3% by volume of clay powder are added to the 25 cm thick load-bearing layer, as well as a high-performance flax fabric as a geogrid for higher strength. With this mixture, compressive strengths of over 2.20 N/mm<sup>2</sup> can be achieved.

The 30 cm thick insulating layer contains 60% by volume of cork granulate, 1% by volume of clay powder, and also an embedded flax geogrid. Since this layer does not have to bear any loads and can therefore be declared as self-supporting, a compressive strength of 1 N/mm<sup>2</sup> is sufficient.

In addition, the young's modulus and flexural strength were determined for the load-bearing layer. The mean young's modulus was 2,128 N/mm<sup>2</sup>, and the mean flexural strength was 0.74 N/mm<sup>2</sup>. The measurements showed that the selected mixture has a high stiffness despite a 30% cork content. The flexural strength rules out the use of the element as a component subject to bending stress but ensures damage-free transport.

The researched prefabricated element has a width of 2.00 m, a height of 1.50 m, and a thickness of 0.55 m. Therefore, for private residential construction, two stacked prefabricated elements form a comfortable room height. For representative buildings such as museums, three elements form a suitable room height.

The components are joined on site in a force-locking manner using a tongue and groove connection. Different surface finishes have been tested for the external appearance of the clay panel construction, including visible surfaces with erosion brakes made of clay shards or trass lime mortar and waxed panels.

Alternatively, the panels can be plastered or provided with a wooden façade. These measures ensure weather protection in the component, allowing the wall to be installed safely regardless of the structural conditions.

Simplified fire tests showed a fire resistance of 90 minutes for the clay panel construction. Based on these tests, the load-bearing layer was classified as A1 (non-combustible) and the insulation layer as B1 (difficult to ignite) for the purpose of classifying the building material.

# Einführung

## Themenfeld

Lehmbau hat, im globalen Kontext betrachtet, eine lange Tradition. So wurden beispielsweise in der Türkei oder in Palästina ca. 8.000 Jahre alte Lehmkonstruktionen nachgewiesen.<sup>1</sup> Auch in Deutschland bildete Lehm, entweder als Ausfachung im Fachwerkbau oder massiv im Stampflehm- oder Wellerlehmbau, lange Zeit einen wesentlichen Hauptbaustoff.<sup>2</sup> Im Zuge der Industrialisierung, mit welcher auch eine Entwicklung der Beton- und Zementindustrie einherging, wurde der natürliche Baustoff Lehm schließlich von modernen Baustoffen, mit erhöhter Festigkeit, abgelöst.<sup>3</sup> Erst Anfang des 20. Jahrhunderts erlebte der Lehm ein kurzes Revival, da ausgelöst durch die beiden Weltkriege, eine Knappheit an alternativen Rohstoffen und Transportmöglichkeiten herrschte.<sup>4</sup> Nachdem sich die Wirtschaft von den Kriegen und den damit einhergehenden ökonomischen, politischen und sozialen Auswirkungen erholt hatte, geriet der Lehm jedoch erneut in Vergessenheit.

Ende des 20. Jahrhunderts entwickelte sich schließlich eine neue Nachhaltigkeitsbewegung, welche unter anderem durch den Weltgipfel von Rio de Janeiro im Jahr 1992 und den Weltgipfel für nachhaltige Entwicklung im Jahr 2002 gefestigt wurde.<sup>5</sup> Erst durch den neu gewonnenen Anspruch an ökologische Nachhaltigkeit, konnte das Interesse am Baustoff Lehm wieder steigen. Lehm gilt als besonders ökologisch, da er:

1. sich mit Sand, Schluff und Ton, nur aus natürlichen Bestandteilen zusammensetzt,
2. regional und schonend für die Umwelt abgebaut werden kann,
3. sich energiearm zum Baustoff aufbereiten lässt,
4. sich problemlos recyceln oder umweltverträglich entsorgen lässt und
5. durch seine hygroscopischen Eigenschaften, Schadstoffe binden und die Luftfeuchtigkeit regulieren kann.

Trotz der genannten Vorteile für Mensch und Umwelt haben sich inzwischen Beton, Stahlbeton oder Mauerwerk als moderne Baumaterialien auf dem Markt gefestigt (vgl. Abbildung 1), sodass sich neue Baustoffe oft nur schwer etablieren lassen. Mit 29,7 % war Ziegel im Jahr 2021 der meistverwendete Baustoff (bezogen auf Baugenehmigungen) für Wohngebäude in Deutschland.<sup>6</sup> Der Durchmesser der Blasen in Abbildung 1 gibt Aufschluss über die Anzahl der Baugenehmigungen des jeweiligen Baustoffs.

Obwohl der Bausektor noch immer (Stand 2020) knapp 40 % der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht,<sup>7</sup> fallen ökonomische Gesichtspunkte bei der Wahl von Bauprodukten meist viel schwerer ins Gewicht als beispielsweise umwelttechnische Aspekte. Dadurch hatte der lasttragende Lehm bisher noch keine Chance sich in der Branche zu etablieren.

---

<sup>1</sup> Vgl. Schroeder 2019, S. 2.

<sup>2</sup> Vgl. Volhard und Röhlen 2009, S. 7.

<sup>3</sup> Vgl. Schroeder 2019, 17f.

<sup>4</sup> Vgl. Schroeder 2019, S. 18.

<sup>5</sup> Vgl. Die Bundesregierung 2023.

<sup>6</sup> Statistisches Bundesamt 2022, S. 10.

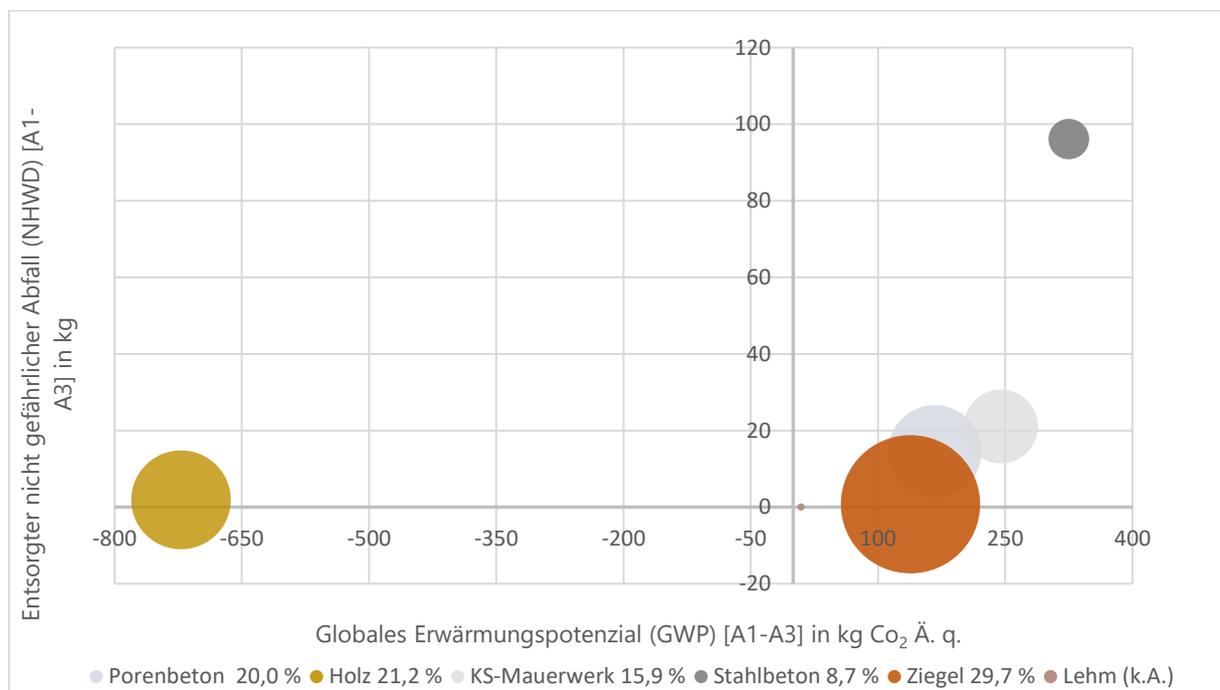
<sup>7</sup> Vgl. United Nations Environment Programme 2021, S. 15.

Gerade der Stampflehmbau stellt eine bewährte Verarbeitungstechnik im lasttragenden Lehmbau dar, wobei:

1. lange Bauzeiten durch einen aufwändigen Schalungs- und Trocknungsprozess,
2. die zeitintensive und damit teure Aufbereitung zum fertigen Bauteil,
3. große Wandquerschnitte aufgrund der vergleichsweise schlechten Tragfähigkeit und verhältnismäßig hohen Wärmeleitfähigkeit

ein wesentliches Optimierungspotenzial darstellen, um mit den konventionellen Baustoffen mithalten zu können, ohne die Umwelt weiter zu belasten.

Abbildung 1: Baumaterialien in Bezug auf Baugenehmigungen von Wohngebäuden (Neubau) in Deutschland (2021) in Verbindung mit Abfallaufkommen und CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von 1m<sup>3</sup> des Baustoffs.



Quelle: eigene Anfertigung 2022 nach Daten vom Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) 2023 und Statistisches Bundesamt

## Untersuchungsgegenstand

Im Zuge der Forschung soll eine lasttragende Fertigbauweise entwickelt werden, welche gleichermaßen den hohen Ansprüchen der Baubranche und jenen der Bundesregierung<sup>8</sup>, an umweltverträgliches Bauen, gerecht werden kann. Dafür wird sowohl an numerischen Modellen als auch anhand von realen Versuchen ein Lehmbauteil entwickelt, welches hinsichtlich:

1. Wärmeleitfähigkeit,
2. Bauteilabmessungen,
3. Tragfähigkeit,
4. Herstellungsprozessen und
5. Baukosten

optimiert wird. Durch die Optimierungen kann das Bauteil sowohl den Lastabtrag als auch die Wärmedämmung in einer monolithischen Wandscheibe vereinen.

Ein wesentlicher Untersuchungsgegenstand besteht darin, den ökologischen Fußabdruck trotz durchgeführter Optimierungen möglichst gering zu halten. Um das zu erreichen, sollen ausschließlich natürliche Komponenten in dem Lehmfertigteil verbaut werden, welche am Lebenszyklusende einfach aus der Lehmtafel herausgelöst und weiterverwendet, oder schonend entsorgt werden können. Darüber hinaus soll durch Optimierung von Wärmeleitfähigkeit und Tragfähigkeit der Materialaufwand minimiert werden.

---

<sup>8</sup> Am 09. Oktober 2019 wurde das Klimaschutzprogramm 2030 vom Kabinett beschlossen. Laut dem Klimaschutzprogramm 2030 soll der Ausstoß von CO<sub>2</sub> und anderen Treibhausgasen im Vergleich zum Jahr 1990 um 55 Prozent gesenkt werden. Momentan verursacht der Gebäudesektor in Deutschland, mit circa 120 Millionen Tonnen pro Jahr, rund 14 Prozent der gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Bis 2030 muss der CO<sub>2</sub>-Ausstoß, auf 72 Millionen Tonnen pro Jahr, reduziert sein. (vgl. Die Bundesregierung 2019, S. 7)

## Problemstellung

Bei der 26. UN-Klimakonferenz in Glasgow wurde vom 31. Oktober bis zum 12. November 2021 über den Klimawandel und seine Folgen diskutiert.<sup>9</sup> Längst ist klar, dass die Reduktion von Treibhausgasemissionen ein wesentlicher Bestandteil einer erfolgreichen Klimawende sein muss.

Lehm hat als Baustoff das Potenzial einen wesentlichen Beitrag zu diesen Zielen zu leisten, müsste dafür jedoch häufiger an geeigneten Stellen eingesetzt werden. Gleichzeitig ist Lehmbau in Deutschland noch immer schwer zugänglich, da er in wirtschaftlichen Aspekten nur schwer mit konventionellen Baustoffen mithalten kann und darüber hinaus ein spezielles Fachwissen für Planung und Bau erfordert.

Eine Optimierung der Stampflehmbauweise kann den Baustoff für die breite Masse zugänglich machen und so einen elementaren Beitrag, hin zur Klimaneutralität des Bausektors, leisten.

### Stand der Forschung/Baupraxis

Stampflehmbau ist eine bewährte Technik für den lasttragenden Lehmbau, für welche es aktuell noch keine offiziellen Regelungen in Form von Normen gibt.<sup>10</sup> Als Regelwerk für Stampflehmbau in Deutschland können jedoch die „Lehmbau Regeln“ des Dachverbands Lehm herangezogen werden. In diesem Werk werden neben allgemeinen Anforderungen, die Zusammensetzung, Aufbereitung, Prüfung und Kennzeichnung von Stampflehm beschrieben und geregelt.

Aktuell gibt es in Deutschland und seinen Nachbarländern nur sehr wenige Beispiele von Neubauten aus Stampflehm. Ein prominentes Beispiel bildet die Kapelle der Versöhnung in Berlin<sup>11</sup>, welche im Jahr 2000 fertiggestellt wurde. Gleichzeitig gibt es in Deutschland eine Vielzahl an historischen Massivlehmhäusern im Bestand, wobei eine ganzheitliche Dokumentation eben dieser bislang fehlt. Um einen Neubau aus Stampflehm zu errichten, sind einige wesentliche Vorgaben zu beachten:

1. So ist bei Bauvorhaben mit mehr als zwei Wohneinheiten und mehr als zwei Vollgeschossen stets eine Zustimmung im Einzelfall erforderlich.<sup>12</sup>
2. Für tragende Stampflehmwände wurde darüber hinaus eine Beschränkung der Geschosshöhe auf maximal 3,25 m festgesetzt.<sup>13</sup>
3. Die Bemessung von tragenden Stampflehmwänden erfolgt vorerst weiter nach dem Konzept eines globalen Sicherheitsbeiwerts, der sich in der Abminderung der Druckfestigkeit auf zulässige Spannungen widerspiegelt.<sup>14</sup>
4. Es wurde eine Mindestbauteilstärke von 32,5 cm für tragende Außenwände und 24,0 cm für tragende Innenwände, festgeschrieben.<sup>15</sup>
5. Die Ausführung von Gebäuden, deren tragende Struktur aus Stampflehm besteht, muss unter Anleitung und Aufsicht einer entsprechenden Lehm-Bau-Fachkraft stattfinden.<sup>16</sup>

---

<sup>9</sup> Vgl. Deutsches Klima Konsortium (DKK) 2021.

<sup>10</sup> Vgl. Ziegert und Röhlen 2020, S. 209.

<sup>11</sup> Vgl. Rauch 2023.

<sup>12</sup> Vgl. Röhlen und Ziegert 2020, S. 227.

<sup>13</sup> Vgl. Röhlen und Ziegert 2020, S. 227.

<sup>14</sup> Röhlen und Ziegert 2020, S. 227.

<sup>15</sup> Vgl. Röhlen und Ziegert 2020, S. 228.

<sup>16</sup> Vgl. Röhlen und Ziegert 2020, S. 228.

6. Darüber hinaus kann eine Überwachung der Materialfestigkeit angeordnet werden.<sup>17</sup>

Es gibt bereits zeitgenössische Bauwerke, welche aus selbsttragenden Lehmfertigbauteilen errichtet wurden. Prominente Beispiele sind der Alnatura Firmensitz auf dem Alnatura Campus in Darmstadt<sup>18</sup>, welcher 2019 fertiggestellt wurde, oder das Ricola Kräuterzentrum in Laufen (Schweiz)<sup>19</sup>, welches 2014 fertiggestellt wurde.

Derzeit ist der Transport und die Herstellung von Lehmfertigteilen mit einem hohen Aufwand verbunden, was auch mit der noch fehlenden Fertigungsinfrastruktur verbunden ist. Deshalb wurden die Fertigteile des Alnatura Campus in Darmstadt nicht in einer zentralen Fertigungshalle hergestellt, sondern in einer temporären Halle direkt vor Ort vorgefertigt.<sup>20</sup> Diese Vorgehensweise ist gerade im urbanen Raum als nicht massen- oder zukunftstauglich einzustufen.

Auch eine Optimierung des Wärmedurchgangskoeffizienten wurde im Zuge der beiden erwähnten Projekte bereits erprobt. Dafür wurde für den Campus in Darmstadt ein dreischichtiges Bauteil mit einer Gesamtdicke von 70 cm verbaut, in welchem eine 17 cm starke Kerndämmung aus recyceltem Schaumglasschotter integriert wurde.<sup>21</sup> Durch dieses Vorgehen konnte für die Lehmwände ein U-Wert von 0,35 W/(m<sup>2</sup>K) erreicht werden.<sup>22</sup> Eine Reduzierung der vorgefundenen Wandquerschnitte ist ein weiteres, wesentliches Optimierungspotenzial.

Es gibt bereits einige Forschungsvorhaben, welche sich mit der robotischen Verarbeitung von Lehm oder der Verarbeitung via 3D-Druck, beschäftigten. Mittels derartiger Technologien könnte die Verarbeitung von Lehm kosten- und zeiteffizient ausgeführt werden, wodurch der Einsatz des nachhaltigen Baustoffs enorm gefördert würde. An der TU Braunschweig wird derzeit ein Forschungsvorhaben zur „Roboter-gestützte[n] Fabrikation von Bauteilen aus Stampflehm“<sup>23</sup> fertiggestellt (Projektende Februar 2022). Bei dem von Zukunft Bau geförderten Forschungsvorhaben wird ein Prozess entwickelt, mithilfe dessen alle Bearbeitungsschritte des Stampflehmbaus robotisch ausgeführt werden können.<sup>24</sup> „Geplant ist die Entwicklung eines roboter-gestützten Herstellungsverfahrens basierend auf dem ‚DBFL - Digital Building Fabrication Laboratory‘ [bei welchem] mit zwei frei im Raum orientierbaren Bearbeitungsköpfen Fertigungsprozesse im 1:1 Maßstab realisiert [werden können].“<sup>25</sup> Parallel wurde von der italienischen Firma für 3D-Druck WASP und dem Architekten Mario Cucinella an 3D-Druck von reinem Lehm geforscht.<sup>26</sup>

Als Bewehrung und zur Vermeidung von Rissen im Material ist es gängige Praxis Geogitter in das Gemisch einzustampfen.<sup>27</sup>

---

<sup>17</sup> Vgl. Röhlen und Ziegert 2020, S. 228.

<sup>18</sup> Vgl. Schäfer 2019.

<sup>19</sup> Vgl. S. 2014.

<sup>20</sup> Vgl. Schäfer 2019.

<sup>21</sup> Vgl. Schäfer 2019.

<sup>22</sup> Vgl. Schäfer 2019.

<sup>23</sup> Kloft et al. 2019, S. 58.

<sup>24</sup> Vgl. Kloft et al. 2019, 58f.

<sup>25</sup> Kloft 2019.

<sup>26</sup> Vgl. Katwala 2021.

<sup>27</sup> Vgl. Röhlen und Ziegert 2020, 224f.

## Forschungslücke/Entwicklungsbedarf

Wie in den vorausgegangenen Kapiteln beschrieben, birgt der Baustoff Lehm ein immenses Potenzial. Gleichzeitig ist eine moderne Anwendung nicht ausgereift, teuer und mit vielerlei Hürden verbunden (vgl. Kapitel „Stand der Forschung/Baupraxis“, ab S. 13). Um den nachhaltigen Baustoff zukunftsfähig zu machen, müssen Wandquerschnitte so optimiert werden, dass sie mit modernen Wandaufbauten wie beispielsweise einem Wärmedämmverbundsystem auf KS-Mauertragwerk, mithalten können. Damit einhergehend muss die Wärmeleitfähigkeit der Lehmtafel optimiert werden, sodass eine einzelne Tafel bereits die Anforderungen an den Wärmedurchgang erfüllt und somit keine zusätzliche Dämmschicht notwendig wird. Dadurch können Kosten gespart und fehlerhafte Ausführungen auf der Baustelle vermieden werden.

Um die beschriebenen Ziele zu erreichen, muss parallel eine Optimierung der Tragfähigkeit untersucht werden. Durch zukunftsfähige Herstellungsprozesse könnten zusätzlich Kosten eingespart werden und auch komplexe Schichtungen im Bauteil fehlerfrei realisiert werden.

## Zielstellung

Ziel der Forschung ist die Entwicklung einer Lehm-Fertigbauweise, welche den Ansprüchen an zukunftsfähiges Bauen gerecht werden kann. Dazu gehört auch ein konsequent ökologisch ausgeführtes Bauteil. Gerade im Bereich der Dämmung lassen sich viele konventionelle Lehm-Dämmstoffe (z.B. Schaumglas oder Blähton) durch natürliche, organische Dämmstoffe ersetzen (z.B. Hanf, Kork oder Stroh), wodurch einerseits die Recyclingfähigkeit erhöht, andererseits der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck minimiert werden kann.

Gleichzeitig erfordert das Bauen mit Lehm derzeit noch spezifische Fachkenntnisse. Durch die Entwicklung der Lehmtafelbauweise könnte der Baustoff leichter zugänglich gemacht werden. Grund dafür sind unter anderem verlässliche Materialkennwerte und eine einfache Fügung auf der Baustelle.

Auch eine schlanke Dimensionierung zugunsten einer maximalen Nutzfläche im Gebäudeinneren, ist ein wesentliches Ziel der Forschung. Beeinflusst wird die Bauteilstärke vordergründig durch die Tragfähigkeit und den Wärmedurchgang des Bauteils. Um möglichst wenig Heizenergie zu verlieren, sollen die Bauteile mindestens die gesetzlichen Anforderungen an den Wärmedurchgang erfüllen (vgl. Kapitel "Wärmedurchgangswiderstand" ab S. 24).

### Konkrete Projektziele

Konkret soll durch die Forschung eine Lehmtafel mit integrierter Dämmschicht entwickelt werden. Ziel ist dabei eine Bauteilstärke von insgesamt nicht mehr als 40 cm. Durch diese Stärke soll sichergestellt werden, dass die Lehmtafeln mit modernen Baustoffen konkurrieren können und durch ihre Stärke nicht zu viel potenzielle Nutzfläche belegen. Die Lehmtafel soll als tragendes Bauteil verwendet werden können, wodurch eine Druckfestigkeit von mindestens 2,0 N/mm<sup>2</sup> gefordert wird.<sup>28</sup> Diese Druckfestigkeit soll beispielsweise durch das zusätzliche Einbringen einer Bewehrung (Geogitter) erzielt werden.

Der Wärmedurchgangskoeffizient soll sich wie bereits erwähnt nach den gesetzlichen Forderungen richten. Konkret bedeutet dies, dass die Bauteile mindestens einen U-Wert von 0,28 W/(m<sup>2</sup>K) einhalten sollen.

Durch den Aufbau der Lehmtafeln müssen darüber hinaus geeignete Verbindungsstrategien entwickelt werden, sodass das Bauteil in sich kraftschlüssig ist.

Auch die Prozesse für die Herstellung, den Transport und Einbau werden im Zuge der Forschung ausgearbeitet. Hierbei soll vordergründig auf kosteneffiziente Konzepte zurückgegriffen werden, da in diesem Forschungsbereich ein wesentlicher Hebel zur Kostenreduktion liegt.

### Übergeordnete Ziele und der Beitrag des Projekts dazu

Übergeordnetes Ziel der Forschung ist die Ausarbeitung einer zukunftsfähigen Alternative zu konventionellen Baustoffen, durch welche Bauabfälle und der CO<sub>2</sub>-Ausstoß der Baubranche drastisch reduziert werden können. Gleichzeitig soll durch die Entwicklung der Lehmtafelbauweise der Fokus auf gesundes Wohnen und Arbeiten gelenkt werden.

Nur durch die Entwicklung von geeigneten Alternativen können die Ziele der Bundesregierung, wie das Erreichen einer Treibhausgasneutralität bis 2045,<sup>29</sup> langfristig eingehalten werden.

---

<sup>28</sup> Vgl. Röhlen und Ziegert 2020, S. 212.

<sup>29</sup> Vgl. Die Bundesregierung 2022.

Durch die Nutzung von regionalen Rohstoffen fallen außerdem weite Transportwege und die damit einhergehenden Klimaschäden sowie die Abhängigkeit von Importengpässen weg.

Auch wenn die Lehmtafelbauweise nicht für jedes Bauvorhaben in Frage kommt (bspw. Bauten mit Wasserkontakt, Bauten mit mehr als zwei Vollgeschossen, ...) könnte die Nutzung bei geeigneten Bauten bereits einen beachtlichen Einfluss auf den klimatischen Fußabdruck der Baubranche haben.

Laut dem statistischen Bundesamt wurden in Deutschland im Jahr 2019 etwa 100.000 Ein- und Zweifamilienhäuser errichtet.<sup>30</sup> Erfahrungsgemäß sind Bauten dieser Rubrik meist maximal zweigeschossig, wodurch sie sich, bei aktueller Gesetzeslage, für einen Lehm- bau grundsätzlich eignen würden. Die genannte Statistik zeigt ein immenses Potenzial für die Lehmtafelbauweise und stellt ein breites Anwendungsfeld in Aussicht.

---

<sup>30</sup> Vgl. Statistisches Bundesamt (Destatis) 2021.

## Forschungsdesign

Im Folgenden wird das Forschungsdesign in Form zugrundeliegender Arbeitshypothesen, methodischer Ansätze, Organisationsstrukturen und Arbeitspakete, genauer erläutert.

### Arbeitshypothesen

Der Forschungsarbeit liegen die folgenden wesentlichen Arbeitshypothesen zugrunde:

1. Lehmbau kann den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Baubranche verbessern.
2. Durch Lehmbau wird das Abfallaufkommen der Baubranche drastisch reduziert.
3. Durch das regionale Vorkommen und die gute Rezyklierbarkeit können durch Lehmbau Ressourcen geschont werden.
4. In Deutschland ist regional genügend Lehm vorhanden, um eine moderne Lehmbauweise großflächig anzuwenden.
5. Durch die Zugabe von organischen Zuschlagstoffen kann eine Lehmwand die aktuellen Anforderungen an den Wärmeschutz, bei vergleichsweise schlanken Bauteilquerschnitten, erfüllen.
6. Die Nutzung eines Baustoffs ist in Deutschland im Wesentlichen von monetären Faktoren abhängig (bspw. Einkaufspreis, Transportpreis, resultierende Nutzfläche, ...).
7. Durch das Vorfertigen von Lehmtafeln können die Kosten minimiert werden.
8. Eine robotik-gestützte Herstellung könnte den Zeit- und Kostenaufwand weiter minimieren und würde darüber hinaus komplexe Schichtungen erlauben.
9. Die Tragfähigkeit von Lehm lässt sich weiter optimieren.
10. Durch die Lehmtafelbauweise kann der Lehmbau auch für Laien leichter zugänglich gemacht werden.
11. Die gesundheitsfördernden Eigenschaften von Lehm können durch die Lehmtafelbauweise erhalten bleiben.

### Methodischer Ansatz

Im Zuge der Forschung wird anhand von numerischen Modellen als auch realen Versuchen, eine optimierte Lehmbauweise entwickelt. Für die Entwicklung von geeigneten numerischen Modellen und Laborversuchen, findet ein enger Austausch mit den Projektbeteiligten statt.

Durch das Heranziehen numerischer Modelle, kann einerseits ein guter Überblick über einzelne Forschungsfelder erlangt werden, andererseits können sie zur fundierten Entscheidungsfindung herangezogen werden. Dadurch können labortechnische Versuche effizienter eingesetzt werden.

Der jeweilige methodische Ansatz wird für jedes Arbeitspaket einzeln erläutert.

### Projektteam und Organisation, Kooperationspartner

Das Forschungsvorhaben findet unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ruth (Bauhaus-Universität Weimar, Professur für Konstruktives Entwerfen und Tragwerkslehre sowie Massivbau II) statt. Das Forschungsteam setzt sich neben Prof. Ruth aus zwei wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen (Dr. Katrin Linne und Larissa Daube M.Sc.) und insgesamt sechs wissenschaftlichen Hilfskräften (Cedric Bieganski,

Fariba Mokharpour Khanghah, Paul Felix Plattner, Rohan Raj Das, Simon Schlegel und Claudia Christine Zauke) zusammen.

Während Frau Daube als Projektbearbeiterin das Vorhaben wesentlich plante und durchführte, unterstützte Frau Dr. Linne durch fachliche Beratung bei den Versuchsdurchführungen und bei der Planung von Versuchsaufbauten.

Da für den Themenschwerpunkt „Bemessung und Simulation“ im Zuge einer öffentlichen Stellenausschreibung keine geeignete bearbeitende Person gefunden werden konnte, wurden für diesen Themenbereich insgesamt drei studentische Hilfskräfte eingestellt, welche bereits Erfahrung auf diesem Gebiet gesammelt haben. Herr Raj Das (Studium Bauingenieurwesen) bereitete eine ANSYS-Simulation vor, welche schließlich von Frau Mokharpour Khanghah (Studium Bauingenieurwesen) zu Ende geführt wurde. Herr Plattner beschäftigte sich mit dem Thema der Bemessung.

Frau Zauke (Studium Bauingenieurwesen) untersuchte schwerpunktmäßig den Referenzbaustoff Beton und die Berechnung von Biegezugbewehrungen im Bauteil. Sie beschäftigte sich außerdem mit einer vereinfachten Brandversuchdurchführung.

Herr Bieganski unterstützte ebenfalls als studentische Hilfskraft (Studium Soziale Arbeit) die Vorbereitung und Durchführung des Workshops im Zuge der Langen Nacht der Wissenschaft Weimar.

Herr Schlegel, Herr Plattner und Frau Zauke unterstützten die Forschung zusätzlich mit der Herstellung von Probekörpern und halfen bei Versuchsdurchführungen. Dadurch konnten aufwändige Laborprozesse effizient gestaltet werden.

In der Forschung wirkten außerdem die Folgenden mitfinanzierenden Stellen, in Form von Beratungsleistungen, an dem Vorhaben mit:

1. Dachverband Lehm e.V., DVL (Dipl.-Ing. Stephan Jörchel)
2. Materialforschungs- und -prüfanstalt Weimar, MFPA (Dipl.-Ing. Christoph Liebrich)
3. ZRS Architekten Ingenieure (Prof. Dr.-Ing. Christof Ziegert)
4. Planungsgruppe Geburtig (Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Geburtig)
5. Alte Feuerwache Weimar e.V. (Franziska Bernstein)

Durch die mitfinanzierende Stelle CLAYTEC e.K. (Dipl.-Ing. Ulrich Röhlen), wurde dem Forschungsvorhaben Stampflehm zur Verfügung gestellt.

Da das Projekt bei Studierenden unterschiedlichster Studienrichtungen (Bauingenieurwesen, Konstruktiver Ingenieurbau und Architektur) auf großes Interesse stieß, wurden darüber hinaus forschungsrelevante Studien- und Abschlussarbeiten betreut.

Im Folgenden sind besonders relevante Abschluss- und Studienarbeiten chronologisch aufgelistet:

1. Labortechnische Untersuchungen zum Brandverhalten von Stampflehmfertigteilen – Masterthesis – Claudia Zauke – 2023.
2. Erstellung eines Leitfadens zu Recyclingtechniken im Lehmbau – Studienarbeit – Pauline Grunert – 2022/23.
3. Lehmtafelbauweise: Untersuchung der Materialeigenschaften von Stampflehm – Korkmischungen – Masterthesis – Paul Plattner – 2022.
4. Optimierungen im Stampflehmbau – Bachelorthesis – Simon Schlegel – 2021/22.
5. Additive Fertigung im Lehmbau – Studienarbeit – Niklas Haschke – 2021.

Zusätzlich wurde von Frau Daube im Rahmen der Forschung eine Seminarfacharbeit am Carl-Zeiss-Gymnasium Jena als Fachbetreuerin begleitet. Die Arbeit zum Thema „Untersuchung zu physikalischen und chemischen Baustoffeigenschaften verschiedener Lehmproben des Weimarer Raums“ von Melia Marie Messner und Pauline Ziegler konnte sich bei Jugend Forscht erfolgreich für die Landesrunde qualifizieren und wurde zusätzlich beim BundesUmweltWettbewerb (BUW) eingereicht.

## Arbeitspakete und Meilensteine

Die Forschung setzt sich im Wesentlichen aus sechs Arbeitspaketen zusammen, wobei sich das letzte Arbeitspaket ausschließlich administrativer und organisatorischer Aspekte widmet (vgl. Tabelle 1). Das Arbeitspaket „Demonstrator“ war im Forschungsantrag zunächst nicht vorgesehen. Da sich die Inhalte aus diesem Arbeitspaket jedoch auf unterschiedliche Bereiche beziehen (Wärmedurchgangswiderstand, Festigkeit, Bemessung LTBw und Architektursprache) wurde entschieden dieses Themenfeld ähnlich einem eigenen Arbeitspaket zu behandeln.

Tabelle 1: Zeitliche Einordnung der Arbeitspakete

Arbeitspakete	2021				2022				2023
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1
<b>Wärmedurchgangswiderstand</b>									
<b>Festigkeit</b>									
Vorfertigung, Transport, Einbau									
Bemessung LTBw									
Architektursprache									
Demonstrator									
Zusammenfassung, Marketing									

Quelle: eigene Anfertigung 2022

Die Arbeitspakete werden im Laufe der Forschungsarbeit unter Projektverlauf ab Seite 23 detailliert beschrieben. Im Folgenden soll ein kurzer Überblick über die wesentlichen Bearbeitungsschritte der einzelnen Arbeitspakete geliefert werden.

### Wärmedurchgangswiderstand

Im ersten Arbeitspaket soll ein Lehmgemisch gefunden werden, welches hinsichtlich seines Wärmedurchgangswiderstandes optimiert ist.

Dafür werden zunächst unterschiedliche ökologische Zuschlagstoffe auf ihre Eignung als Dämmmaterial analysiert. Eine ANSYS-Simulation ergänzt die Ergebnisse und wird schließlich mit den Ergebnissen der labortechnischen Untersuchungen abgeglichen. Dieses Arbeitspaket wurde schwerpunktmäßig in der ersten Forschungshälfte behandelt. Ab Januar 2022 wurde dann die ANSYS-Simulation vorbereitet. Aufgrund von fehlenden Materialkennwerten nahm die notwendige Recherche mehr Zeit in Anspruch als ursprünglich geplant.

### Festigkeit

Im zweiten Arbeitspaket soll ein Lehmgemisch gefunden werden, welches den Anforderungen an Druck- und Biegezugfestigkeit gerecht werden kann. Dazu soll eingangs eine Recherche zu einer nachhaltigen Faserverstärkung des Lehms stattfinden. Durch die Durchführung von Druckfestigkeits- und

Biegezuguntersuchungen können Ergebnisse validiert und das weitere Vorgehen geplant werden. Auch die Untersuchung des E-Moduls war Teil dieses Arbeitspaketes. Ziel ist eine minimale Bauteilstärke bei Einhaltung der Anforderungen an den Lastabtrag.

Eine ANSYS-Simulation ergänzt die Ergebnisse und wird schließlich mit den Ergebnissen der labortechnischen Untersuchungen abgeglichen. Dieses Arbeitspaket war besonders Zeitintensiv und wurde daher über die gesamte Forschungsdauer bearbeitet. Ab Januar 2022 wurde dann die ANSYS-Simulation vorbereitet. Aufgrund von fehlenden Materialkennwerten nahm die notwendige Recherche mehr Zeit in Anspruch als ursprünglich geplant.

#### Vorfertigung, Transport, Einbau

Es soll geklärt werden, wie das entwickelte Fertigteil in Breite und Höhe dimensioniert sein muss, um Vorfertigung, Transport und Einbau reibungslos zu ermöglichen. Dazu werden Faktoren wie Knicklänge, Transportgewicht und Standardmaße im Bau analysiert. Auch Prozesse zur Vorfertigung, Verdichtung, Lagerung und Fugenausbildung werden im Zuge dieses Arbeitspakets analysiert und entwickelt. Des Weiteren ist die Entwicklung einer kraftschlüssigen Fügung auf der Baustelle ein wesentlicher Bestandteil dieses Themenfelds.

#### Bemessung LTbw

Vereinfachte Berechnungsverfahren sollen die Standsicherheit nachweisen. Als Analogiemodell soll unbewehrter Beton herangezogen werden.

#### Architektursprache

Durch eine Umfrage und die gezielte Integration der Forschung in die Lehre wird eine ansprechende Architektursprache entwickelt.

#### Demonstrator

Durch den Bau eines Demonstrators werden die Witterungs- und Frostbeständigkeit der gewählten Lehm-Mischung nachgewiesen. Gleichzeitig soll der Demonstrator als Reallabor genutzt werden und wichtige Werte zum Wärmedurchgangskoeffizienten des entwickelten Baustoffs liefern. Der Bau des Demonstrators war dicht an ein Seminar geknüpft und begann im Frühjahr 2022. Die beschriebenen Messungen wurden ab November 2022 durchgeführt.

---

## Projektverlauf

Im Zuge des Forschungsprojektes "Lehmtafelbauweise – vorgefertigte lasttragende Massivlehmwände" soll eine zukunftsfähige Massivlehmbauweise entwickelt werden, welche den aktuellen Ansprüchen an Wärmedurchgang, Tragfähigkeit und Qualität entspricht. Dafür werden im ersten Schritt die bauphysikalischen Eigenschaften von unterschiedlichen Stampflehmmischungen analysiert und in mehreren Schritten optimiert.

Anschließend werden vielversprechende Mischungen unterschiedlichen mechanischen Untersuchungen unterzogen. Durch ein vereinfachtes Bemessungsverfahren wird schließlich ein Standsicherheitsnachweis erstellt.

Durch den Bau eines Demonstrators sollen zusätzliche Erkenntnisse gewonnen werden.

Die getätigten numerischen und labortechnischen Untersuchungen werden im Folgenden beschrieben und dokumentiert

## Wärmedurchgangswiderstand

Seit dem 01. November 2020 gilt das neue Gebäudeenergiegesetz (kurz: GEG 2020), welches die bisher geltende Energieeinsparverordnung 2014, das Energieeinsparungsgesetz 2013 und das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz 2011 ablöst.<sup>31</sup> Im GEG 2020 wird ein Mindestwärmeschutz wie folgt gefordert:

*„(1) Bei einem zu errichtenden Gebäude sind Bauteile, die gegen die Außenluft, das Erdreich oder gegen Gebäudeteile mit wesentlich niedrigeren Innentemperaturen abgrenzen, so auszuführen, dass die Anforderungen des Mindestwärmeschutzes nach DIN 4108-2: 2013-02 und DIN 4108-3: 2018-10 erfüllt werden.“<sup>32</sup>*

Da das GEG 2020 primär Wert auf einen gesenkten Primärenergiebedarf legt, wird der Wärmedurchgangswiderstand in diesem Gesetz nur grob umrissen. Laut (DIN 4108-2) wird für Wände von beheizten Räumen „mit einer flächenbezogenen Masse [...]“<sup>33</sup> von mindestens 100 kg/m<sup>2</sup>, ein Wärmedurchlasswiderstand [R] von mindestens 1,2 (m<sup>2</sup>K)/W gefordert.<sup>34</sup> Das entspricht einem Wärmedurchgangswiderstand [U] von 0,73 W/(m<sup>2</sup>K).

$$U = \frac{1}{R_{Gesamt}} \quad [W/m^2K] \quad (1)$$

Dabei gilt:

$$R_{Gesamt} = R_{si} + R + R_{se} \quad [m^2K/W] \quad (2)$$

Dieser U-Wert ist aus Sicht der Forschung nicht praxistauglich/zukunftsfähig und würde bei den anschließenden Berechnungen die Ergebnisse verfälschen. Deswegen wurde im Folgenden auf den U-Wert eines in Anlage 3 des GEG 2020 aufgeführten Referenzgebäudes (Nichtwohngebäude) zurückgegriffen. Der dort angegebene „Höchstwert de[s] mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten der wärmeübertragenden Umfassungsfläche“<sup>35</sup> beträgt 0,28 W/(m<sup>2</sup>K).

Um ein möglichst breites Spektrum abzubilden, sollen zwei Unterschiedliche U-Werte betrachtet werden. So soll neben einem U-Wert von 0,28 W/(m<sup>2</sup>K), welcher stellvertretend die aktuelle Gesetzeslage abbildet, ein U-Wert von 0,20 W/(m<sup>2</sup>K) untersucht werden.

Der zweite gewählte U-Wert von 0,20 W/(m<sup>2</sup>K) ergibt sich aus einem – aus heutiger Sicht – zukunftsfähigen Standard. Der angestrebte Wärmedurchgangswiderstand soll ein nachhaltiges und Energie einsparendes Bauen ermöglichen. Deswegen wurde der Standard „KFW-Effizienzhaus 55“ angestrebt. Dieser lässt für eine Außenwand einen maximalen Wärmedurchgangswiderstand von U = 0,20 W/(m<sup>2</sup>K) zu.<sup>36</sup>

<sup>31</sup> Vgl. Tuschinski 2023.

<sup>32</sup> Bundestag 08.08.2020, S. 14.

<sup>33</sup> DIN 4108-2, S. 14.

<sup>34</sup> Vgl. DIN 4108-2, S. 15.

<sup>35</sup> Bundestag 08.08.2020, S. 63.

<sup>36</sup> Vgl. KFW 2020, S. 1.

Trotz der gewählten, teils hohen, Standards wird eine möglichst schlanke Wandstärke angestrebt, sodass die Nutzfläche eines Gebäudes maximal ausfallen kann. Als Etappenziel werden dabei 40 cm Wandstärke angepeilt, welche im ersten Schritt durch die Dimension Dämmung und im zweiten Schritt durch die Dimension Lastabtrag angepasst werden sollen.

### Methodik

Für die in diesem Kapitel durchgeführten numerischen Untersuchungen, wurde auf ein vereinfachtes Berechnungsverfahren zurückgegriffen. Die folgenden wesentlichen Annahmen liegen den Berechnungen zugrunde:

1. Über die Rohdichte von Baustoffen lassen sich Rückschlüsse über die Wärmeleitfähigkeit treffen.
2. Die bauphysikalischen Eigenschaften von Verbundbaustoffen (z.B. Strohlehm) lassen sich rechnerisch über die bauphysikalischen Eigenschaften ihrer Bestandteile simulieren, wenn ihre prozentualen Anteile im Verbundbaustoff berücksichtigt werden (z.B. Eigenschaften von Stroh \* prozentualer Anteil + Eigenschaften von Lehm \* prozentualer Anteil = Eigenschaften von Strohlehm).

Die geschilderten Annahmen können immer nur in Kombination miteinander zu verlässlichen Ergebnissen führen. Die numerischen Untersuchungen bilden dadurch eine gute Entscheidungsgrundlage. Wesentliche Erkenntnisse müssen jedoch stets durch labortechnische Untersuchungen validiert werden.

### Leichtzuschläge

Damit die Lehmtafelbauweise die Anforderungen an den Wärmeschutz einhalten kann, muss der Lehm mit einem Zuschlagstoff kombiniert werden, welcher die bauphysikalischen Eigenschaften der Mischung deutlich verbessert. Mögliche Zuschlagstoffe sind Stroh, Zellulose, Flachs, Korkschrot, Holzgranulat, Schaumglasschotter oder Blähton. Im Folgenden sollen die genannten Dämmstoffe hinsichtlich ihrer Kosten, Wärmeleitfähigkeit, Umwelteinwirkungen, Verfügbarkeit, Brandverhalten und ihrem Verhalten unter Feuchtigkeitseinfluss analysiert werden, sodass im Anschluss eine engere Auswahl an geeigneten Leichtzuschlägen erstellt werden kann.

### Kosten

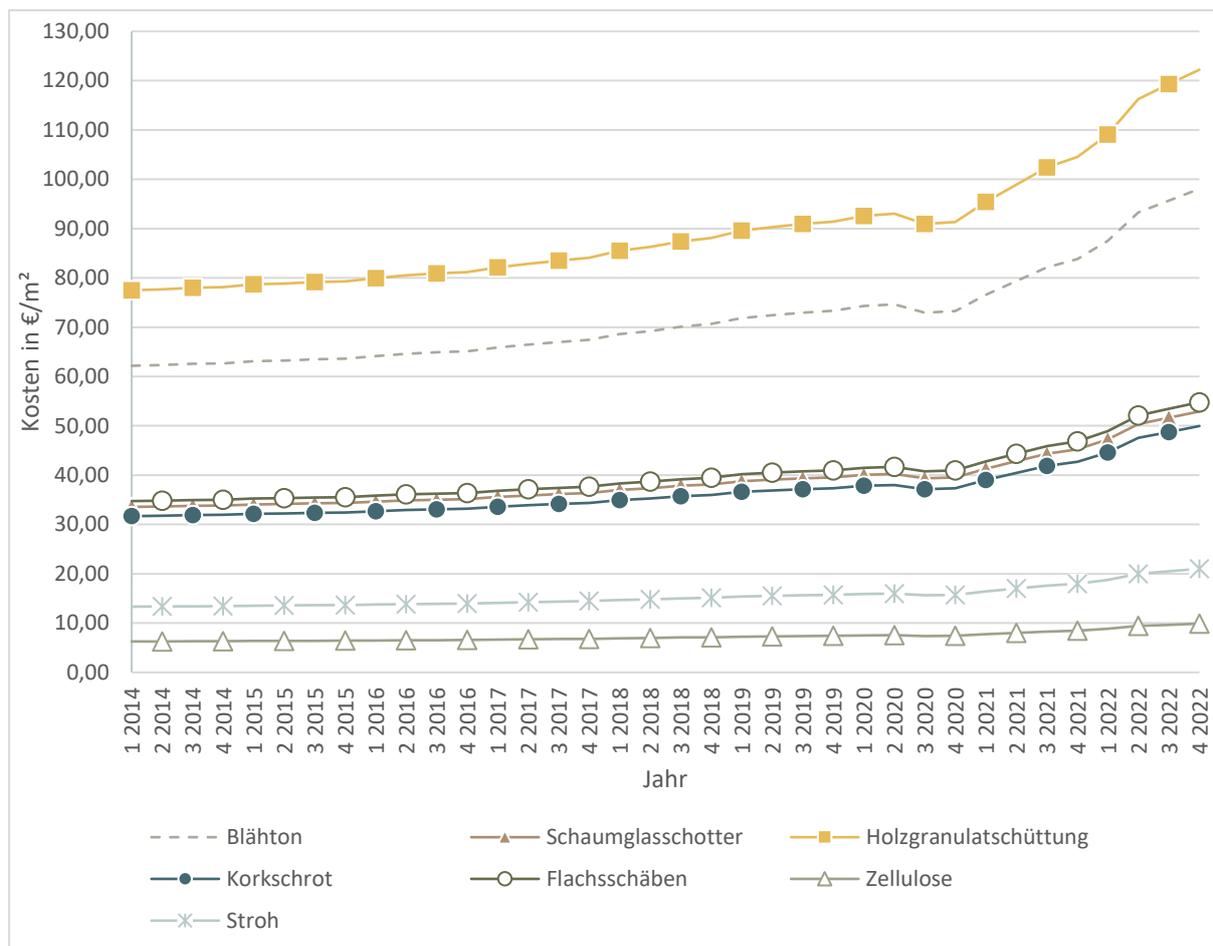
Um die Kosten von einzelnen Dämmstoffen vergleichen zu können, muss zunächst eine sinnvolle Bezugsgröße festgelegt werden. Im Bereich der Dämmstoffe bietet sich dabei ein gemeinsamer U-Wert (hier: 0,20 W/m<sup>2</sup>K) an. Dadurch wird dem potenziell größeren Materialeinsatz bei schlechterem Wärmedurchgangskoeffizienten Rechnung getragen und die Ergebnisse untereinander besser vergleichbar.

Grundlage für die folgenden Berechnungen bilden die vom IPeG-Institut zusammengestellten Dämmstofflisten aus dem Jahr 2014. Da die Kosten in der Zwischenzeit drastisch angestiegen sind, sind die dort vorgefundenen Werte zunächst nicht repräsentativ. Durch eine Angleichung an den Baupreisindex kann dennoch ein realistisches Preisniveau vermittelt werden.

„[d]er Baupreisindex [...] eine wichtige Kennzahl im Bereich der Baukostenplanung, die die zeitliche Entwicklung der Baupreise aufzeigt – immer gebunden an regelmäßig festgelegte Basisjahre.“<sup>37</sup>

Durch die Angleichung kann unabhängig von kurzweiligen Preisschwankungen, beispielsweise aufgrund politischer Ereignisse, eine gute Übersicht dargestellt werden. Demnach sind die einzelnen Kosten nicht als absolute Werte, sondern vielmehr als eine Tendenz der allgemeinen Baupreisentwicklung in Deutschland zu verstehen. Abbildung 2 zeigt die Preisentwicklung der oben genannten Dämmstoffe von Anfang 2014 bis Ende 2022.

Abbildung 2: Kostenentwicklung Dämmstoffe in €/m<sup>2</sup> bei einem U-Wert von 0,20 W/m<sup>2</sup>K



Quelle: eigene Anfertigung nach Daten vom IpeG Institut 2023

Während Zellulose (ca. 10 €/m<sup>2</sup>) und Stroh (ca. 21 €/m<sup>2</sup>) als sehr günstig einzustufen sind, ist eine Holzgranulatschüttung mit ca. 122 €/m<sup>2</sup> und Blähton mit ca. 98 €/m<sup>2</sup> als besonders kostenintensiv einzuschätzen. Die hohen Kosten für die Holzgranulatschüttung und den Blähton stehen in engem Zusammenhang mit ihrer geringen Wärmeleitfähigkeit, wodurch insgesamt mehr Material benötigt wird, um den geforderten U-Wert von 0,20 W/(m<sup>2</sup>K) zu erreichen.

<sup>37</sup> BKI 2023.

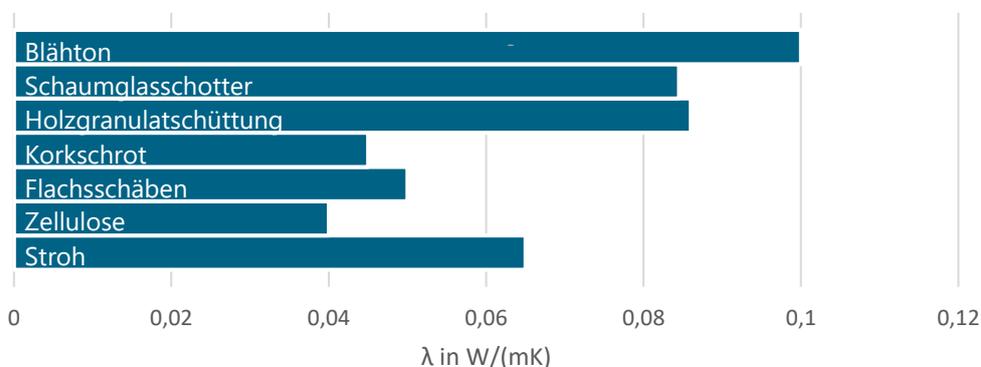
## Wärmeleitfähigkeit

„Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  gibt den Wärmestrom an, der bei einem Temperaturunterschied von 1 Kelvin durch eine 1 m<sup>2</sup> große und 1 m dicke Schicht eines Stoffes geht. [...] Je kleiner dieser Wert ist, umso besser ist das Dämmvermögen eines Baustoffs. [...]“<sup>38</sup>

Der Vergleich der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten soll Aufschluss über geeignete Dämmmaterialien geben. Abbildung 3 stellt die unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten grafisch dar.

Es wird deutlich, dass Zellulose ( $\lambda = 0,04$  W/(mK)) und Korkschröt ( $\lambda = 0,045$  W/(mK)) die besten Dämmeigenschaften aufweisen. Schaumglasschötter ( $\lambda = 0,08$  W/(mK)), Holzgranulatschüttung ( $\lambda = 0,09$  W/(mK)) und Blähton ( $\lambda = 0,10$  W/(mK)) schneiden bei diesem Vergleich am schlechtesten ab.

Abbildung 3 : Vergleich der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  von Leichtzuschlägen in W/(mK).



Quelle: eigene Anfertigung in Anlehnung an Daten vom IpeG - Institut GmbH 2014a, S. 1–5 und IpeG - Institut GmbH 2014b, S. 1

## Wasserdampfdiffusionswiderstand

Diffusion beschreibt im Allgemeinen den Ausgleich von unterschiedlichen Gaskonzentrationen zwischen unterschiedlichen Stoffen. Wassermoleküle wandern in einem Gasgemisch, beispielsweise in Luft, in Porenräume von Baustoffen. Dort bewegen sie sich immer zum Stoff mit der geringeren Feuchtigkeit, wobei verschiedene Stoffe den Wasserdampfmolekülen unterschiedlichen Widerstand entgegensetzen. Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu$  beschreibt den Quotienten aus Wasserdampfleitkoeffizient in Luft  $\delta_0$  und Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizient in einem Stoff  $\delta$ :<sup>39</sup>

$$\mu = \delta_0 / \delta \quad (3)$$

Luft hat die Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahl 1. Bei Stoffen mit einem Wert größer als 1 dauert das Ausdiffundieren einer bestimmten Wassermenge demnach um das Vielfache dieser Zahl länger.

<sup>38</sup> Schamoni 2021, S. 119.

<sup>39</sup> Vgl. DIN 4108-3, S. 9.

Tabelle 2: Vergleich der Wasserdiffusionswiderstände von unterschiedlichen Leichtzuschlägen.

Leichtzuschlag	Wasserdiffusionswiderstand $\mu$
Blähton	2 - 8
Schaumglasschotter	4,4
Holzgranulatschüttung	2 - 5
Korkschröt	2 - 8
Flachsschäben	1
Zellulose	1 - 2
Stroh	2 - 3

Quelle: eigene Anfertigung 2022 in Anlehnung an Daten vom IpeG - Institut GmbH 2014a, S. 1–5 und IpeG - Institut GmbH 2014b, S. 1

Betrachtet man die Werte aus Tabelle 2 wird deutlich, dass Flachs beispielsweise sehr schnell durchfeuchtet, gleichzeitig jedoch am schnellsten wieder trocknet. Blähton, Korkschröt oder Schaumglas setzen der Feuchtigkeit zwar einen größeren Widerstand entgegen, benötigen aber gleichzeitig mehr Zeit, um wieder zu trocknen.

## Brandschutz und Baustoffklasse

Baustoffe werden entsprechend ihrer Brenn- und Entflammbarkeit in verschiedene Baustoffklassen eingeteilt (vgl. Tabelle 3). Baustoffklasse A beinhaltet beispielsweise alle nichtbrennbaren Materialien. Baustoffe der Klasse B sind grundsätzlich brennbar und werden je nach Entflammbarkeit in drei Unterklassen unterschieden.

Tabelle 3: Übersicht Baustoffklassen nach DIN 4102-1.

Baustoffklasse	Bauaufsichtliche Benennung	Zugeordnete Leichtzuschläge
<b>A</b>		
A1	Nichtbrennbare Baustoffe	Blähton, Schaumglasschotter
A2		
<b>B</b>	Brennbare Baustoffe	
B1	Schwerentflammbare Baustoffe	Holzgranulatschüttung
B2	Normalentflammbare Baustoffe	Korkschat, Flachsschäben, Zellulose, Stroh
B3	Leichtentflammbare Baustoffe	

Quelle: eigene Anfertigung 2022 in Anlehnung an (DIN 4102-1), Daten vom IpeG - Institut GmbH 2014a, S. 1–5 & IpeG - Institut GmbH 2014b, S. 1

Blähton und Schaumglasschotter werden Baustoffklasse A1 zugeordnet und sind somit nicht entflammbar. Von den organischen Baustoffen wird nur das Holzgranulat als schwer entflammbar eingestuft. Alle anderen Dämmstoffe sind unter B2 gelistet und gelten damit als normal entflammbar.

## Umwelteinfluss

Die Evaluation des Umwelteinflusses soll Aufschluss darüber geben, welche Leichtzuschläge in das ökologische Konzept der Lehmtafelbauweise passen.

Die Informationen beziehen sich dabei auf eine Lebenszyklusbetrachtung, die innerhalb der Systemgrenzen A1 bis A3 (bis Produkt ab Werk) durchgeführt wird. Als Informationsquelle dienen die IBO-Richtwerte für Baumaterialien<sup>40</sup>, welche in der ÖNORM 8110-7<sup>41</sup> dokumentiert sind und für eine umfassende Bewertung der Umweltauswirkungen herangezogen werden können.

Darüber hinaus beziehen sich alle Werte stets auf 1 m<sup>2</sup> Bauteil mit einem U-Wert von 0,20 W/(m<sup>2</sup>K). Dadurch wird dem potenziell größeren Materialeinsatz bei schlechterem Wärmedurchgangskoeffizienten Rechnung getragen und die Ergebnisse untereinander besser vergleichbar.

Als Messinstrument für den Umwelteinfluss werden dabei die Umweltindikatoren des nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarfs (PE<sub>nr</sub>) und des Treibhausgaspotenzials (GWP) herangezogen.

<sup>40</sup> Vgl. baubook Zentrale 2023.

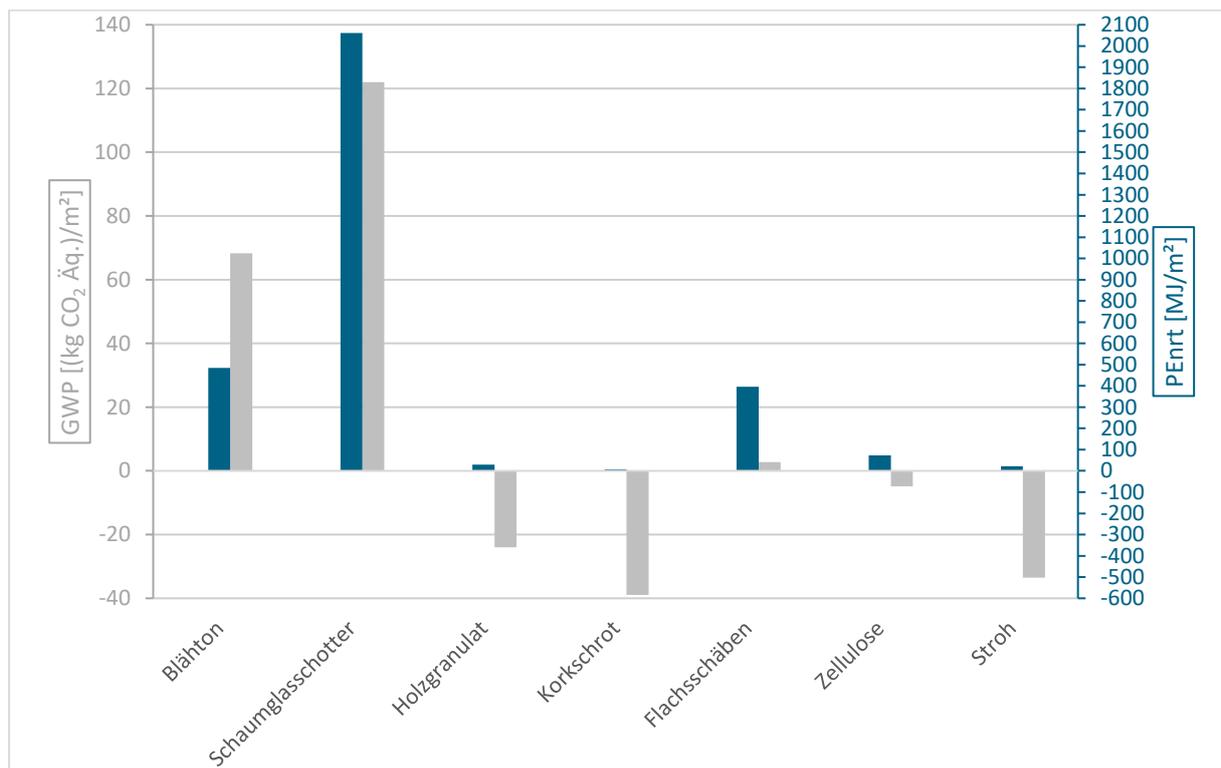
<sup>41</sup> Vgl. ÖNORM B 8110-7.

„Der totale nicht-erneuerbare Primärenergiebedarf (PENRT) ist eine Kategorie der Wirkungsabschätzung der Ressourceninanspruchnahme im Zuge einer Ökobilanz. [...] Der totale nicht-erneuerbare Primärenergiebedarf wird in Megajoule oder Kilowattstunde pro funktioneller Einheit des Produktes angegeben.“<sup>42</sup>

„Das Treibhauspotenzial (Global warming potential/GWP) oder CO<sub>2</sub>-Äquivalent einer chemischen Verbindung ist eine Maßzahl für den relativen Effekt des Beitrags zum Treibhauseffekt. Sie gibt also an, wie viel eine festgelegte Masse eines Treibhausgases zur globalen Erwärmung beiträgt. Als Vergleichswert dient Kohlenstoffdioxid [...]. Der Wert beschreibt die mittlere Erwärmungswirkung über einen bestimmten Zeitraum, oft werden 100 Jahre betrachtet.“<sup>43</sup>

Abbildung 4 zeigt eine Gegenüberstellung einer Auswahl an Dämmstoffen hinsichtlich des Primärenergiebedarfs (PENrt) und des Treibhausgaspotenzials (GWP) pro Quadratmeter Dämmfläche.

Abbildung 4: Vergleich der Umwelteinwirkung von Leichtzuschlägen bezogen auf 1 m<sup>2</sup> Dämmfläche bei einem U-Wert von 0,2 W/(m<sup>2</sup>K).



Quelle: eigene Anfertigung 2022 nach IBO-Richtwerten (OENORM B 8110-7).

Es fällt auf, dass bei der Herstellung von Schaumglasschotter ein markanter nichterneuerbarer Primärenergiegehalt sowie ein hohes GWP vorliegen. Im Gegensatz dazu weisen Holzgranulat, Korkschröt und Stroh ein geringeres GWP auf, da sie als organische Dämmstoffe CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre binden können.

<sup>42</sup> CAALA 2023.

<sup>43</sup> Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) 2019, S. 83.

Korkschröt verursacht die geringste nichterneuerbare Primärenergie [-38,88 (kg CO<sub>2</sub> Äq.)/m<sup>2</sup>], was unter anderem daran liegt, dass Korkdämmstoffe in Deutschland oftmals aus recyceltem Altkork hergestellt werden, wodurch viel Energie eingespart werden kann.<sup>44</sup>

Flachsschäben weisen einen vergleichsweise hohen nichterneuerbaren Primärenergiegehalt auf, was vor allem auf den Import aus dem europäischen Ausland zurückzuführen ist.<sup>45</sup> Grundsätzlich handelt es sich jedoch um eine sehr anspruchslose Pflanze, die keine besonderen Anforderungen an Böden oder klimatische Gegebenheiten stellt und somit prinzipiell deutschlandweit problemlos kultiviert werden kann.<sup>46</sup>

## Wasserabweisende Wirkung

Die wasserabweisende Wirkung von Baustoffen bezieht sich auf ihre Fähigkeit, Wasser zu widerstehen oder abzuweisen. Dies ist wichtig, um zu verhindern, dass Feuchtigkeit in den Baustoff eindringt und dort Schäden verursacht. Ein wasserabweisender Baustoff sollte somit in der Lage sein, Wasser von der Oberfläche abzulenken und es nicht in den Baustoff eindringen zu lassen.

Es gilt jedoch zu beachten, dass ein Baustoff, der wasserabweisend ist, nicht zwangsläufig auch wasserdicht ist. Gegebenenfalls müssen zusätzliche Maßnahmen ergriffen werden, um einen vollständigen Schutz gegen Feuchtigkeit zu gewährleisten. Abbildung 5 ordnet die betrachteten Leichtzuschläge ihren wasserabweisenden Eigenschaften zu.

Abbildung 5: Wasserabweisende Wirkung von Leichtzuschlägen.

nicht Wasserabweisend	Wasserabweisend	bedingt Wasserabweisend
Blähton, Holzgranulatschüttung, Flachsschäben, Zellulose	Schaumglasschotter, Korkschröt	Baustrohballen

Quelle: eigene Anfertigung 2022 in Anlehnung an Daten des IpeG - Institut GmbH 2014a, S. 1–5 und IpeG - Institut GmbH 2014b, S. 1

Für die Entwicklung der Lehmtafelbauweise wird ein möglichst wasserabweisender Zuschlag bevorzugt, sodass die hygroskopischen Eigenschaften des Lehms nicht mit den Eigenschaften des Dämmzuschlags kollidieren und zu bautechnischen Problemen, beispielsweise durch Quellen, führen.

<sup>44</sup> Vgl. Kork-Deko 2023.

<sup>45</sup> Vgl. Fölster und Michaeli 1993, S. 687.

<sup>46</sup> Vgl. Fölster und Michaeli 1993, S. 687.

## Zusammenfassung

Tabelle 4 fasst die Ergebnisse wertend zusammen. Besonders gute Werte wurden dabei grün markiert und schlechte Werte in Rot.

Tabelle 4: Zusammenfassende Übersicht der Materialeigenschaften von ausgewählten Leichtzuschlägen

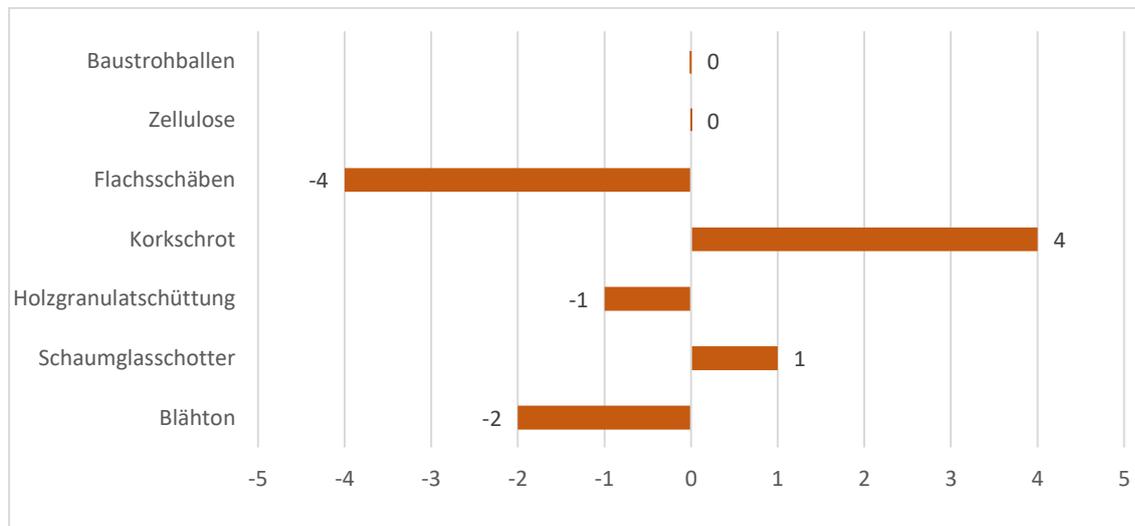
Leichtzuschlag	Kosten in €/m <sup>2</sup> bei einem U-Wert von 0,20 W/(m <sup>2</sup> K)	Wärmeleitfähigkeit λ in W/(mK)	Wasserdampfdiffusionswiderstand μ	Brandschutz / Baustoffklasse	Umwelteinwirkung 1 m <sup>2</sup> Bauteil bei einem U-Wert von 0,20 W/(m <sup>2</sup> K) bis Produkt ab Werk (A1-A3)		Wasserabweisende Wirkung
					GWP-total in kgCO <sub>2</sub> Äq./m <sup>2</sup>	PENRT in MJ/m <sup>2</sup>	
Blähton	98,06	0,1	2 - 8	A1	68,28	484,55	Nein
Schaumglasschotter	52,54	0,08 – 0,089	4,4	A1	121,97	2061,36	Ja
Holzgranulatschüttung	122,23	0,078 – 0,094	2 - 5	B1	-24,02	29,57	Nein
Korkschrot	49,96	0,04 – 0,05	2 - 8	B2	-38,88	7,37	Ja
Flachsschäben	54,78	0,05	1	B2	2,73	395,64	Nein
Zellulose	9,89	0,04	1 --2	B2	-4,89	73,44	Nein
Baustrohballen	21,01	0,05 – 0,08	2 - 3	B2	-33,51	21,47	bedingt

Quelle: eigene Anfertigung 2023 in Anlehnung an Daten vom IpeG - Institut GmbH 2014a, S. 1–5, IpeG - Institut GmbH 2014b, S. 1 und (OENORM B 8110-7).

Im Bereich der Kosten, Wärmeleitfähigkeit, Wasseraufnahme und Feuerbeständigkeit weisen Schaumglasschotter, Korkschröt und Zellulose die besten Eigenschaften auf. Unter zusätzlicher Betrachtung der Umwelteinwirkungen, hebt sich der organische Leichtzuschlag Kork signifikant von diesen ab.

Abbildung 6 stellt eine numerische Aufbereitung der Evaluation dar. Dabei wurden alle Zellen der Tabelle 4 mit einer Zahl hinterlegt (farblos = 0; grün = 1; rot = -1) und anschließend die Summe berechnet. Insgesamt sind bei diesem Vorgehen Werte zwischen -7 (nicht geeignet) und +7 (sehr geeignet) möglich. Anhand dieser Berechnung stellen sich Korkschröt, Schaumglasschotter, Zellulose und Baustrohballen als besonders geeignet heraus. Holzgranulatschüttung, Blähton und Flachsschäben weisen einen negativen Wert auf, wodurch diese Leichtzuschläge zunächst nicht in Frage kommen.

Abbildung 6: Evaluation der Eignung für Lehmtafelbauweise



Quelle: eigene Anfertigung 2022

Basierend auf diesen Betrachtungen wird im Folgenden eine Auswahl an ökologischen, organischen Leichtzuschlägen vorgestellt, welche den Wärmedurchgangswiderstand des Lehmtafelbauteils verbessern und gleichzeitig den hohen Anforderungen der Bauphysik und Ökologie gerecht werden können.

### Ökologische Zuschlagstoffe

Für die durchgeführten Berechnungen wurden für den Baustoff Lehm die in Tabelle 5 aufgelisteten physikalischen Kenngrößen verwendet.

Tabelle 5: Physikalische Kenngrößen Stampflehm (Claytec).

Kenngröße	Einheit	Wert
Nennwert Wärmeleitfähigkeit $\lambda_D$	W/(m K)	1,5
Bemessungswert Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	W/(m K)	1,8
Trockenrohddichte	kg/m <sup>3</sup>	2.300
Rohddichte loses Gemisch	kg/m <sup>3</sup>	1.500
Körnung	mm	0 - 16
Schwindmaß Natur	%	0,5
Druckfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>	2,0
Feuchtigkeitsgehalt (Erdfeucht)	%	8 - 12

Quelle: eigene Anfertigung 2022 nach Informationen von Claytec, S. 2

## Korkgranulat

Kork ist ein natürlicher Rohstoff, welcher aus der Bastschicht der Korkeiche gewonnen werden kann.<sup>47</sup> Diese innere Schicht der Rinde wächst bei der Korkeiche schneller als bei anderen Baumarten und kann mehrere Zentimeter dick werden.<sup>48</sup> Damit schützt die Bastschicht den Baum vor übermäßiger Hitze und somit vor dem Verlust von zu viel Wasser. Die Korkschiicht besteht überwiegend aus Zellulose, dem Harz Suberin und Wachs.<sup>49</sup> Sobald eine Korkeiche 25 bis 30 Jahre alt ist, kann die Korkschiicht das erste Mal geschält werden.<sup>50</sup> Dieser Prozess kann alle 7 bis 10 Jahre wiederholt werden.<sup>51</sup> Das bedeutet, dass für die Gewinnung von Kork kein Baum gefällt werden muss.

Zusammenfassend bildet Kork also die natürliche Dämmung der Korkeiche, wodurch es naheliegend ist, ihr Potenzial auch im Bausektor zu nutzen. Um Kork zur Dämmung von Gebäuden verwenden zu können, wird zunächst die geschälte Rinde mechanisch zerkleinert, wodurch Korkschirot entsteht.<sup>52</sup> Dieses Schrot, auch Naturkorkschirot genannt, kann anschließend als Granulat zur Dämmung verwendet werden.<sup>53</sup> Eine Weiterverarbeitung zu Blähkork oder Korkplatten ist ebenfalls möglich.

Aus ökologischer Sicht erfüllt Korkschirot als Dämmmaterial einen hohen Standard. Eine Übernutzung der Korkeichenbestände sollte jedoch vermieden werden. Da sich Kork gut recyceln lässt, könnten beispielsweise auch benutzte Flaschenkorken gemahlen und als Dämmstoff verwendet werden. Dadurch würden sich die umwelttechnischen Auswirkungen nochmals minimieren. Gerade bei expandiertem Kork sollte auf die Temperaturzufuhr geachtet werden, da durch zu viel Hitzeeinwirkung bei diesem Prozess polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoff (PAK) ausgasen kann.<sup>54</sup> Im Zuge der Forschung wurde auf naturbelassenes, feines Korkgranulat zurückgegriffen, welches einen minimalen ökologischen Fußabdruck aufweist. Tabelle 6 zeigt die wesentlichen physikalischen Kenngrößen für Korkgranulat.

Tabelle 6: Physikalische Kenngrößen Korkgranulat Dämmung.

Kenngröße	Einheit	Wert
Nennwert Wärmeleitfähigkeit $\lambda_D$	W/(m K)	0,037 bis 0,050
Bemessungswert Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	W/(m K)	0,057
Spezifische Wärmekapazität	J/(kg K)	1.700 bis 2.100
Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>	120 bis 140
Granulat Abmessungen	mm	1 - 2

Quelle: eigene Anfertigung 2022 nach Informationen Kork-Deko 2023

<sup>47</sup> Vgl. Willems und Schild 2019, S. 85.

<sup>48</sup> Vgl. Willems und Schild 2019, S. 85.

<sup>49</sup> Vgl. Willems und Schild 2019, S. 85.

<sup>50</sup> Vgl. Willems und Schild 2019, S. 85.

<sup>51</sup> Vgl. Willems und Schild 2019, S. 85.

<sup>52</sup> Vgl. Willems und Schild 2019, S. 85.

<sup>53</sup> Vgl. Willems und Schild 2019, S. 85.

<sup>54</sup> Vgl. Willems und Schild 2019, S. 86.

## Einschichtiges Bauteil

Im Folgenden soll die Realisierbarkeit eines einschichtigen Bauteils (vgl. Abbildung 7) untersucht werden. Das einschichtige Bauteil wird so konzipiert, dass keine eigene Dämmschicht notwendig ist. Die vorhandene Schicht erfüllt gleichermaßen die Funktion der Wärmedämmung und des Lastabtrags. Um dies zu erreichen, wird dem Stampflehm gleichmäßig über das Bauteil verteilt Korkgranulat beigemischt.

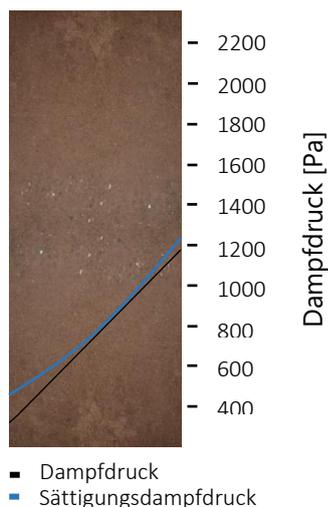
Abbildung 7: Schematische Skizze einschichtiges Bauteil.



Quelle: eigene Anfertigung 2023

Einschichtige Bauteile bringen den wesentlichen Vorteil einer einfachen Fertigung mit sich. Darüber hinaus muss ausschließlich ein Lehm-Kork-Gemisch hergestellt werden, wodurch die Abläufe der Vorfertigung letztendlich beschleunigt und vereinfacht werden können. Auch die kraftschlüssige Verbindung von mehreren Bauteilschichten aus Lehm stellt eine Herausforderung dar, welche durch ein monolithisches Bauteil umgangen werden kann. Zuletzt lässt sich noch die Vermeidung von Tauwasseranfall als Vorteil aufzählen (vgl. Abbildung 8).

Abbildung 8: Einschichtiges Bauteil - Tauwasser.



Quelle: eigene Anfertigung 2022 in Anlehnung an ubakus 2023

Auf der anderen Seite wird ein einschichtiges Bauteil niemals die Schlankheit eines mehrschichtigen Bauteils erreichen, da der Korkanteil im einschichtigen Bauteil stark durch die geforderte Tragfähigkeit limitiert wird.

Bei dieser Untersuchung wird zunächst primär auf den Wärmedurchgangskoeffizienten Bezug genommen. Erst im Kapitel „Festigkeit“ ab Seite 64 werden die Ergebnisse durch Druckfestigkeitsuntersuchungen validiert. Anhand der Kenngrößen aus Tabelle 5 (vgl. S. 34) und Tabelle 6 (vgl. S. 35) werden die minimalen Wandstärken berechnet, welche benötigt werden, um einen U-Wert von  $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  beziehungsweise  $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  zu erreichen.

### Wärmedurchgangskoeffizient $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Im ersten Schritt wird, anhand der Kenngrößen aus Tabelle 6, die benötigte Bauteilstärke für eine monolithische Wand berechnet. Dafür wird zunächst definiert, wie viel Kork in das Bauteil eingebracht werden muss, um einen U-Wert von  $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  zu erreichen.

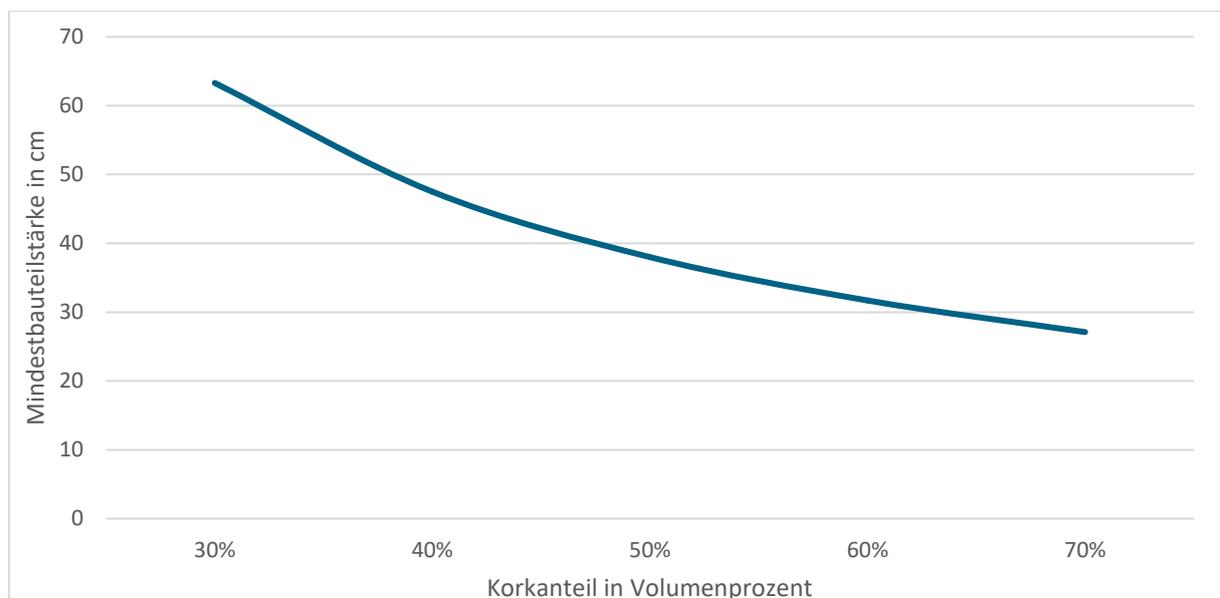
$$U = \frac{1}{\frac{d}{\lambda} + R_{si} + R_{se}} \quad [W/m^2K] \quad (4)$$

$$d = \left( \frac{1}{0,28 \frac{W}{m^2K}} - R_{si} - R_{se} \right) \cdot \lambda = \left( \frac{1}{0,28 \frac{W}{m^2K}} - 0,13 \frac{m^2K}{W} - 0,04 \frac{m^2K}{W} \right) \cdot 0,057 \frac{W}{mK}$$

$$d = 0,19 \text{ m}$$

Die obenstehende Berechnung zeigt, dass insgesamt 19 cm reine Korkgranulat-Dämmung ausreichen, um einen U-Wert von  $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  zu erreichen. In Abbildung 9 werden die daraus resultierenden Mindestbauteilstärken in Abhängigkeit des spezifischen Korkgehalts in cm angegeben.

Abbildung 9: Mindestbauteilstärke eines monolithischen Bauteils in cm in Abhängigkeit seines Korkgehalts bei einem U-Wert von  $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .



Quelle: eigene Anfertigung 2022

Während ein Korkanteil von 30 Volumenprozent eine Mindestbauteilstärke von 63 cm erfordert, sinkt die Bauteilstärke bei 40 Volumenprozent bereits auf 47,5 cm. Da bereits in diesem Schritt die

lasttragende Funktion des monolithischen Bauteils bedacht werden muss, sollte unter der Annahme, dass mit steigendem Korkgehalt die Druckfestigkeit des Bauteils abnimmt, ein möglichst geringer Korkanteil für die weiteren Betrachtungen gewählt werden.

Im Folgenden soll deshalb mit einem Korkanteil von 30 Volumenprozent gerechnet werden. In Abhängigkeit von der Druckfestigkeit könnte der Korkanteil nachträglich, zugunsten eines schlankeren Bauteils, auf 40 Volumenprozent hochskaliert werden.

Erstellt man aus den gegebenen Kenngrößen ein exemplarisches Musterbauteil, so genügt eine Bauteilstärke von 60 cm (42 cm reiner Stampflehm; 18 cm reine Korkdämmung), um den angestrebten U-Wert von  $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  zu erreichen (vgl. Abbildung 9).

$$U = \frac{1}{\frac{d}{\lambda} + \frac{d}{\lambda} + R_{si} + R_{se}} \quad [\text{W}/\text{m}^2\text{K}] \quad (5)$$

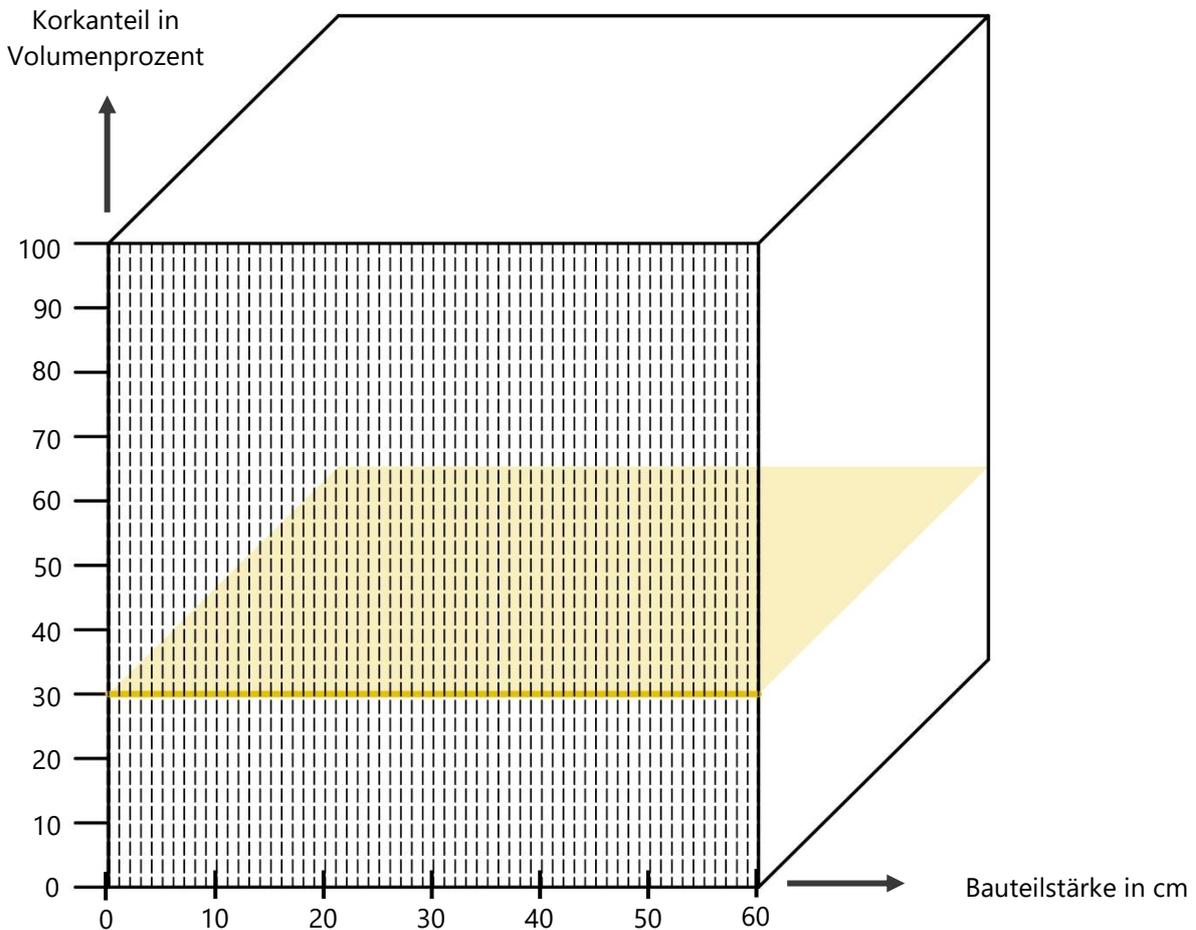
$$U = \frac{1}{\frac{0,18 \text{ m}}{0,057 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} + \frac{0,42 \text{ m}}{1,8 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} + 0,13 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} + 0,04 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}} = 0,28 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \leq 0,28 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Die obenstehende Berechnung zeigt, dass insgesamt 30 % Korkanteil (Volumenprozent) ausreichen würden, um die Lehmtafel als monolithisches Bauteil zu fertigen. Abbildung 10 stellt den Aufbau des Bauteils vereinfacht dar.

Der dargestellte Würfel hat eine Kantenlänge von 60 cm und ist in horizontaler Richtung in 1 cm große Abschnitte gegliedert. In vertikaler Richtung wird der angestrebte Korkanteil in Volumenprozent, auf einer Skala von 0 % – 100 %, dargestellt.

Die gelbe Linie zeigt somit für jede Schicht den spezifischen Korkanteil. Da es sich bei dem Bauteil um ein einschichtiges, monolithisches Bauteil handelt, liegt der Korkanteil über das gesamte Bauteil hinweg bei 30 %.

Abbildung 10: Diagramm zur vereinfachten Darstellung des prozentualen Korkanteils in einem einschichtigen Bauteil mit 60 cm Stärke und einem U-Wert von 0,28 W/(m²K).



Quelle: eigene Anfertigung 2022

### Wärmedurchgangskoeffizient 0,20 W/(m²K)

Im nächsten Schritt wird anhand der Kenngrößen aus Tabelle 6 die benötigte Bauteilstärke, für ein einschichtiges Bauteil, berechnet. Dafür wird zunächst definiert, wie viel Kork in das Bauteil eingebracht werden muss, um einen U-Wert von 0,20 W/(m²K) zu erreichen.

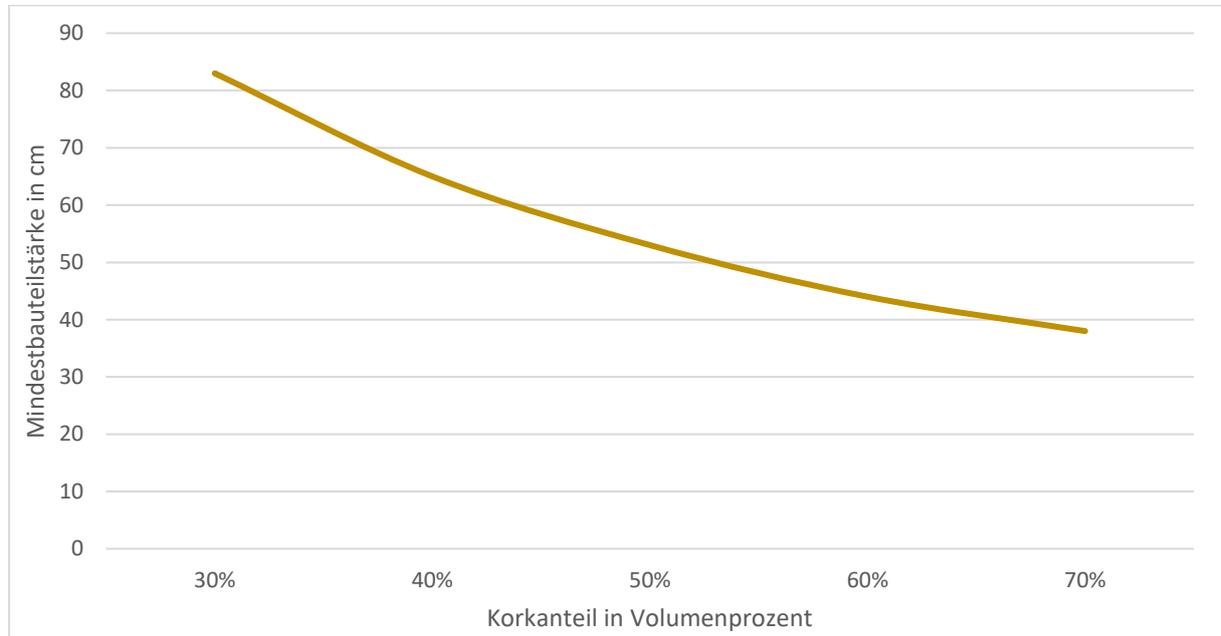
$$U = \frac{1}{\frac{d}{\lambda} + R_{si} + R_{se}} \quad [W/m^2K] \quad (6)$$

$$d = \left( \frac{1}{0,20 \frac{W}{m^2K}} - R_{si} - R_{se} \right) \cdot \lambda = \left( \frac{1}{0,20 \frac{W}{m^2K}} - 0,13 \frac{m^2K}{W} - 0,04 \frac{m^2K}{W} \right) \cdot 0,057 \frac{W}{mK}$$

$$d = 0,28 \text{ m}$$

Obenstehende Berechnung zeigt, dass insgesamt 28 cm reine Korkgranulat-Dämmung notwendig sind, um einen U-Wert von  $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  zu erreichen. In Abbildung 11 werden die daraus resultierenden Mindestbauteilstärken in Abhängigkeit des spezifischen Korkgehalts angegeben.

Abbildung 11: Mindestwandstärke eines monolithischen Bauteils in Abhängigkeit seines Korkgehalts bei einem U-Wert von  $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .



Quelle: eigene Anfertigung 2022

Um einen U-Wert von  $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  zu erreichen, müsste ein einschichtiges Bauteil mit 30 % Korkgehalt etwa 83 cm stark sein. Bei 40 % Korkgehalt würden bereits 65 cm ausreichen. Erst bei 50 % Korkanteil würde sich das Bauteil, mit einer Stärke von 53 cm, an eine umsetzbare Bauteilstärke annähern.

Bereits zu diesem Stand der Forschung lässt sich ein Lehm-Korkgemisch mit einem Mischverhältnis von 1:1 (nach Volumen) als nicht lasttragend einstufen. Damit soll die Option eines einschichtigen Bauteils, zum Erreichen eines U-Werts von  $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , ausgeschlossen werden.

## Zweischichtiges Bauteil

In diesem Kapitel soll die Realisierbarkeit eines zweischichtigen Bauteils (vgl. Abbildung 12) untersucht werden. Das zweischichtige Bauteil wird so konzipiert, dass es für den Lastabtrag und die Wärmedämmung jeweils eine eigene Schicht gibt. Nach der Funktion der Schicht richtet sich dann der jeweilige Korkgehalt. Während die lasttragende Schicht nur einen kleinen Anteil an Kork enthalten kann, um ihre Funktion zu erfüllen, kann in die Wärmedämmende Schicht ein deutlich größerer Korkanteil eingebracht werden. Die Wärmedämmende Schicht muss ausschließlich die Anforderung selbsttragend erfüllen, was sich positiv auf die Gesamtbauteilstärke auswirkt.

Abbildung 12: Schematische Skizze zweischichtiges Bauteil.



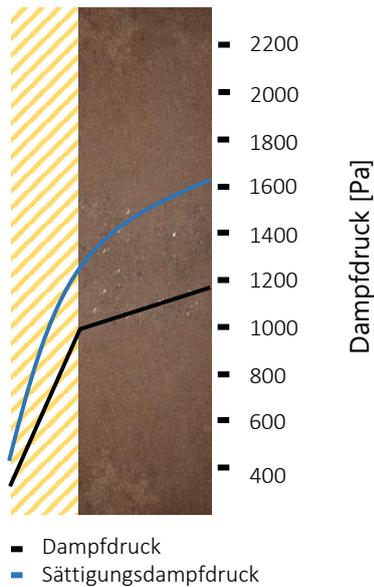
Quelle: eigene Anfertigung 2022

Das zweischichtige Bauteil ist in seiner Fertigung wesentlich komplexer als das einschichtige Bauteil. Je nach Ausführung müssen zwischen zwei und fünf unterschiedliche Lehm-Kork-Mischungen hergestellt werden. Diese Gemische müssen im nächsten Schritt in eine geteilte Schalung eingefüllt werden, um diese abschließend kraftschlüssig zu verdichten. Durch eine vollautomatische Vorfertigung könnte dieser Produktionsschritt zeit- und kosteneffizient durchgeführt werden. Die kraftschlüssige Verbindung von der Trag- zur Dämmschicht stellt bei diesem Aufbau eine wesentliche Herausforderung dar.

Gleichzeitig sind durch den Aufbau schlankere Wandquerschnitte möglich als beispielsweise bei einer einschichtigen Wand. Durch den beschriebenen Aufbau gibt es nur eine lasttragende Schicht, welche anfallende Kräfte, in Bezug auf ihre Knicklänge, günstig aufnehmen und weiterleiten kann.

Eine weitere Herausforderung ist die Gestaltung der Wandaußenflächen. Aus bauphysikalischer Sicht ist, zur Vermeidung von Tauwasser, ausschließlich eine Außendämmung sinnvoll (vgl. Abbildung 13). Das bedeutet jedoch auch, dass die Außenwandfläche stets die potenziell empfindlichere Dämmschicht ist. Dies ist gerade beim Transport, Zusammenfügen und bei der Witterungsbeständigkeit (inkl. Abriebfestigkeit) frühzeitig zu beachten.

Abbildung 13: Zweischichtiges Bauteil - Tauwasser.



Quelle: eigene Anfertigung 2022 in Anlehnung an ubakus 2023

Zuletzt soll noch erwähnt werden, dass bei einem zweischichtigen Bauteil eine Sichtqualität vor allem im Innenraum möglich ist. Unverkleidete Sichtfassaden lassen sich nicht als monolithisches Bauteil erstellen.

Bei den folgenden Untersuchungen wird zunächst primär auf den Wärmedurchgangskoeffizienten Bezug genommen. Erst im Kapitel „Festigkeit“ ab Seite 64 werden die Ergebnisse durch Druckfestigkeitsuntersuchungen validiert. Anhand der Kenngrößen aus Tabelle 6 (vgl. S. 35) werden die minimalen Wandstärken berechnet, welche benötigt werden, um einen U-Wert von  $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  beziehungsweise  $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  zu erreichen.

### Wärmedurchgangskoeffizient $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Zu Beginn wird die notwendige Stärke des Bauteils für eine zweischichtige Wand, basierend auf den Kennwerten in Tabelle 6, berechnet. Hierfür wird bestimmt, welche Menge an Kork eingebracht werden muss, um einen U-Wert von  $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  zu erzielen.

$$U = \frac{1}{\frac{d}{\lambda} + R_{si} + R_{se}} \quad [\text{W}/\text{m}^2\text{K}] \quad (7)$$

$$d = \left( \frac{1}{0,28 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}} - R_{si} - R_{se} \right) \cdot \lambda = \left( \frac{1}{0,28 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}} - 0,13 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} - 0,04 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right) \cdot 0,057 \frac{\text{W}}{\text{m K}}$$

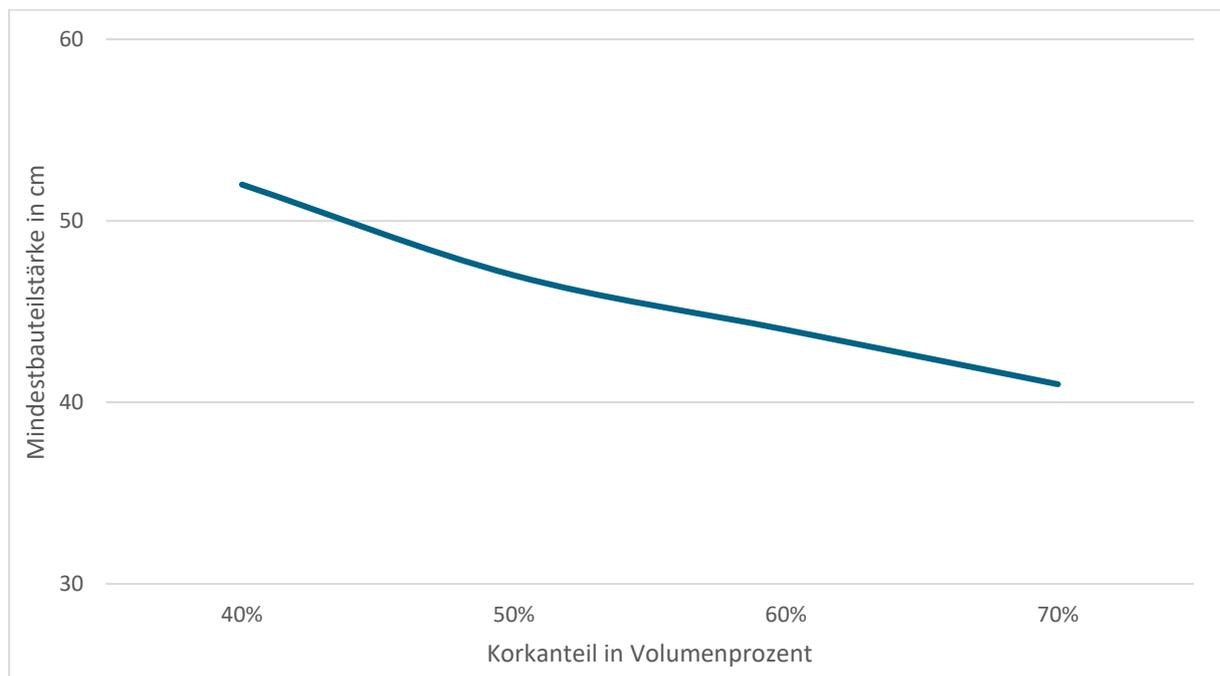
$$d = 0,19 \text{ m}$$

Wie bereits beim einschichtigen Bauteil errechnet, müssen auch hier 19 cm reine Korkgranulat-Dämmung in das Bauteil eingebracht werden, um einen U-Wert von  $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  zu erreichen. Anders als beim einschichtigen Bauteil lassen sich die 19 cm Kork, auf zwei Schichten (Trag- und Dämmschicht) mit unterschiedlichem Korkgehalt verteilen, wodurch neue Mindestbauteilstärken abgeleitet werden können.

In Abbildung 14 werden die resultierenden Mindestbauteilstärken in Abhängigkeit des spezifischen Korkgehalts der Dämmschicht angegeben. Für die tragende Bauteilschicht wird von einem konstanten Korkgehalt von 30 Volumenprozent ausgegangen. Zur besseren Vergleichbarkeit untereinander, wurde die Tragschicht außerdem auf eine einheitliche Stärke von 25 cm festgesetzt.

Durch labortechnische Versuche könnte die Stärke der lasttragenden Schicht nachträglich noch optimiert und angepasst werden. Auch eine Skalierung des Korkanteils der lasttragenden Schicht von beispielsweise 30 % auf 40 % ist, in Abhängigkeit von der jeweiligen Druckfestigkeit, eine Möglichkeit zur nachträglichen Bauteiloptimierung.

Abbildung 14: Mindestwandstärke eines zweischichtigen Bauteils in Abhängigkeit des Korkgehalts der Dämmschicht bei einem U-Wert von 0,28 W/(m<sup>2</sup>K).



Quelle: Eigene Anfertigung

Für die folgenden Berechnungen wird für die dämmende Schicht ein Korkanteil von 60 Volumenprozent und für die Tragschicht ein Korkanteil von 30 Volumenprozent angenommen.

Erstellt man aus den gegebenen Kenngrößen ein exemplarisches Musterbauteil, so genügt eine Bauteilstärke von 44 cm (ca. 25 cm reiner Stampflehm; 19 cm reine Korkdämmung), um den angestrebten U-Wert von 0,28 W/(m<sup>2</sup>K) zu erreichen (vgl. Abbildung 14).

$$U = \frac{1}{\frac{d}{\lambda} + \frac{d}{\lambda} + R_{si} + R_{se}} \quad [W/m^2K] \quad (8)$$

$$U = \frac{1}{\frac{0,189 \text{ m}}{0,057 \frac{W}{mK}} + \frac{0,251 \text{ m}}{1,8 \frac{W}{mK}} + 0,13 \frac{m^2K}{W} + 0,04 \frac{m^2K}{W}} = 0,276 \frac{W}{m^2K} \leq 0,28 \frac{W}{m^2K}$$

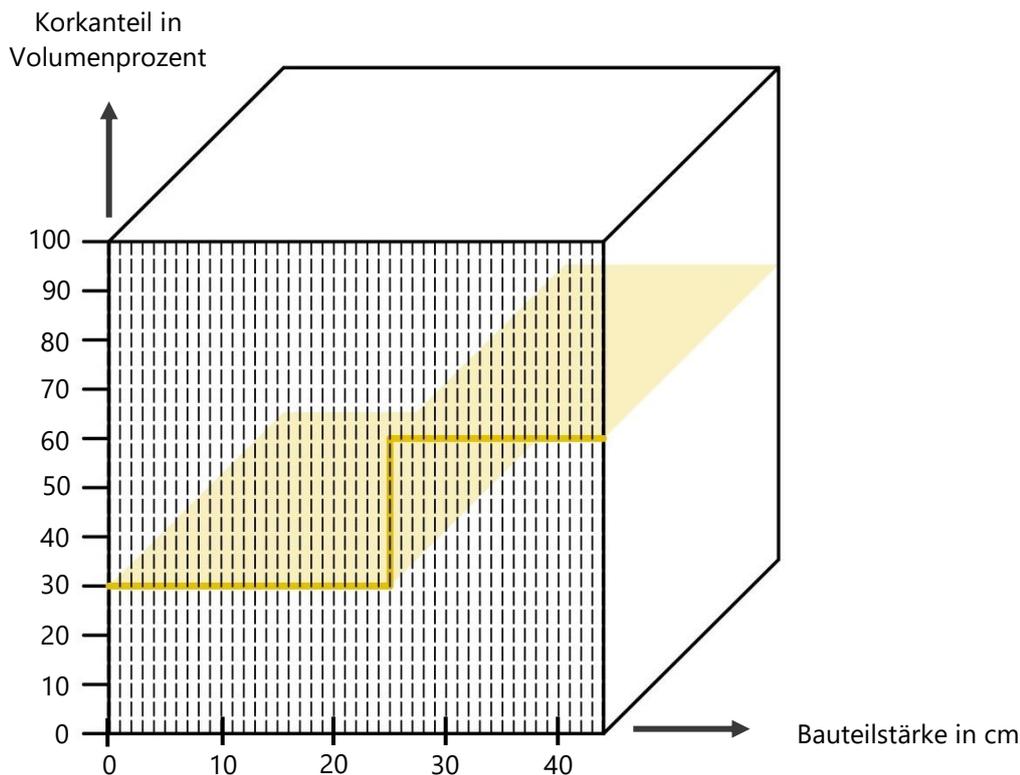
Die obenstehende Berechnung zeigt, dass insgesamt 30 % Korkanteil in der lasttragenden Schicht und 60 % Korkanteil in der wärmedämmenden Bauteilschicht (Volumenprozent) ausreichen würden, um die

Lehmtafel als zweischichtiges Bauteil mit einer Stärke von 44 cm zu fertigen. Abbildung 15 (S. 44) stellt den Aufbau des Bauteils vereinfacht dar.

Der dargestellte Würfel hat eine Kantenlänge von 44 cm und ist in horizontaler Richtung in 1 cm große Abschnitte gegliedert. In vertikaler Richtung wird der angestrebte Korkanteil für die lasttragende und wärmedämmende Bauteilschicht in Volumenprozent, auf einer Skala von 0 % – 100 %, dargestellt.

Die gelbe Linie zeigt somit für jede Schicht den spezifischen Korkanteil. Auf der linken Seite befindet sich die Wandinnenseite mit der Tragschicht (30 % Korkanteil), auf der rechten Seite die Wandaußenseite mit der Dämmschicht (60 % Korkanteil).

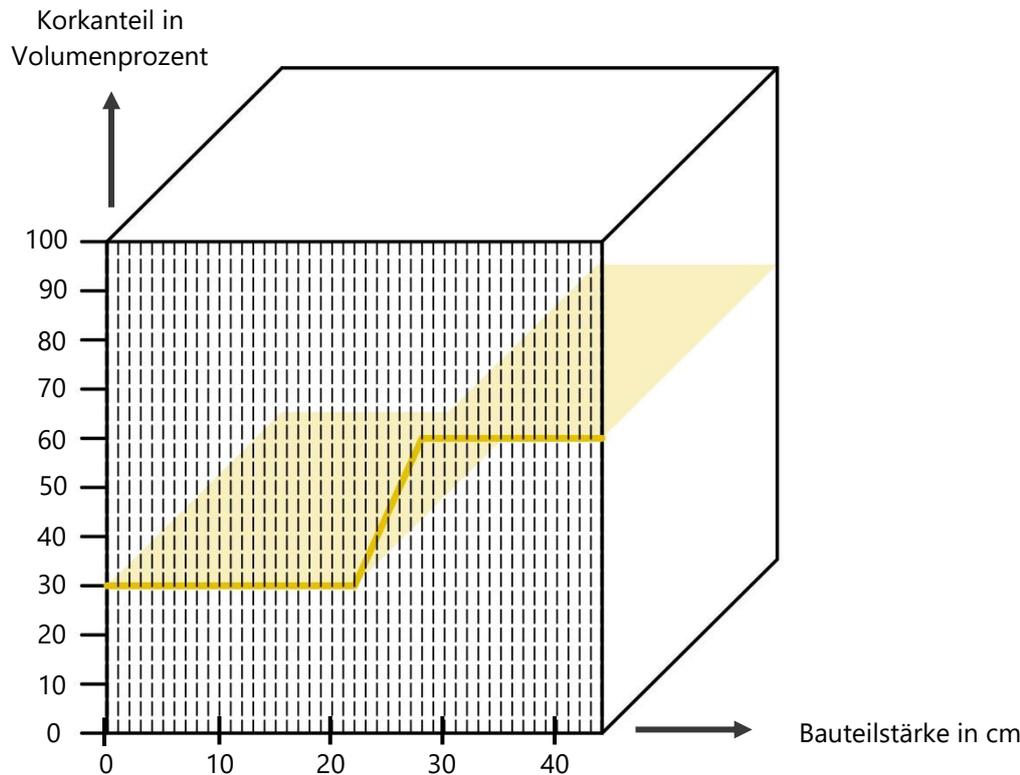
Abbildung 15: Diagramm zur vereinfachten Darstellung des prozentualen Korkanteils in einem zweischichtigen Bauteil mit 44 cm Stärke und einem U-Wert von  $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .



Quelle: eigene Anfertigung 2022

Um einen besseren Verbund zwischen den beiden Bauteilschichten zu erlangen könnte der Übergang zwischen Trag- und Dämmschicht auch fließend ausgeführt werden (vgl. Abbildung 16, S. 45). Dafür müsste mindestens noch ein drittes Lehmgemisch mit durchschnittlich 45 % Korkanteil (Mittelwert aus 30 % und 60 % Korkanteil) angemischt und eingebracht werden. Dabei gilt die Vermutung, dass mit steigender Anzahl an Schichten, der Verbund allmählich optimiert wird. Die Bauteilstärke würde durch die Übergangsschicht geringfügig zunehmen.

Abbildung 16: Diagramm zur vereinfachten Darstellung des prozentualen Korkanteils in einem zweischichtigen Bauteil mit 44 cm Stärke, einer Übergangsschicht und einem U-Wert von  $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .



Quelle: eigene Anfertigung 2022

### **Wärmedurchgangskoeffizient $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$**

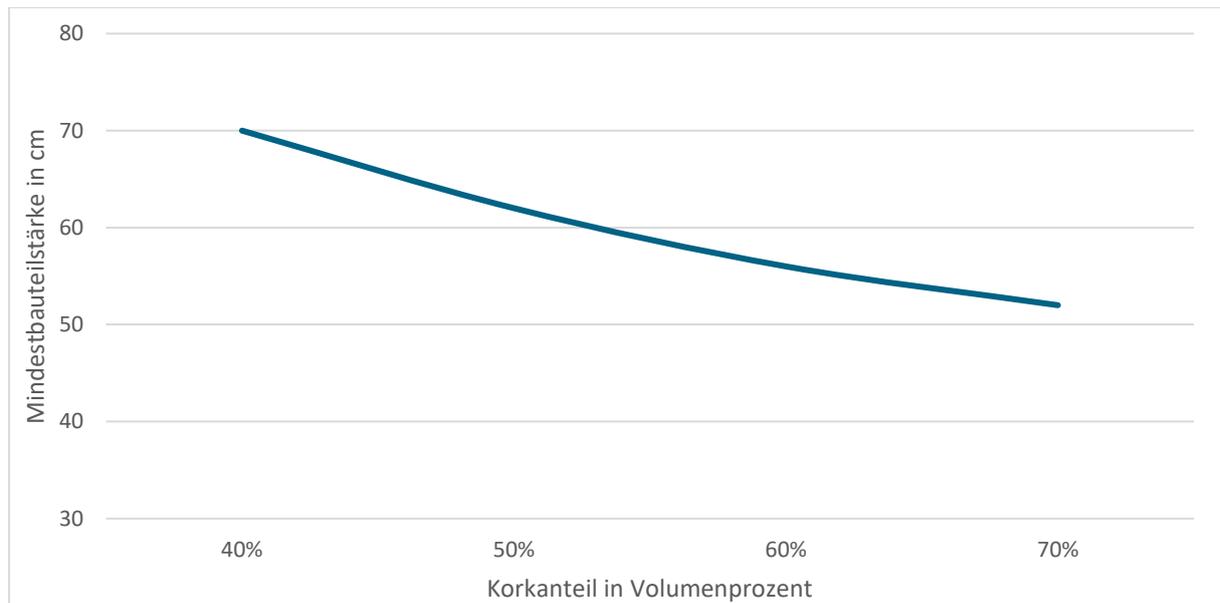
Erneut wird anhand der Kenngrößen aus Tabelle 6 die benötigte Bauteilstärke für eine zweischichtige Wand berechnet. Dafür wird zunächst definiert, wie viel Kork in das Bauteil eingebracht werden muss, um einen U-Wert von  $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  zu erreichen.

Wie bereits beim einschichtigen Bauteil errechnet, müssen auch hier 28 cm reine Korkgranulat-Dämmung in das Bauteil eingebracht werden, um einen U-Wert von  $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  zu erreichen. Anders als beim einschichtigen Bauteil lassen sich die 28 cm Kork, auf zwei Schichten mit unterschiedlichem Korkgehalt verteilen, wodurch neue Mindestbauteilstärken abgeleitet werden können.

In Abbildung 17 werden die resultierenden Mindestbauteilstärken in Abhängigkeit des spezifischen Korkgehalts der Dämmschicht angegeben. Für die tragende Bauteilschicht wird von einem konstanten Korkgehalt von 30 Volumenprozent ausgegangen. Zur besseren Vergleichbarkeit untereinander wurde die Tragschicht außerdem auf eine Stärke von 25 cm festgesetzt.

Durch labortechnische Versuche kann die Stärke der lasttragenden Schicht nachträglich noch optimiert und angepasst werden. Auch eine Skalierung des Korkanteils der lasttragenden Schicht von 30 % auf 40 % wäre, in Abhängigkeit von der jeweiligen Druckfestigkeit, eine Möglichkeit zur nachträglichen Bauteiloptimierung.

Abbildung 17: Mindestwandstärke eines zweischichtigen Bauteils in Abhängigkeit des Korkgehalts der Dämmschicht bei einem U-Wert von 0,20 W/(m²K).



Quelle: eigene Anfertigung 2022

Für die folgenden Berechnungen soll für die dämmende Schicht ein Korkanteil von 60 Volumenprozent angenommen werden. Durch labortechnische Untersuchungen muss dieser Korkgehalt jedoch noch validiert werden.

Erstellt man aus den gegebenen Kenngrößen ein exemplarisches Musterbauteil, so genügt eine Bauteilstärke von 56 cm (ca. 29 cm reiner Stampflehm; 27 cm reine Korkdämmung), um den angestrebten U-Wert von 0,20 W/(m²K) zu erreichen (vgl. Abbildung 17).

$$U = \frac{1}{\frac{d}{\lambda} + \frac{d}{\lambda} + R_{si} + R_{se}} \quad [W/m^2K] \quad (9)$$

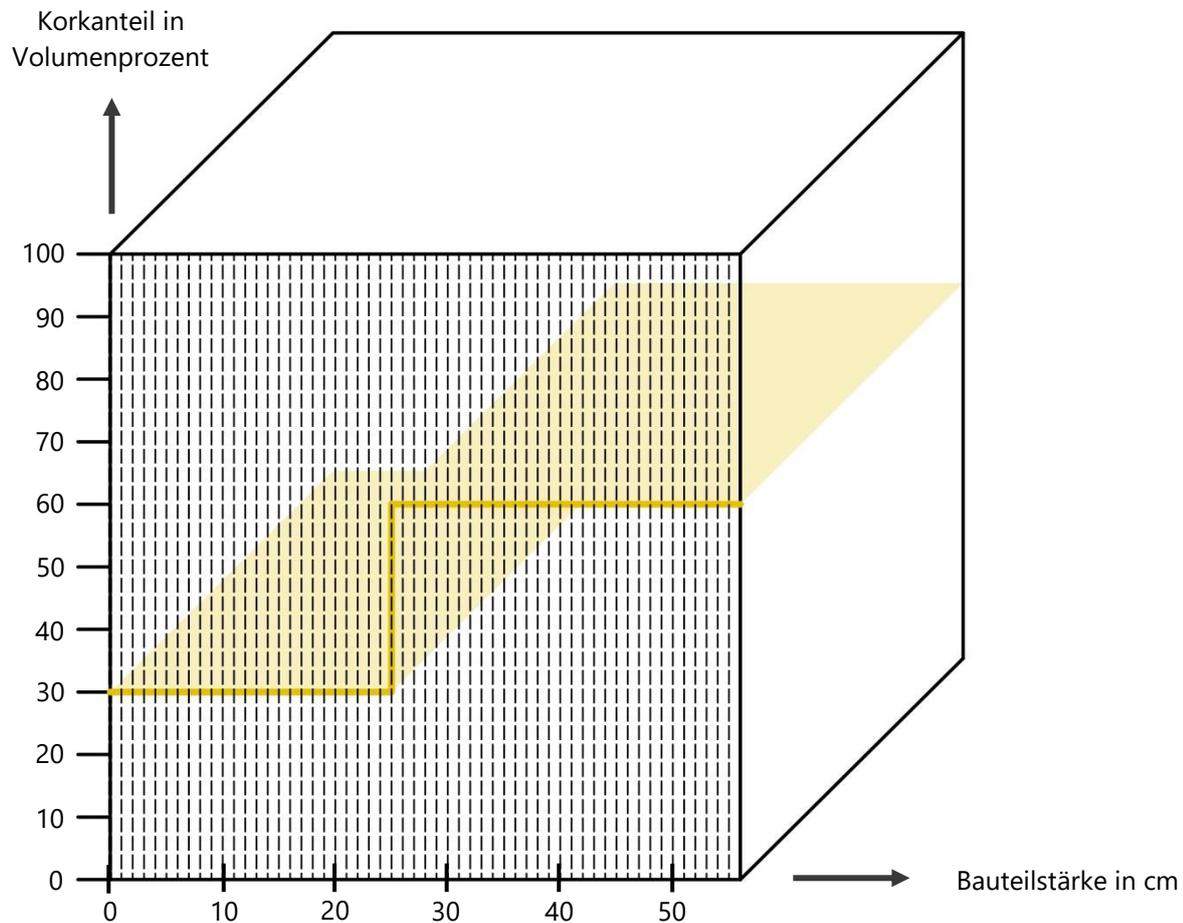
$$U = \frac{1}{\frac{0,266 \text{ m}}{0,057 \frac{W}{m K}} + \frac{0,294 \text{ m}}{1,8 \frac{W}{m K}} + 0,13 \frac{m^2 K}{W} + 0,04 \frac{m^2 K}{W}} = 0,20 \frac{W}{m^2 K} \leq 0,20 \frac{W}{m^2 K}$$

Die obenstehende Berechnung zeigt, dass für einen U-Wert von 0,20 W/(m²K) insgesamt 30 % Korkanteil in der lasttragenden Schicht und 60 % Korkanteil in der wärmedämmenden Bauteilschicht (Volumenprozent) ausreichen würden, um die Lehmtafel als zweischichtiges Bauteil mit einer Stärke von 56 cm zu fertigen. Abbildung 18 (S. 47) stellt den Aufbau des Bauteils vereinfacht dar.

Der dargestellte Würfel hat eine Kantenlänge von 56 cm und ist in horizontaler Richtung in 1 cm große Abschnitte gegliedert. In vertikaler Richtung wird der angestrebte Korkanteil für die lasttragende und wärmedämmende Bauteilschicht in Volumenprozent, auf einer Skala von 0 % – 100 %, dargestellt.

Die gelbe Linie zeigt somit für jede Schicht den spezifischen Korkanteil. Auf der linken Seite befindet sich die Wandinnenseite mit der Tragschicht (30 % Korkanteil), auf der rechten Seite wird die Wandaußenseite mit der Dämmschicht (60 % Korkanteil) dargestellt.

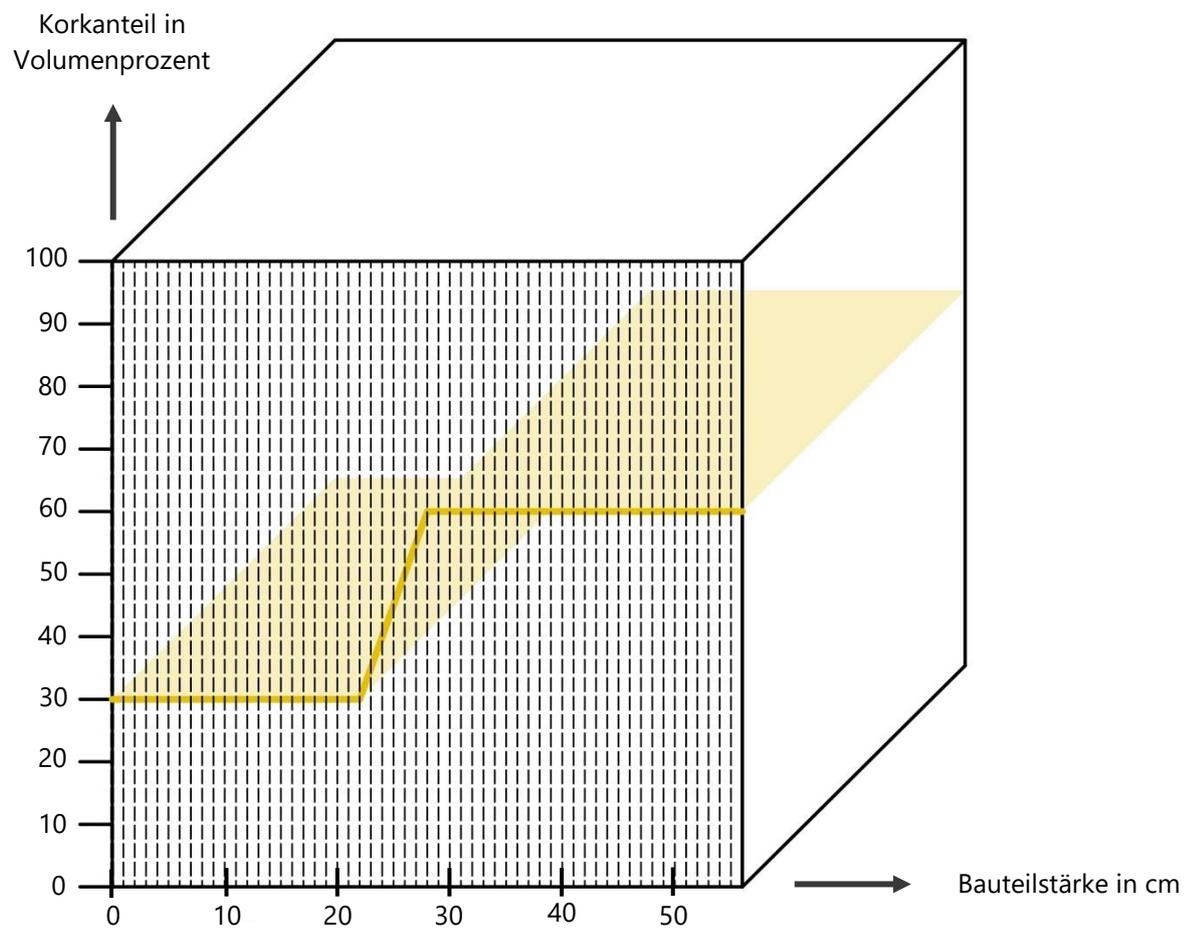
Abbildung 18: Diagramm zur vereinfachten Darstellung des prozentualen Korkanteils in einem zweischichtigen Bauteil mit 56 cm Stärke und einem U-Wert von  $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .



Quelle: eigene Anfertigung 2022

Um einen besseren Verbund zwischen den beiden Bauteilschichten zu erlangen, könnte der Übergang zwischen Trag- und Dämmschicht auch fließend ausgeführt werden (vgl. Abbildung 19, S. 48). Dafür müsste mindestens noch ein drittes Lehmgemisch mit durchschnittlich 45 % Korkanteil (Mittelwert aus 30 % und 60 % Korkanteil) angemischt und eingebracht werden. Dabei gilt die Vermutung, dass mit steigender Anzahl an Schichten, der Verbund allmählich optimiert wird. Die Bauteilstärke würde durch die Übergangsschicht geringfügig zunehmen.

Abbildung 19: Diagramm zur vereinfachten Darstellung des prozentualen Korkanteils in einem zweischichtigen Bauteil mit 56 cm Stärke, einer Übergangsschicht und einem U-Wert von  $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .



Quelle: eigene Anfertigung 2022

## Dreischichtiges Bauteil

In diesem Kapitel soll die Realisierbarkeit eines dreischichtigen Bauteils untersucht werden (Kerndämmung). Das dreischichtige Bauteil (Abbildung 20) wird so konzipiert, dass es für den Lastabtrag und die Wärmedämmung jeweils eigene Schichten gibt. Nach der Funktion der Schicht richtet sich dann der jeweilige Korkgehalt. Während die lasttragenden Schichten nur einen kleinen Anteil an Kork enthalten können, um ihre Funktion zu erfüllen, kann in die wärmedämmende Schicht ein deutlich größerer Korkanteil eingebracht werden. Die wärmedämmende Schicht muss ausschließlich die Anforderung selbsttragend erfüllen, was sich positiv auf die Gesamtbauteilstärke auswirkt.

Abbildung 20: Schematische Skizze dreischichtiges Bauteil.



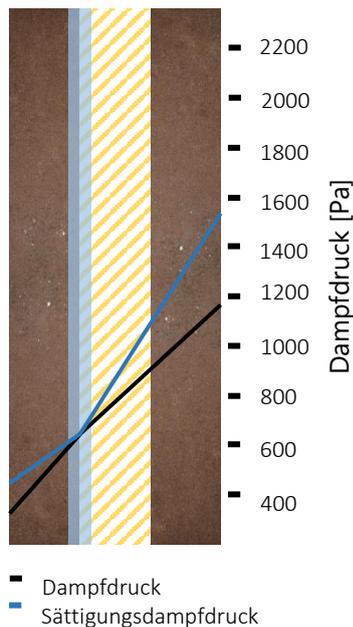
Quelle: eigene Anfertigung 2022

Die Herstellung des dreischichtigen Bauteils ist wesentlich komplexer als beim einschichtigen Bauteil. Je nach Ausführung müssen zwischen zwei und fünf verschiedene Lehm-Kork-Mischungen hergestellt werden. Diese Mischungen müssen anschließend in eine mindestens dreigeteilte Schalung gefüllt und kraftschlüssig verdichtet werden. Eine vollautomatische Vorfertigung kann für diesen Produktionsschritt die Zeit- und Kosteneffizienz verbessern. Eine kraftschlüssige Verbindung zwischen der Tragschicht und der Dämmschicht stellt bei diesem Aufbau eine signifikante Herausforderung dar.

Gleichzeitig sind durch den Aufbau schlankere Wandquerschnitte möglich als beispielsweise bei einer einschichtigen Wand. Dennoch sind die resultierenden Bauteilquerschnitte größer als bei der zweischichtigen Wand, da die Tragschicht auf zwei Schichten aufgeteilt wird, welche sich in ihrer lastabtragenden Wirkung jedoch nicht aufaddieren (Knicklänge). Durch den beschriebenen Aufbau gibt es zwei lasttragende Schichten, welche die Dämmschicht einfassen.

Durch den dreischichtigen Aufbau liegt die empfindliche Dämmung geschützt zwischen zwei robusten Wandscheiben, welchen aufgrund des niedrigeren Korkanteils, eine bessere Abrieb- und Witterungsbeständigkeit zugeschrieben werden kann. Dadurch werden auch der Transport und das Zusammenfügen auf der Baustelle wesentlich leichter. Gleichzeitig muss überprüft werden, ob durch die Kerndämmung Tauwasser anfallen kann. Gerade der Bereich zwischen der äußeren Tragschicht und der Dämmebene könnte in Bezug auf Tauwasseranfall kritisch zu bewerten (vgl. Abbildung 21).

Abbildung 21: Dreischichtiges Bauteil - Tauwasser.



Quelle: eigene Anfertigung 2022 in Anlehnung an ubakus 2023

Zuletzt soll noch erwähnt werden, dass bei einem dreischichtigen Bauteil eine Sichtqualität im Innen- und Außenraum möglich ist.

Bei den folgenden Untersuchungen wird zunächst primär auf den Wärmedurchgangskoeffizienten Bezug genommen. Erst im Kapitel „Festigkeit“ ab Seite 64 werden die Ergebnisse durch Druckfestigkeitsuntersuchungen validiert. Anhand der Kenngrößen aus Tabelle 6 (vgl. S. 35) werden die minimalen Wandstärken berechnet, welche benötigt werden, um einen U-Wert von  $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  beziehungsweise  $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  zu erreichen.

### **Wärmedurchgangskoeffizient $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$**

Im ersten Schritt wird anhand der Kenngrößen aus Tabelle 6 die benötigte Bauteilstärke, für eine dreischichtige Wand, berechnet. Dafür wird zunächst definiert, wie viel Kork in das Bauteil eingebracht werden muss, um einen U-Wert von  $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  zu erreichen.

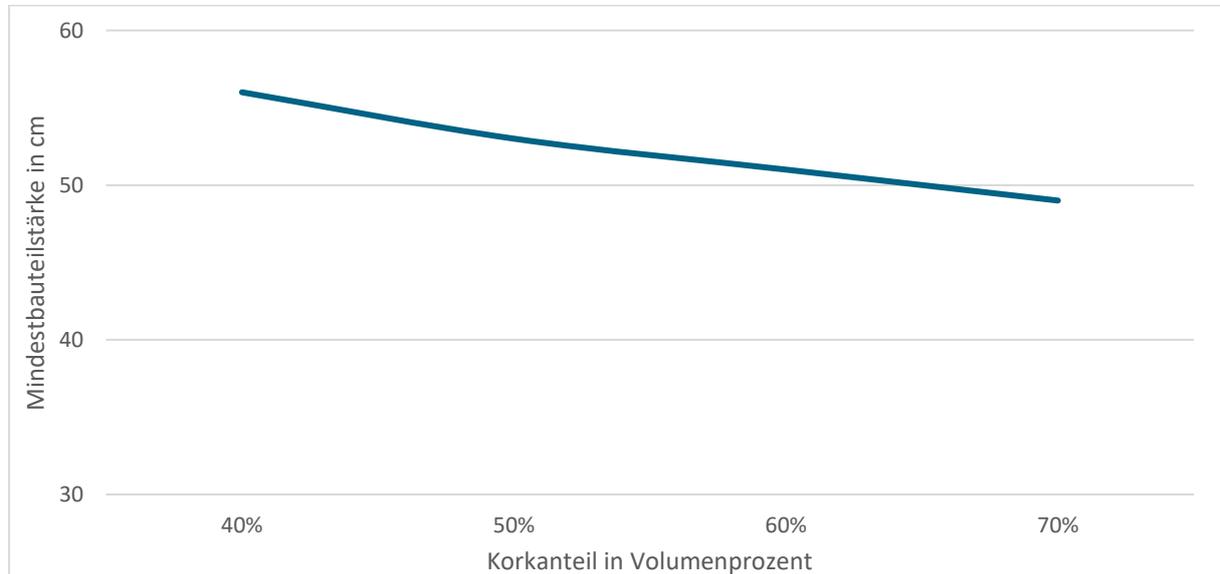
Wie bereits beim ein- und zweischichtigen Bauteil errechnet, müssen 19 cm reine Korkgranulat-Dämmung in das Bauteil eingebracht werden, um einen U-Wert von  $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  zu erreichen. Anders als beim ein- oder zweischichtigen Bauteil lassen sich die 19 cm Kork, auf drei Schichten mit unterschiedlichem Korkgehalt verteilen, wodurch neue Mindestbauteilstärken abgeleitet werden können.

In Labortechnische Experimente ermöglichen es, die Stärke der lasttragenden Schicht nachträglich zu verbessern und anzupassen. Auch eine Erhöhung des Korkanteils in dieser Schicht von 30 % auf 40 %, je nach Druckfestigkeit, kann eine Option für eine optimierte Bauteilgestaltung sein.

Abbildung 22 werden die resultierenden Mindestbauteilstärken, in Abhängigkeit des spezifischen Korkgehalts der Dämmschicht, angegeben. Für die beiden tragenden Bauteilschichten wird von einem konstanten Korkgehalt von 30 Volumenprozent ausgegangen. Zur besseren Vergleichbarkeit untereinander wurden die Tragschichten außerdem auf eine Stärke von 20 cm festgesetzt. Insgesamt sind in dem dreischichtigen Bauteil also 40 cm Tragschicht – aufgeteilt auf zwei Schichten – vorgesehen.

Labortechnische Experimente ermöglichen es, die Stärke der lasttragenden Schicht nachträglich zu verbessern und anzupassen. Auch eine Erhöhung des Korkanteils in dieser Schicht von 30 % auf 40 %, je nach Druckfestigkeit, kann eine Option für eine optimierte Bauteilgestaltung sein.

Abbildung 22: Mindestwandstärke eines dreischichtigen Bauteils in Abhängigkeit des Korkgehalts der Dämmschicht bei einem U-Wert von  $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .



Quelle: eigene Anfertigung 2022

Für die folgenden Berechnungen soll für die dämmende Schicht ein Korkanteil von 60 Volumenprozent angenommen werden.

Erstellt man aus den gegebenen Kenngrößen ein exemplarisches Musterbauteil, so genügt eine Bauteilstärke von 51 cm (ca. 32 cm reiner Stampflehm; 19 cm reine Korkdämmung), um den angestrebten U-Wert von  $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  zu erreichen (vgl. Abbildung 22).

$$U = \frac{1}{\frac{d}{\lambda} + \frac{d}{\lambda} + R_{si} + R_{se}} \quad [W/m^2K] \quad (10)$$

$$U = \frac{1}{\frac{0,186 \text{ m}}{0,057 \frac{W}{mK}} + \frac{0,324 \text{ m}}{1,8 \frac{W}{mK}} + 0,13 \frac{m^2K}{W} + 0,04 \frac{m^2K}{W}} = 0,28 \frac{W}{m^2K} \leq 0,28 \frac{W}{m^2K}$$

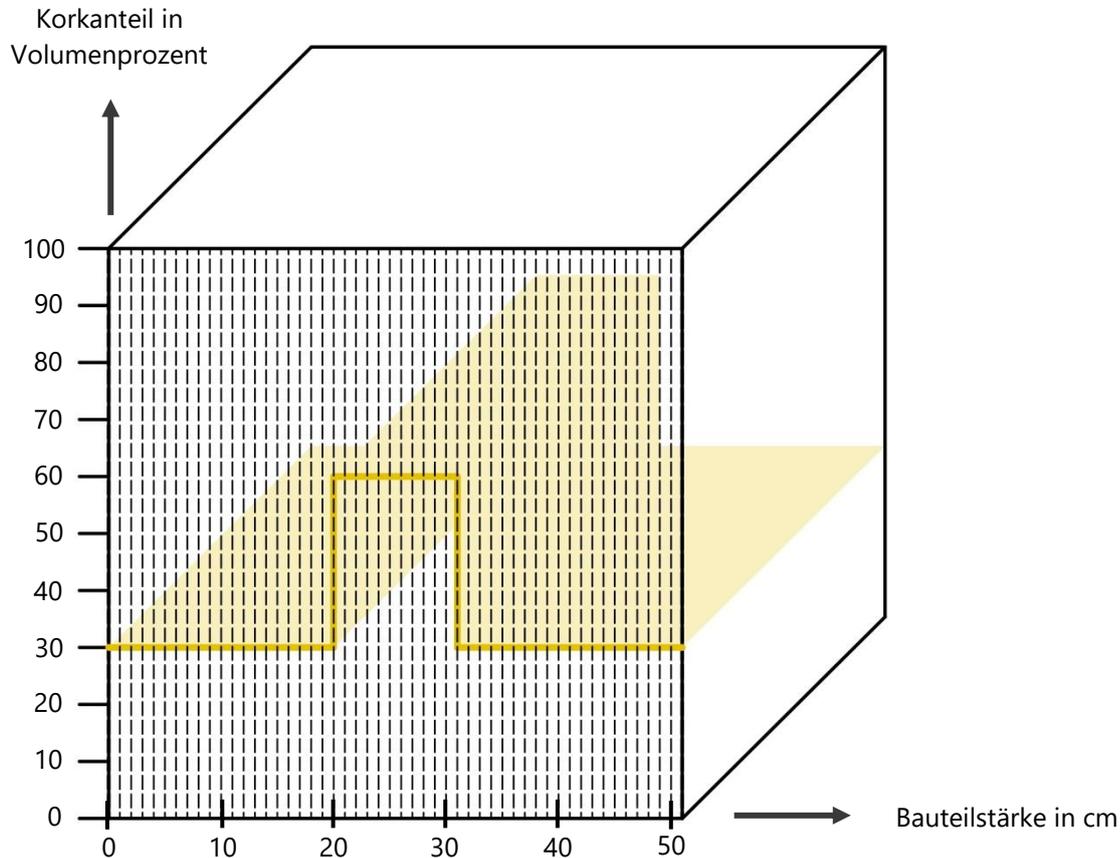
Die obenstehende Berechnung zeigt, dass insgesamt 30 % Korkanteil in der lasttragenden Schicht und 60 % Korkanteil in der wärmedämmenden Bauteilschicht (Volumenprozent) ausreichen würden, um die Lehmtafel – unter Einhaltung der Forderungen des GEG – als dreischichtiges Bauteil mit einer Stärke von 51 cm zu fertigen. Abbildung 23 (S. 52) stellt den Aufbau des Bauteils vereinfacht dar.

Der dargestellte Würfel hat eine Kantenlänge von 51 cm und ist in horizontaler Richtung in 1 cm große Abschnitte gegliedert. In vertikaler Richtung wird der angestrebte Korkanteil für die lasttragenden und die wärmedämmende Bauteilschicht/en in Volumenprozent, auf einer Skala von 0 % – 100 %, dargestellt.

Die gelbe Linie zeigt somit für jede Schicht den spezifischen Korkanteil. Auf der linken Seite befindet sich die Wandinnenseite mit der ersten Tragschicht (30 % Korkanteil), in der Mitte die Kerndämmung mit

60 Volumenprozent Korkanteil und auf der rechten Seite die Wandaußenseite mit der zweiten Tragschicht (30 % Korkanteil).

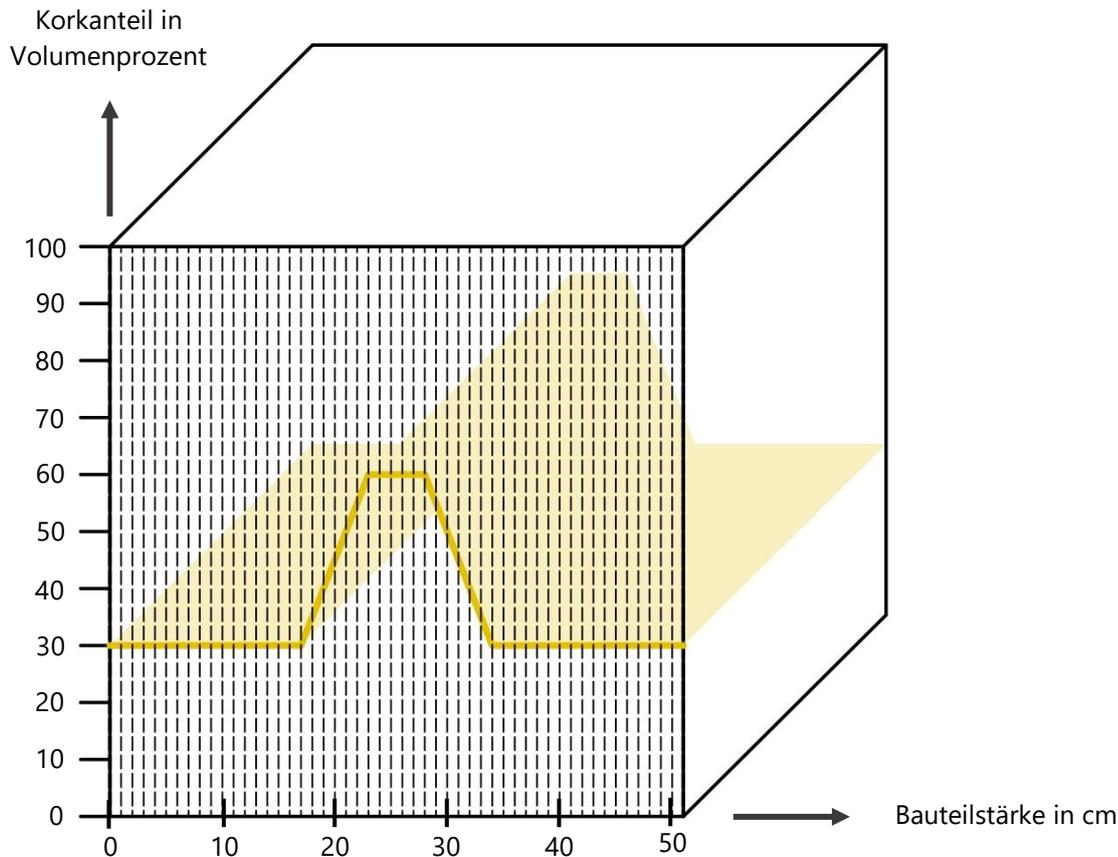
Abbildung 23: Diagramm zur vereinfachten Darstellung des prozentualen Korkanteils in einem dreischichtigen Bauteil mit 51 cm Stärke und einem U-Wert von  $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .



Quelle: eigene Anfertigung 2022

Um einen besseren Verbund zwischen den unterschiedlichen Bauteilschichten zu erlangen, könnte der Übergang zwischen Trag- und Dämmschicht auch fließend ausgeführt werden (vgl. Abbildung 24, S. 53). Dafür müsste mindestens noch ein drittes Lehmgemisch mit durchschnittlich 45 % Korkanteil (Mittelwert aus 30 % und 60 % Korkanteil) angemischt und eingebracht werden. Dabei gilt die Vermutung, dass mit steigender Anzahl an Schichten, der Verbund allmählich optimiert wird. Die Bauteilstärke würde durch die Übergangsschicht geringfügig zunehmen.

Abbildung 24: Diagramm zur vereinfachten Darstellung des prozentualen Korkanteils in einem zweischichtigen Bauteil mit 51 cm Stärke, einer Übergangsschicht und einem U-Wert von 0,28 W/(m<sup>2</sup>K).



Quelle: eigene Anfertigung 2022

### **Wärmedurchgangskoeffizient 0,20 W/(m<sup>2</sup>K)**

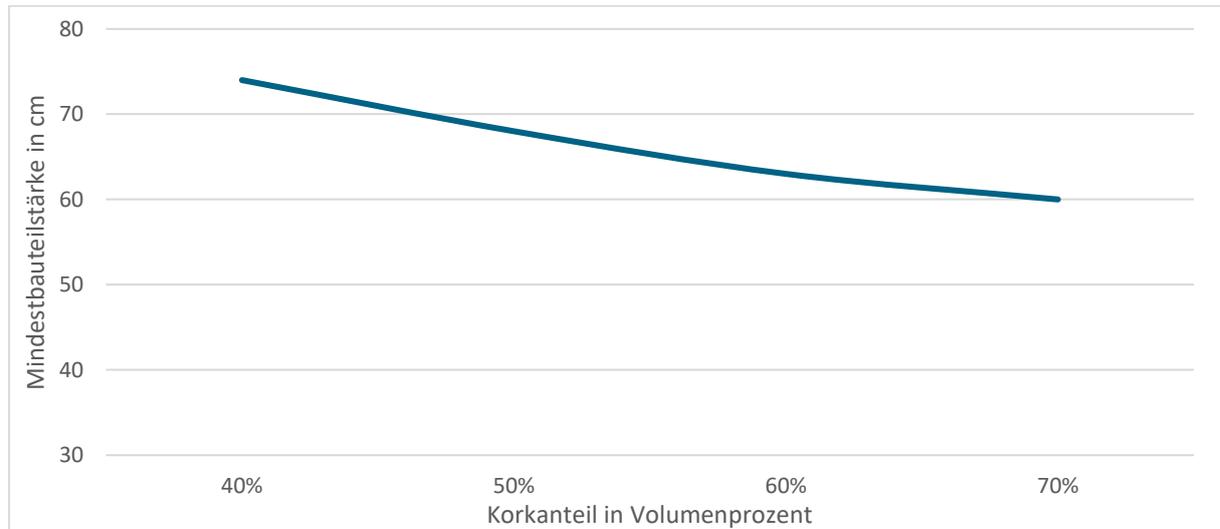
Erneut wird anhand der Kenngrößen aus Tabelle 6 (S. 35) die benötigte Bauteilstärke, für eine dreischichtige Wand, berechnet. Dafür wird zunächst definiert, wie viel Kork in das Bauteil eingebracht werden muss, um einen U-Wert von 0,20 W/(m<sup>2</sup>K) zu erreichen.

Wie bereits beim einschichtigen Bauteil errechnet, müssen auch hier 28 cm reine Korkgranulat-Dämmung in das Bauteil eingebracht werden, um einen U-Wert von 0,20 W/(m<sup>2</sup>K) zu erreichen. Anders als beim einschichtigen Bauteil lassen sich die 28 cm Kork, nun auf drei Schichten mit unterschiedlichem Korkgehalt verteilen, wodurch neue Mindestbauteilstärken abgeleitet werden können.

In Abbildung 25 werden die resultierenden Mindestbauteilstärken in Abhängigkeit des spezifischen Korkgehalts der Dämmschicht angegeben. Für die tragenden Bauteilschichten wird von einem konstanten Korkgehalt von 30 Volumenprozent ausgegangen. Zur besseren Vergleichbarkeit untereinander wurden die Tragschichten außerdem auf eine Stärke von 20 cm (40 cm insgesamt) festgesetzt.

Durch labortechnische Versuche kann die Stärke der lasttragenden Schichten nachträglich noch optimiert und angepasst werden. Auch eine Skalierung des Korkanteils der lasttragenden Schicht von 30 % auf 40 % ist, in Abhängigkeit von der jeweiligen Druckfestigkeit, eine Möglichkeit zur nachträglichen Bauteiloptimierung.

Abbildung 25: Mindestwandstärke eines dreischichtigen Bauteils in Abhängigkeit des Korkgehalts der Dämmschicht bei einem U-Wert von  $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .



Quelle: Eigene Anfertigung

Für die folgenden Berechnungen soll für die dämmende Schicht ein Korkanteil von 60 Volumenprozent angenommen werden. Durch labortechnische Untersuchungen muss dieser Korkgehalt jedoch noch validiert werden.

Erstellt man aus den gegebenen Kenngrößen ein exemplarisches Musterbauteil, so genügt eine Bauteilstärke von 63 cm (ca. 37 cm reiner Stampflehm; 26 cm reine Korkdämmung), um den angestrebten U-Wert von  $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  zu erreichen (vgl. Abbildung 25).

$$U = \frac{1}{\frac{d}{\lambda} + \frac{d}{\lambda} + R_{si} + R_{se}} \quad [W/m^2K] \quad (11)$$

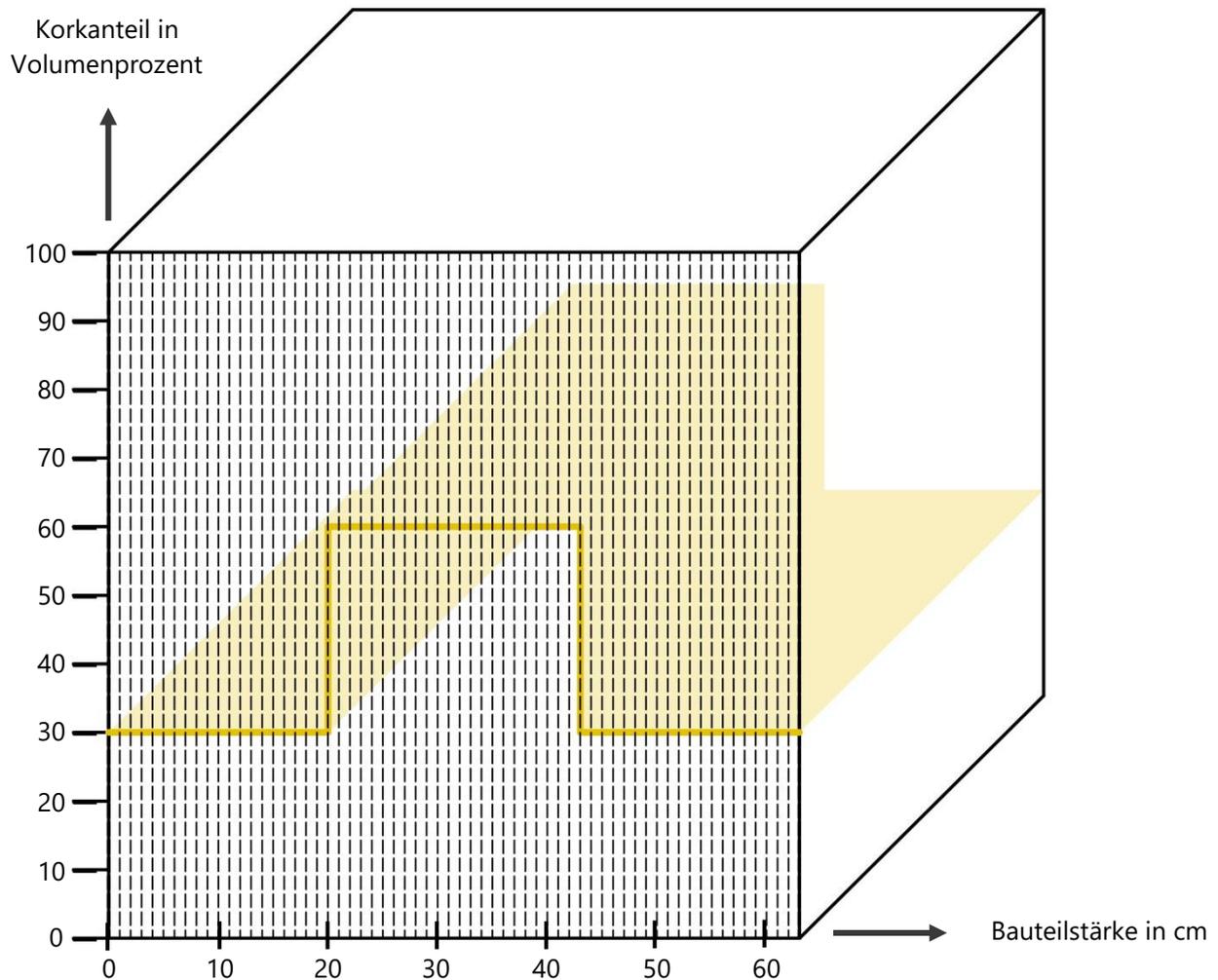
$$U = \frac{1}{\frac{0,258 \text{ m}}{0,057 \frac{W}{m K}} + \frac{0,37 \text{ m}}{1,8 \frac{W}{m K}} + 0,13 \frac{m^2 K}{W} + 0,04 \frac{m^2 K}{W}} = 0,20 \frac{W}{m^2 K} \leq 0,20 \frac{W}{m^2 K}$$

Die obenstehende Berechnung zeigt, dass für einen U-Wert von  $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  insgesamt 30 % Korkanteil in den lasttragenden Schichten und 60 % Korkanteil in der wärmedämmenden Bauteilschicht (Volumenprozent) ausreichen würden, um die Lehmtafel als dreischichtiges Bauteil mit einer Stärke von 63 cm zu fertigen. Abbildung 26 (S. 55) stellt den Aufbau des Bauteils vereinfacht dar.

Der dargestellte Würfel hat eine Kantenlänge von 63 cm und ist in horizontaler Richtung in 1 cm große Abschnitte gegliedert. In vertikaler Richtung wird der angestrebte Korkanteil für die lasttragenden und die wärmedämmende Bauteilschicht/en in Volumenprozent, auf einer Skala von 0 % – 100 %, dargestellt.

Die gelbe Linie zeigt somit für jede Schicht den spezifischen Korkanteil. Auf der linken Seite befindet sich die Wandinnenseite mit der ersten Tragschicht (30 % Korkanteil), in der Mitte die dämmende Bauteilschicht und auf der rechten Seite die Wandaußenseite mit der zweiten Tragschicht (60 % Korkanteil).

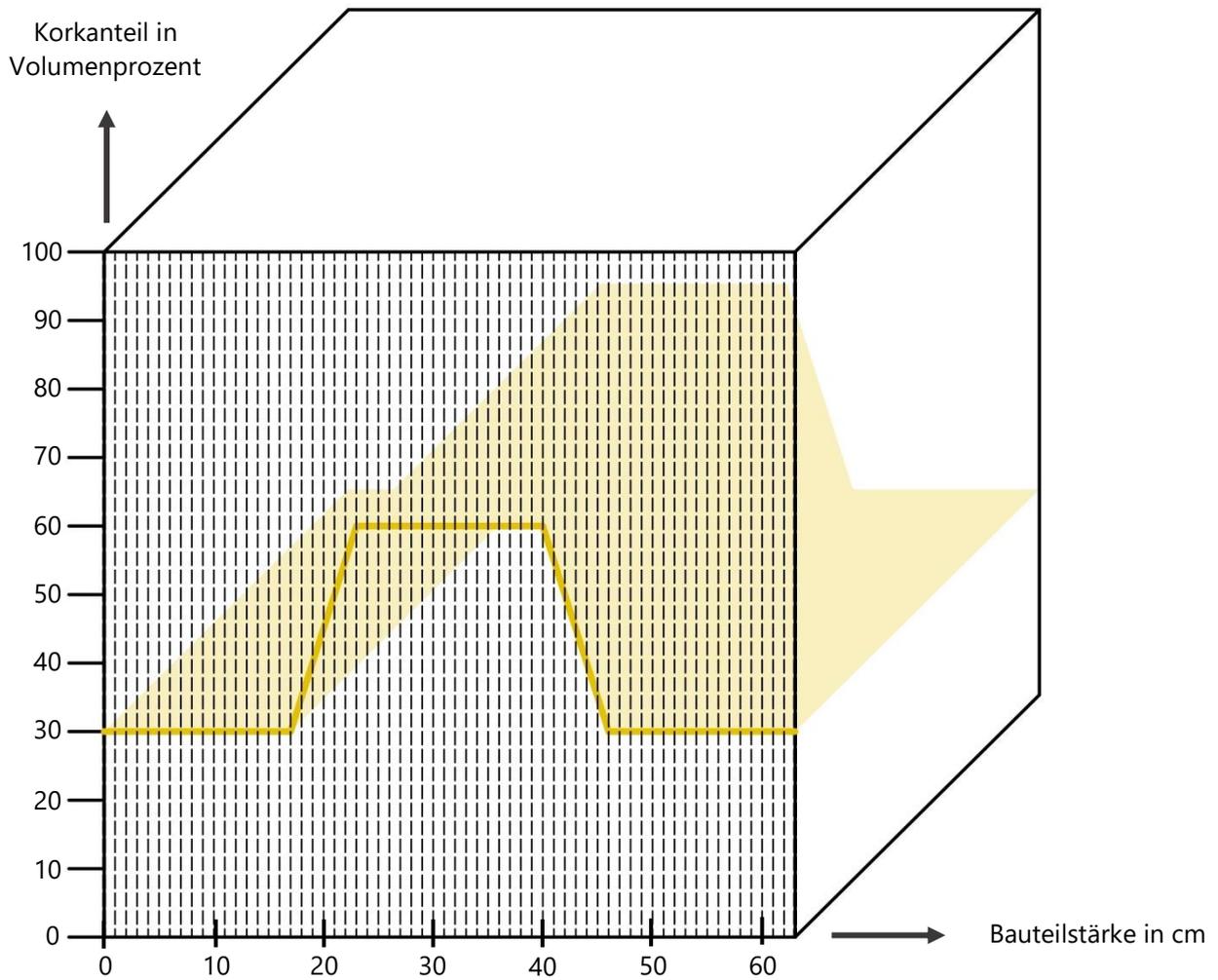
Abbildung 26: Diagramm zur vereinfachten Darstellung des prozentualen Korkanteils in einem dreischichtigen Bauteil mit 63 cm Stärke und einem U-Wert von 0,20 W/(m<sup>2</sup>K).



Quelle: eigene Anfertigung 2022

Um einen besseren Verbund zwischen den Bauteilschichten zu erlangen könnte der Übergang zwischen Trag- und Dämmschicht auch fließend ausgeführt werden (vgl. Abbildung 27, S. 56). Dafür müsste mindestens noch ein drittes Lehmgemisch mit durchschnittlich 45 % Korkanteil (Mittelwert aus 30 % und 60 % Korkanteil) angemischt und eingebracht werden. Dabei gilt die Vermutung, dass mit steigender Anzahl an Schichten, der Verbund allmählich optimiert wird. Die Bauteilstärke würde durch die Übergangsschicht geringfügig zunehmen.

Abbildung 27: Diagramm zur vereinfachten Darstellung des prozentualen Korkanteils in einem zweischichtigen Bauteil mit 63 cm Stärke, einer Übergangsschicht und einem U-Wert von  $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .



Quelle.: eigene Anfertigung 2022

## Flachsgitter

Flachsfasern sind ein natürliches Nebenprodukt, welches beim Anbau der Nutzpflanze Flachs (auch Lein genannt) anfällt.<sup>55</sup> Flachs kann als Vegetation der gemäßigten Klimazone gut in Deutschland kultiviert werden, wodurch der Verwendung als Dämmmaterial ein zusätzlicher ökologischer Mehrwert zukommt.<sup>56</sup> Derzeit wird das Gewächs hauptsächlich zur Herstellung von Ölen und Textilien verwendet, wobei sich die aussortierten, kurzen Flachsfasern, gut zur Weiterverarbeitung als Dämmstoff eignen.<sup>57</sup> Üblicherweise wird Flachsdämmung in Form von Vliesen, Filzen, Stopfwole oder Matten verarbeitet.<sup>58</sup>

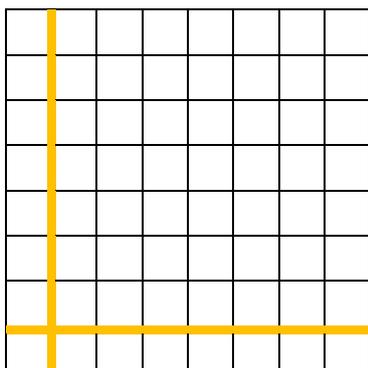
Ziel der Forschung ist es ein monolithisches Lehmfertigbauteil mit integrierter Dämmung zu entwickeln. Um dies zu erreichen, soll in diesem Kapitel überprüft werden, ob sich Flachs allein als feinmaschiges Gewebe für die Bauteildämmung eignen könnte. Es wäre denkbar, dass sich das Gewebe durch den gesamten Querschnitt des Bauteils zieht und dadurch zusätzlich einen positiven Einfluss auf die Tragfähigkeit hat. Ob diese an Geogitter angelehnte Technik zu einer Steigerung der Tragfähigkeit führen kann, soll erst im nächsten Schritt weiter untersucht werden.

Um festzustellen, ob diese besondere Art der Dämmung aus Flachsgewebe realistisch ist, soll zunächst untersucht werden, welche Maschenweiten erforderlich sind, um einen notwendigen Flachsgehalt von 30 – 60 % in das Bauteil einzubringen. Die vorherigen Analysen haben gezeigt, dass ein niedrigerer Dämmstoffgehalt zu wesentlich dickeren Bauteilen führen würde, wodurch Flachsgewebe als Dämmstoff auszuschließen wäre.

### Flachsgehalt 30 %

Um einen Flachsgehalt von 30 Volumenprozent zu erreichen, müssten in einen Würfel mit 50 cm Kantenlänge insgesamt  $0,0375 \text{ m}^3$  Flachsgewebe eingebracht werden. Bei einer angenommenen Gewebestärke von 1,5 mm würde dies bedeuten, dass 21.221 m Flachsschnur eingestampft werden müssen. Nimmt man an, dass bei einer quadratischen Gewebeform im exemplarischen Würfel immer gleich viele Fäden horizontal- wie vertikal eingebracht werden (vgl. Abbildung 28), so müssen insgesamt 21.221 Gitterelemente (zwei Flachsfäden á 50 cm Länge) eingebracht werden.

Abbildung 28: Exemplarische Darstellung Flachsgewebe (Gitterelement).



Quelle: eigene Anfertigung 2022

<sup>55</sup> Vgl. Willems und Schild 2019, S. 74.

<sup>56</sup> Vgl. Willems und Schild 2019, S. 74.

<sup>57</sup> Vgl. Willems und Schild 2019, S. 74.

<sup>58</sup> Vgl. Willems und Schild 2019, S. 75.

Der beschriebene Würfel hat eine Höhe von 50 cm. Wenn die einzelnen Flachgitter einen Mindestabstand von 0,5 cm in der Höhe haben sollen, so würden insgesamt 77 Gitter übereinander in den exemplarischen Würfel passen. Demnach müssen pro Schicht 276 Gitterelemente realisierbar sein. Bei einer Gewebestärke von 1,5 mm würde dies einen Maschenabstand von 0,31 mm bedeuten.

Flachgewebe lässt sich somit als ungeeignet für die Nutzung als Dämmzuschlag einstufen und soll nicht weiter betrachtet werden.

## Simulation

Im Ingenieurwesen bezieht sich Simulation auf den Einsatz von Computermodellen, um das Verhalten eines physischen Systems oder Prozesses zu replizieren und anschließend zu analysieren. Diese Simulationen werden genutzt, um die Leistung verschiedener Systeme oder Prozesse zu testen und zu optimieren, bevor sie in der realen Welt gebaut oder implementiert werden. Dies ermöglicht es Ingenieuren, potenzielle Probleme oder Verbesserungsbereiche frühzeitig zu identifizieren und zu effizienteren und effektiveren Lösungen zu führen.

Das Ziel jeder Simulation ist es, ein Computermodell eines realen Systems oder Prozesses zu erstellen, um sein Verhalten unter verschiedenen Bedingungen zu verstehen und vorherzusagen. Durch die Simulation eines Systems haben Wissenschaftler:innen die Möglichkeit komplexe Phänomene zu studieren, die im realen Leben schwer oder unmöglich zu beobachten oder zu manipulieren sind. Darüber hinaus bietet die Simulation eine Möglichkeit das entworfene System zu testen und zu optimieren oder potenzielle Probleme zu identifizieren.

ANSYS ist ein leistungsstarkes Multiphysics-Analysewerkzeug, welches sich unter anderem zur Simulation von thermischen Eigenschaften eignet. Die Ergebnisse der Simulation können im nächsten Schritt mit den Ergebnissen von labortechnischen Untersuchungen verifiziert werden.

Im Rahmen dieser Forschung soll die wärmedämmende Wirkung einer Lehmprobe untersucht werden. ANSYS bietet durch die Optionen "Steady-State Thermal Analysis" und "Konvektion" die Möglichkeit eine solche Simulation durchzuführen. Dabei zielt vor allem die Konvektionsanalyse auf die Simulation von Wärmeübertragungsprozessen zwischen der simulierten Lehm-Kork-Wand und der umgebenden Luft ab, wodurch das thermische Verhalten des hinterlegten Baustoffes untersucht und hinsichtlich des Wärmedurchgangs optimiert werden kann.

Ein zweidimensionales instationäres Wärmeübertragungsmodell wurde im Rahmen einer Forschungsarbeit zum Thema „Experimental and Numerical Study of a Usual Brick Filled with PCM to Improve the Thermal Inertia of Buildings“ erfolgreich erprobt.<sup>59</sup> Ein weiterer Beitrag beschäftigt sich mit der Bewertung und dem Vergleich des Wärmeverhaltens verschiedener Wandelemente.<sup>60</sup> Dabei wurde für die Berechnung der zeitabhängigen und nichtlinearen Temperaturschwankungen ein mehrschichtiges Modell entwickelt, welches auf „finite-volume [und] implicit procedure“<sup>61</sup> zurückgreift. Ein weiteres Paper, welches in der Zeitschrift Energy and Buildings veröffentlicht wurde, betont die Bedeutung der Konvektionsanalyse im Zusammenhang mit dem nachhaltigen Bau von Gebäuden, indem die thermische Leistung traditioneller Lehmwände im heißen und trockenen Klima im Süden von Algerien analysiert wurde.<sup>62</sup>

Insgesamt stellt die Konvektionsanalyse ein wichtiges Werkzeug zum Verständnis und zur Optimierung des thermischen Verhaltens von Lehmwänden dar. Durch die Analyse der Wärmeübertragungsprozesse, die zwischen der Wand und der umgebenden Luft stattfinden, können effektivere und nachhaltigere Wärmedämmsysteme entworfen werden und letztendlich der Energieverbrauch eines Gebäudes reduziert und der thermische Komfort für die Bewohner:innen verbessert werden.

Für die folgenden Simulationen werden die thermischen Eigenschaften aus Tabelle 7 herangezogen.

---

<sup>59</sup> Vgl. Hichem et al. 2013.

<sup>60</sup> Vgl. Al-Sanea 2000.

<sup>61</sup> Al-Sanea 2000.

<sup>62</sup> Belhadj et al. 2020.

Tabelle 7: Thermische Eigenschaften für ANSYS-Modell.

Thermische Eigenschaft	Kork-Lehm-Mischung	Hochleistungsflachsgewebe
Wärmespeicherkapazität	870 [J/kgK]	1.550 – 1.640 [J/kgK]
Wärmespeicherzahl	2,36 [MJ/m <sup>3</sup> K]	-
Wärmeleitfähigkeit	0,30 [W/mK]	0,17 – 0,25 [W/mK]
Wärmeeindringkoeffizient	600 [J/m <sup>2</sup> Ks <sup>1/2</sup> ]	-

Quelle: eigene Anfertigung 2023 nach Daten von Evans 2016, Alnefaie und Abu-Hamdeh 2020, S. 42, Maaloufa et al. 2015, 1157f und IpeG - Institut GmbH 2014a, S. 2

Da die benötigten Eigenschaften für das verwendete Lehm-Kork-Gemisch mit Geogitter aus Flachs nicht versuchstechnisch erarbeitet wurden, musste auf geeignete Referenzen zurückgegriffen werden. In diesem Kontext bot das Paper von Maaloufa et al. (2015) eine wertvolle Grundlage für die Wärmeleitfähigkeit und den Wärmeeindringkoeffizienten von Kork-Lehm.<sup>63</sup> Laut einem im International Journal of Materials veröffentlichtem Bericht liegt die Wärmespeicherzahl von Lehm zwischen 1,55 MJ/m<sup>3</sup>K und 3,50 MJ/m<sup>3</sup>K.<sup>64</sup> Als repräsentativer Mittelwert wurde auf dieser Grundlage eine Wärmespeicherzahl von 2,36 MJ/m<sup>3</sup>K für die Simulation gewählt. Die spezifische Wärmekapazität von Lehm beträgt ca. 870 J/kgK.<sup>65</sup>

Für das Hochleistungsflachsgewebe war es wesentlich schwieriger geeignete Werte zu finden. Insgesamt ist der Einfluss dieses Gitters auf das thermische Verhalten des gesamten Bauteils sehr gering, weshalb kleine Ungenauigkeiten bei den Werten wenig zum Tragen kommen.

Laut einem Paper, welches in der Zeitschrift Frontiers in Materials veröffentlicht wurde, liegt die Wärmeleitfähigkeit von einem Kompositmaterial aus Flachsfasern und Epoxidharz zwischen 0,27 W/mK und 0,31 W/mK, abhängig von der Ausrichtung der Fasern und ihrem Feuchtigkeitsgehalt.<sup>66</sup> Die Wärmeleitfähigkeit von reinem Flachs, beispielsweise in Form von Flachsschäben, ist mit 0,05 W/mK hingegen deutlich geringer.<sup>67</sup> Auf Grundlage dieser Daten wurde für die Simulation der Flachsfasern eine Wärmeleitfähigkeit von 0,17 W/mK bis 0,25 W/mK angenommen.

Die Wärmespeicherkapazität von Flachsschäben liegt bei 1.550 J/kgK bis 1.640 J/kgK.<sup>68</sup>

## Ergebnisse

Für die Simulation wurde ein Bauteil mit einem vorgegebenem U-Wert von 0,20 W/m<sup>2</sup>K erstellt. Für die Simulation kann dann eine Oberflächentemperatur vorgegeben werden und das Programm simuliert anschließend den Wärmefluss durch das Bauteil, sodass die Temperatur auf der anderen Wandseite abgelesen werden kann. Dabei wird stets die wärmere Temperatur vorgegeben – die Simulation läuft also immer von warm nach kalt ab.

<sup>63</sup> Vgl. Maaloufa et al. 2015, 1157f.

<sup>64</sup> Vgl. Alnefaie und Abu-Hamdeh 2020, S. 42.

<sup>65</sup> Vgl. Evans 2016.

<sup>66</sup> Vgl. Bodaghi et al. 2023.

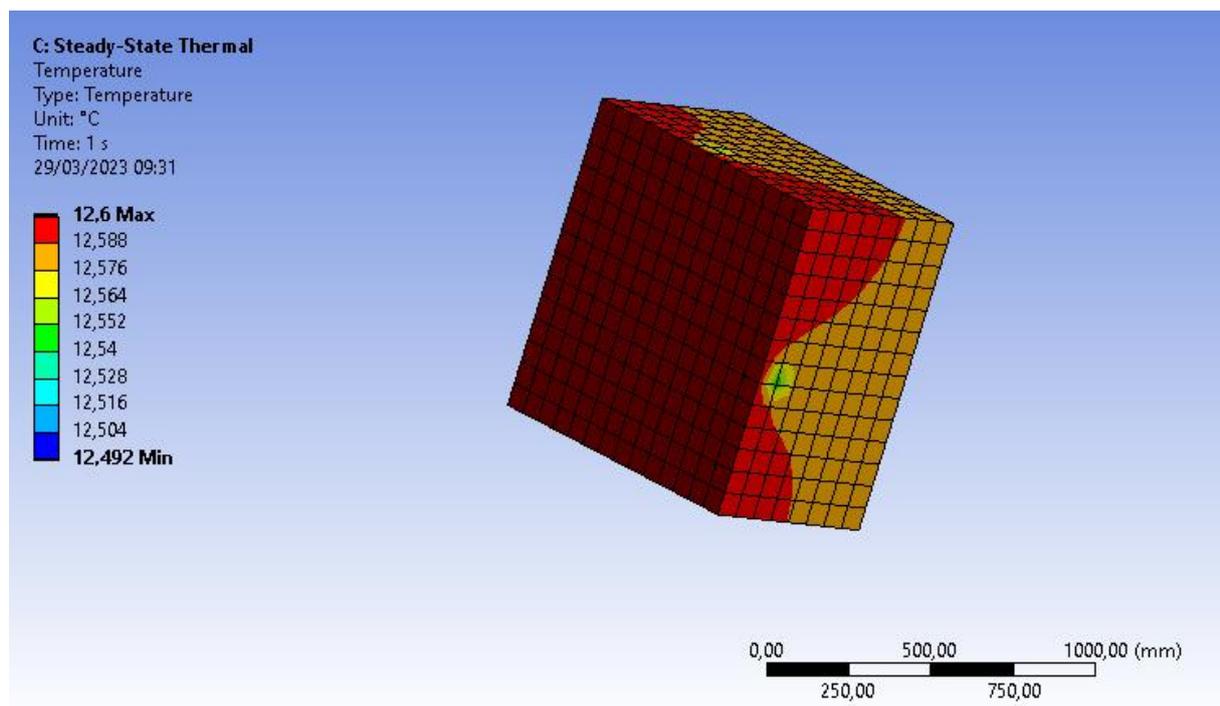
<sup>67</sup> Vgl. IpeG - Institut GmbH 2014a, S. 2.

<sup>68</sup> Vgl. IpeG - Institut GmbH 2014a, S. 2.

Die Ergebnisse können im nächsten Schritt mit den bereits erhobenen Temperaturdaten aus dem Forschungsraum (vgl. Temperaturmessungen ab Seite 265) abgeglichen werden. Stimmen diese Werte ungefähr überein, ist davon auszugehen, dass die hinterlegten Daten das gewählte Lehm-Kork-Gemisch gut verkörpern. Darüber hinaus kann anhand der Ergebnisse eine erste Aussage bezüglich des tatsächlichen U-Wertes der Wand getätigt werden. Da dieser fest auf  $0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$  festgesetzt ist, würde eine Übereinstimmung der Werte bedeuten, dass die gebaute Wand ebenfalls einen U-Wert von  $0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$  haben muss.

Abbildung 29 zeigt die thermische Simulation eines Probekörpers mit 60 cm Stärke und einer Starttemperatur von  $12,6 \text{ }^\circ\text{C}$ . Die minimal gemessene Oberflächentemperatur auf der gegenüberliegenden Bauteilseite beträgt knapp  $12,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Das bedeutet, dass die einwirkende Temperatur um etwa  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  verringert wurde. Die Messungen aus dem Demonstrator zeigen am 17. Februar 2023 um 15:00 Uhr eine Außentemperatur von knapp  $12,6 \text{ }^\circ\text{C}$ . Die zugehörige Innenwandtemperatur liegt bei  $5,1 \text{ }^\circ\text{C}$  und die Innenraumtemperatur bei  $6,6 \text{ }^\circ\text{C}$ . Grund für die sehr große Abweichung zur Simulation ist die vorausgegangene Kälteperiode, welche das Bauteil durchkühlte. Eine kurze Temperaturschwankung auf ca.  $12,6 \text{ }^\circ\text{C}$  konnte das Bauteil nicht ausreichend aufwärmen. Diese Beobachtung spricht zwar für eine gute Wärmedämmende Wirkung des Bauteils, macht jedoch den Vergleich mit der Simulation schwierig.

Abbildung 29: thermische Simulation eines Lehm-Kork-Gemisches mit  $12,6 \text{ }^\circ\text{C}$  Starttemperatur.



Quelle: ANSYS-Simulation 2023

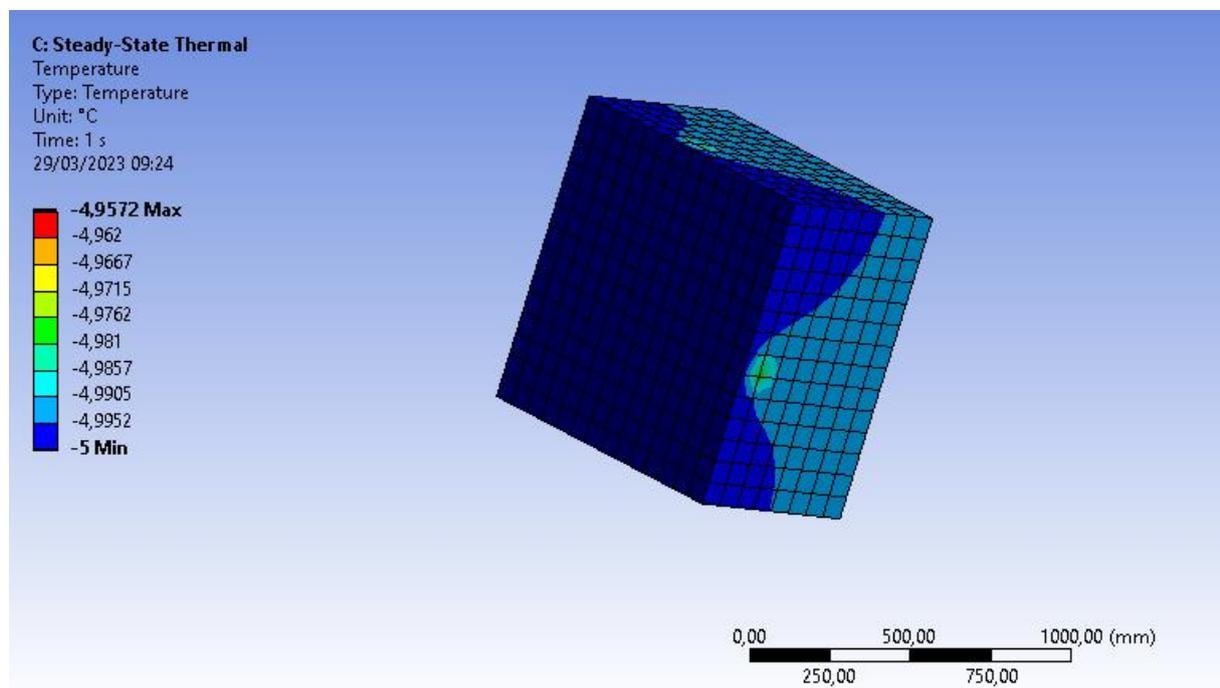
Für eine bessere Aussagekraft der Simulation soll für einen weiteren Vergleich eine Temperatur gewählt werden, welche in einem konstanteren Temperaturverlauf liegt. Auch am 23. März 2023 wurde um 17:00 Uhr eine Außentemperatur von ca.  $12,6 \text{ }^\circ\text{C}$  gemessen. Die Innenwandtemperatur lag dabei bei  $10,8 \text{ }^\circ\text{C}$  und die Innenraumtemperatur bei  $13 \text{ }^\circ\text{C}$ . In den 72 Stunden vor dem erwähnten Messpunkt lag die Außentemperatur bei durchschnittlich  $10,35 \text{ }^\circ\text{C}$ , die Innenwandtemperatur bei  $10,12 \text{ }^\circ\text{C}$  und die Innenraumtemperatur bei  $12,43 \text{ }^\circ\text{C}$ . Durch das Bilden von Durchschnittswerten lässt sich scheinbar ein besserer Vergleich zwischen den Daten der Simulation und den Messwerten generieren, weshalb ein dritter Zeitraum herangezogen werden soll, in welchem die Außentemperatur im Durchschnitt bei

nahezu 12,6 °C lag. Im gesamten Messzeitraum gibt es hierfür nur einen Zeitraum, welcher in Frage kommt (22. März 2023, 10:00 Uhr bis 24. März, 17:00 Uhr). In diesem 55-stündigen Zeitraum herrschte eine durchschnittliche Außentemperatur von 12,43 °C. Die Innenwandtemperatur lag bei durchschnittlich 12,12 °C. Die Messwerte ergeben ein Delta von 0,32 °C, während bei der Simulation ein Delta von 0,11 °C vorliegt. Daraus lässt sich schließen, dass das Bauteil voraussichtlich den angestrebten U-Wert von 0,20 W/m<sup>2</sup>K, knapp nicht einhalten kann.

Im Zuge der Simulation wurden auch winterliche Temperaturen im negativen Bereich ausprobiert. Da im Innenraum des Demonstrators jedoch zu keinem Zeitpunkt negative Temperaturen herrschten, lassen sich diese Werte (vgl. Abbildung 30) nicht mit den Messpunkten abgleichen.

Die Simulation ergab bei Temperaturen unter null ein Temperaturgefälle von 0,04 °C. Dieser Wert ist deutlich kleiner als jener bei einer Starttemperatur von 12,6 °C.

Abbildung 30: thermische Simulation eines Lehm-Kork-Gemisches mit -5 °C Starttemperatur.



Quelle: ANSYS-Simulation 2023

## Zusammenfassung der Ergebnisse

Insgesamt konnte durch die Simulation der tatsächliche U-Wert des Bauteils nicht näher bestimmt werden. Die Ergebnisse lassen jedoch vermuten, dass das verwendete Lehm-Kork-Gemisch einen U-Wert nahe dem angestrebten U-Wert von 0,20 W/m<sup>2</sup>K aufweist. Weitere Untersuchungen zu diesem Bereich sind im Kapitel „Temperatur“, ab Seite 265 zu finden.

### Zusammenfassung Wärmedurchgangswiderstand

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine Vielzahl an organischen Zuschlagstoffen für die Optimierung der Dämmeigenschaften in Frage kommen würden. Viele Materialien unterscheiden sich in ihren bauphysikalischen Eigenschaften nur geringfügig wodurch die Bandbreite an Möglichkeiten, über die der Forschung hinausgeht.

In Tabelle 8 sind die Ergebnisse der durchgeführten Bauteiluntersuchungen zusammengefasst dargestellt:

Tabelle 8: Zusammenfassung Wärmedurchgangswiderstand.

Dämmung	U-Wert	Min. Wandstärke	Min. Dämmstärke	Aufbau
Korkgranulat	0,28 W/(m <sup>2</sup> K)	60 cm	-	einschichtig
		44 cm	19 cm	zweischichtig
		51 cm	11 cm	dreischichtig
	0,20 W/(m <sup>2</sup> K)	83 cm	-	einschichtig
		56 cm	31 cm	zweischichtig
		63 cm	13 cm	dreischichtig

Quelle: eigene Anfertigung 2022

Aufgrund der guten ökologischen und bauphysikalischen Eigenschaften (vgl. Tabelle 4, S. 32) wurde vordergründig Korkgranulat als Leichtzuschlag untersucht. Je nach Wandaufbau und angestrebtem U-Wert können durch diesen organischen Zuschlagstoff Wandstärken von minimal 44 cm erreicht werden.

Insgesamt erweist sich ein zweischichtiges Bauteil mit Außendämmung als besonders günstig, da hier ein effizienter Lastabtrag stattfinden kann und Tauwasseranfall vermieden wird. Gleichzeitig können durch zweischichtige Bauteile minimale Wandquerschnitte erreicht werden, was ein wesentliches Ziel der Forschung darstellt. Eine Aussage darüber, wie der Verbund und Verlauf von Dämm- und Tragschicht aussieht, sollen die nächsten Kapitel liefern.

Aus den durchgeführten Untersuchungen ergeben sich somit drei wesentliche Forschungsfragen:

1. Wie viel Kork kann der Tragschicht aus statischer Sicht beigemischt werden?
2. Wie viel Kork kann der Dämmschicht aus statischer Sicht maximal beigemischt werden?
3. Wie muss der Übergang zwischen Dämm- und Tragschicht für einen kraftschlüssigen Zusammenhalt gestaltet werden?

## Festigkeit

Um die bisherigen numerischen Analysen praktisch zu untermauern, werden im nächsten Schritt einzelne Untersuchungen im Labor durchgeführt. Da in den vorangegangenen Kapiteln Korkgranulat als Zuschlagstoff ein besonders großes Potenzial ergeben hat, soll das Baustoffverhalten der eingangs analysierten Kork-Lehm-Mischungen untersucht werden.

Im Zuge des Kapitels werden zunächst relevante Kenngrößen erläutert. Die aufgelisteten Versuche wurden, soweit nicht anders gekennzeichnet, nach Vorgabe der Lehmregeln<sup>69</sup> des Dachverband Lehms (DVL, 2009) durchgeführt.

Die gewählten Bezeichnungen geben stets Auskunft über die genaue Zusammensetzung des Lehms. An erster und zweiter Position wird der gewählte Lehm (Lehm grob LG oder Lehm fein LF) in Verbindung mit dem eingebrachten Volumenprozent genannt. An dritter und vierter Position wird dann der gewählte Zuschlagstoff, ebenfalls in Verbindung mit den jeweiligen Mischungsverhältnissen in Prozent, genannt (K = Kork). An fünfter und sechster Stelle wird angegeben, wie viel Wasser (W) der Mischung noch zugesetzt werden musste, um eine homogene Masse zu erreichen. An siebter Stelle kann durch den Buchstaben (S) auf eine Stabilisierung (Geogitter) hingewiesen werden. Wenn keine Stabilisierung vorliegt, entfällt die siebte Stelle der Gemischkennzeichnung. An vorletzter und letzter Stelle wird vermerkt, ob der Mischung zusätzlicher Ton (T) beigemischt wurde und in welchem prozentualen Anteil. Auch diese beiden Stellen können einfach entfallen, wenn kein zusätzlicher Ton beigemischt wurde.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<u>LG</u>	<u>50</u>	<u>K</u>	<u>50</u>	<u>W</u>	<u>6</u>	<u>S</u>	T	1

Stabilisiertes Gemisch aus: 50% grobem Stampflehm und 50% Korkzuschlag, aufbereitet mit 6% Wasser und 1% Tonzugabe.

## Allgemeine Anforderungen und Eigenschaften

Die Anforderungen an lasttragende Wände aus Stampflehm lassen sich im Detail den Lehmregeln des DVL entnehmen. Im Folgenden findet eine Auflistung der für die Tragfähigkeit relevanten Anforderungen und Eigenschaften von Stampflehm statt.

### Rohdichte

Für gewöhnlich beträgt die Rohdichte von verdichtetem Stampflehm 1700 – 2400 kg/m<sup>3</sup>.<sup>70</sup> Durch das Beimengen von geeigneten Zuschlagstoffen kann die Rohdichte minimiert werden. Grundsätzlich nimmt die Druckfestigkeit mit abnehmender Rohdichte ebenfalls ab.

<sup>69</sup> Vgl. Dachverband Lehm e.V. 2008.

<sup>70</sup> Vgl. Röhlen und Ziegert 2020, S. 212.

### Schwindmaß

Um Rissbildungen zu vermeiden, sollte das Schwindmaß von Stampflehmteilen bei höchstens zwei Prozent liegen.<sup>71</sup> Bei monolithischen Sichtbauteilen sollte das Schwindmaß bei etwa 0,5 % liegen.<sup>72</sup>

### Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul

Damit Stampflehm für den Einsatz als lasttragendes Bauteil in Frage kommt, muss er eine Druckfestigkeit von mindestens 2 N/mm<sup>2</sup> und einen Elastizitätsmodul von 750 N/mm<sup>2</sup> aufweisen.<sup>73</sup> Stampflehmmischungen, welche die Druckfestigkeit von 2 N/mm<sup>2</sup> einhalten, erfüllen die Anforderungen an den Elastizitätsmodul für gewöhnlich problemlos.<sup>74</sup>

An nichttragende Stampflehmwände werden zunächst keine Mindestanforderungen gestellt. Um die Anforderungen an Abriebfestigkeit zu erfüllen, sollte jedoch mindestens eine Druckfestigkeit von 1,5 N/mm<sup>2</sup> eingehalten werden.<sup>75</sup>

Zur Bemessung von lasttragenden Stampflehmwänden wird aktuell auf einen globalen Sicherheitsbeiwert zurückgegriffen, welcher eine Abminderung der Druckfestigkeit auf zulässige Zugspannungen vorsieht (vgl. Tabelle 9).<sup>76</sup>

Tabelle 9: Zulässige Druckspannungen von Bauteilen aus Stampflehm.

Druckfestigkeit in N/mm <sup>2</sup>	Zulässige Druckspannung N/mm <sup>2</sup>
2	0,3
3	0,4
4	0,5

Quelle: eigene Anfertigung 2022 nach Informationen von (Röhlen und Ziegert 2020, S. 227)

### Witterungsbeständigkeit

Bauteile aus Stampflehm sind als nicht feuchte- oder frostfest einzustufen.<sup>77</sup> Ein Witterungsschutz kann daher sinnvoll sein. Durch die Verwendung von fetterem Lehm und der Zugabe von Fasern (bspw. Flachs oder Stroh) kann eine Stampflehmmischung jedoch resistenter gegen Witterungseinflüsse gemacht werden.<sup>78</sup>

<sup>71</sup> Vgl. Röhlen und Ziegert 2020, S. 212.

<sup>72</sup> Vgl. Röhlen und Ziegert 2020, S. 212.

<sup>73</sup> Vgl. Röhlen und Ziegert 2020, 212f.

<sup>74</sup> Vgl. Röhlen und Ziegert 2020, S. 212.

<sup>75</sup> Vgl. Röhlen und Ziegert 2020, S. 212.

<sup>76</sup> Vgl. Röhlen und Ziegert 2020, S. 227.

<sup>77</sup> Vgl. Röhlen und Ziegert 2020, S. 213.

<sup>78</sup> Vgl. Röhlen und Ziegert 2020, S. 213.

## *Brandschutz*

Stampflehm mit einem Fasergehalt von unter einem Prozent Masseanteil kann in die Baustoffklasse A1 (nicht brennbar) eingestuft werden. Mischungen mit einem größeren Anteil an organischen Zuschlagstoffen lassen sich nicht ohne Versuchsreihen einer Baustoffklasse zuordnen. Aus Sicht der Forschung wäre eine Mindesteinstufung als schwerentflammbar, also die Baustoffklasse B1, oder besser zu erwarten.

## *Bauliche Anforderungen*

Wie bereits im Kapitel „Stand der Forschung/Baupraxis“ (S. 13) erwähnt, dürfen tragende Lehmwände nur in Gebäuden mit maximal zwei Vollgeschossen Anwendung finden.<sup>79</sup> Die Geschosshöhe wird für tragende Stampflehmwände auf 3,25 m beschränkt.<sup>80</sup> Sollen mehr als zwei Vollgeschosse oder Geschosshöhen über 3,25 m ausgeführt werden, ist eine Zustimmung im Einzelfall durchzuführen.<sup>81</sup>

Um ein Knicken zu vermeiden, sind tragende Außenwände aus Stampflehm mit einer Mindeststärke von 32,5 cm und Innenwände mit einer Stärke von 24 cm auszuführen.<sup>82</sup>

## *Anforderungen Bewehrung*

Geogitter können in Bauteile aus Stampflehm als konstruktive Bewehrung oder zur Rissbreitenbeschränkung eingebracht werden.<sup>83</sup> Üblicherweise finden Geogitter Anwendung im Erdtiefbau. Die grobmaschigen Polymergitter (häufig Polyethylen [PEHD], Polypropylen [PP], Polyethylenterephthalat [PET]) werden zur gleichmäßigen und großflächigen Verteilung von anfallenden Lasten genutzt. Dadurch wird die Tragfähigkeit erhöht. Die Gitter werden bei Stampflehmteilen üblicherweise in regelmäßigen Abständen – jedoch nicht in jede Stampfschicht – eingestampft. Um die Gitter kraftschlüssig einzuarbeiten, dürfen die Gitter nicht einfach auf bereits verdichtete Schichten aufgelegt werden. Besser ist es zwei Drittel der Lehmmischung in die Schalung einzufüllen, das Geogitter horizontal auf das lose Gemisch zu legen und das übrige Drittel Stampflehmmischung in die Schalung zu füllen.<sup>84</sup> Erst nach dem vollständigen Einfüllen der Geogitter-Schicht wird das Gemisch maximal verdichtet.

Die Maschenweite von Geogittern sollte mindestens dem 1,5-Fachen der Größtkornabmessung entsprechen.<sup>85</sup>

## *Herstellungsprozess*

Um eine Stampflehmwand herzustellen sind im Wesentlichen vier Herstellungsschritte durchzuführen. Da es sich beim Lehm- und Ziegelbau um eine traditionelle Bauweise handelt, gibt es jedoch keine allgemeingültige Vorgehensweise.

---

<sup>79</sup> Vgl. Röhlen und Ziegert 2020, S. 227.

<sup>80</sup> Vgl. Röhlen und Ziegert 2020, S. 227.

<sup>81</sup> Vgl. Röhlen und Ziegert 2020, S. 227.

<sup>82</sup> Vgl. Röhlen und Ziegert 2020, S. 228.

<sup>83</sup> Vgl. Röhlen und Ziegert 2020, S. 224.

<sup>84</sup> Vgl. Röhlen und Ziegert 2020, S. 219.

<sup>85</sup> Vgl. Röhlen und Ziegert 2020, S. 225.

### *Erstellung Stampflehmischung*

Vor jeder Anwendung ist auf eine ausreichende Homogenität und einen geeigneten Feuchtegehalt der Stampflehmischung zu achten. Ist eine Mischung durch Transport oder Lagerung verklumpt und dadurch inhomogen, kann eine Aufbereitung durch den Zwangsmischer die geforderte Homogenität zurückbringen.<sup>86</sup> Der optimale Feuchtegehalt lässt sich leicht durch eine Handprobe herausfinden: Nimmt man eine Hand voll Lehmgemisch in die Hand und drückt diese zusammen, soll das Lehmgemisch gut zusammenhalten, sich jedoch nicht wesentlich plastisch verformen.<sup>87</sup>

### *Vorbereiten der Schalung*

Um ein sauberes Endresultat zu erhalten, muss die Schalung einen Schalldruck von bis zu 60 kN/m<sup>2</sup> aushalten.<sup>88</sup> Besonders gut eignen sich daher Schalungen aus dem Beton-Bau. Als Trennmittel eignen sich verschiedenste Pflanzenöle (exkl. Leinöl).<sup>89</sup>

### *Einfüll- und Verdichtungsvorgang*

Um eine Entmischung des Stampflehmgemischs zu vermeiden, sollte das Material nicht mit zu großer Fallhöhe, gleichmäßig in die Schalung eingebracht werden.<sup>90</sup> Pro Schicht werden circa 15 – 20 cm loser Stampflehm in die Schalung eingefüllt und anschließend maximal verdichtet (Verdichtung um 1/3).<sup>91</sup> Um den Verdichtungsprozess zu erleichtern, kann beispielsweise auf pneumatische Stampfer zurückgegriffen werden.

### *Ausschalen und Trocknen*

Bauteile aus Stampflehm können unmittelbar nach dem Verdichtungsprozess ausgeschalt werden. Die spezifische Trocknungsdauer ist abhängig von der Bauteildicke und den klimatischen Randbedingungen. Ein Würfel mit 20 cm Kantenlänge braucht etwa sechs Wochen, um vollständig durchgetrocknet zu sein.<sup>92</sup> Um einer Schimmelpilzbildung entgegenzuwirken, sollten die Bauteiloberflächen während der Trocknung stets gut belüftet sein.<sup>93</sup> Da das Lehmbauteil bei der Trocknung leicht schwindet, können bei diesem Herstellungsschritt leichte Risse und Verformungen entstehen. Feine Risse können schon beim Trocknen durch „[...] Druck auf die Rissufer [...]“<sup>94</sup> geschlossen werden. Größere Risse sind erst nach dem Trocknungsprozess durch partielles Anfeuchten der Oberfläche zu retuschieren.<sup>95</sup>

---

<sup>86</sup> Vgl. Röhlen und Ziegert 2020, S. 215.

<sup>87</sup> Vgl. Röhlen und Ziegert 2020, S. 216.

<sup>88</sup> Vgl. Röhlen und Ziegert 2020, S. 216.

<sup>89</sup> Vgl. Röhlen und Ziegert 2020, S. 217.

<sup>90</sup> Vgl. Röhlen und Ziegert 2020, S. 218.

<sup>91</sup> Vgl. Röhlen und Ziegert 2020, S. 219.

<sup>92</sup> Vgl. Volhard und Röhlen 2009, S. 23.

<sup>93</sup> Vgl. Röhlen und Ziegert 2020, S. 221.

<sup>94</sup> Röhlen und Ziegert 2020, S. 221.

<sup>95</sup> Vgl. Röhlen und Ziegert 2020, S. 221.

## Druckfestigkeitsprüfung

### Methodik

Um einen groben Überblick über die unterschiedlichen Lehm-Kork-Mischungen zu erhalten, wurden zunächst Probewürfel mit 10 cm Kantenlänge erstellt, welche für jeweils zwei Wochen bei 20,7 °C und knapp 65 % Luftfeuchtigkeit getrocknet wurden.

Anhand der Ergebnisse (Druckfestigkeit und Rohdichte), wurden im nächsten Schritt die Lehm-Kork-Mischungen mit dem größten Potenzial ausgewählt und erneut, diesmal nach den geltenden Lehm-Bau-Regeln, getestet. Laut der Lehm-Bau-Regeln sind für die Prüfung der Druckfestigkeit „mindestens drei Probewürfel[] [...] mit einer Kantenlänge von 20 cm in gleicher Verdichtung wie auf der Baustelle herzustellen.“<sup>96</sup> Nach etwa sechs Wochen (Trocknung bei 20,7 °C Raumtemperatur und 65 % Luftfeuchtigkeit) wird dann die Druckfestigkeit getestet, wobei „[d]er kleinste Einzelwert [...] maßgebend [ist]“<sup>97</sup>

Die Probekörper mit einer Kantenlänge von 20 cm sollen auch für die Ermittlung der Rohdichte dienen. Dafür wird aus den drei erstellten Würfeln die mittlere Rohdichte herangezogen.<sup>98</sup> Die drei Einzelwerte dürfen dabei höchstens um 10 % vom bestimmten Mittelwert abweichen.<sup>99</sup>

Für die beschriebenen Untersuchungen wurde ein grobes Stampflehm-Gemisch der Firma Claytec (vgl. Tabelle 5, S. 34) und feines Korkgranulat (vgl. Abbildung 31) mit einer Korngröße von 1,00 – 2,00 mm und einer Rohdichte von 133 kg/m<sup>3</sup> (vgl. Tabelle 6, S. 35) verwendet. Als Stabilisierung wurde das powerRIBS Hochleistungs-Flachsgewebe der Firma Bcomp verwendet.

Um die im Kapitel „Wärmedurchgangswiderstand“ definierten Volumenverhältnisse im Labor nachzuahmen musste zunächst die Rohdichte des unverdichteten Stampflehms gemessen werden (vgl. Tabelle 5, S.34), sodass diese ins Verhältnis mit der Rohdichte des losen Korkgranulats gesetzt werden konnte. Dabei beziehen sich die Massen zunächst auf ein Volumen von einem Kubikmeter. Die Trockenrohddichte von 2.300 kg/m<sup>3</sup> (Stampflehm) kann an dieser Stelle nicht herangezogen werden, da die Rohdichte des Korks als loses Gemisch angegeben ist und die maximale Verdichtung des Korkgranulats unbekannt ist. Um einen Kubikmeter Lehm-Kork-Gemisch (LG70K30) im Verhältnis 70 zu 30 zu mischen, werden demnach folgende Massen an Kork und Lehm miteinander vermischt:

$$\text{Anteil Lehm: } 1.500 \text{ kg/m}^3 \cdot 1 \text{ m}^3 \cdot 0,7 = 1.050 \text{ kg} \quad (12)$$

$$\text{Anteil Kork: } 133 \text{ kg/m}^3 \cdot 1 \text{ m}^3 \cdot 0,3 = 39,9 \text{ kg} \quad (13)$$

Über diese Formel lassen sich über das Gesamtvolumen stets die einzubringenden Massen in kg berechnen. Grundlage dieser Berechnung ist die Annahme, dass sich innerhalb des homogenen Gemisches das Korkgranulat und der Stampflehm gleichweit verdichten lassen (Verdichtung um ca. 1/3). Somit bleiben die angestrebten Volumenprozent, vor und nach dem Verdichtungsprozess, stets gleich.

<sup>96</sup> Volhard und Röhlen 2009, S. 23.

<sup>97</sup> Volhard und Röhlen 2009, S. 23.

<sup>98</sup> Vgl. Volhard und Röhlen 2009, S. 23.

<sup>99</sup> Vgl. Volhard und Röhlen 2009, S. 23.

Abbildung 31: Korkgranulat mit einer Korngröße von 1,00 - 2,00 mm.

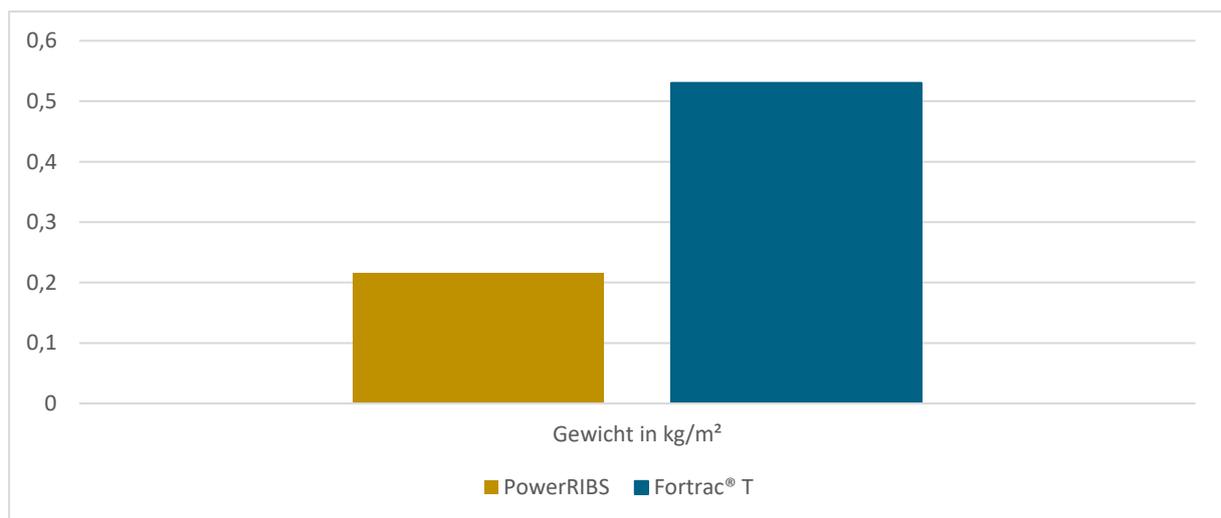


Foto: Schlegel 2021

### PowerRIBS Hochleistungs-Flachsgewebe

Um die Lehmtafeln konsequent nachhaltig ausbilden zu können, soll anstelle eines Geogitters auf Polymerbasis, ein Hochleistungs-Flachsgewebe die Anforderungen an konstruktive Bewehrung und Rissbreitenbeschränkung erfüllen. Aus Sicht der Forschung kann das Flachsgewebe der Firma Bcomp diese Ansprüche erfüllen und ist außerdem – im Vergleich zu herkömmlichen Geogittern<sup>100</sup> – als besonders leicht und ökologisch einzustufen (vgl. Abbildung 32).

Abbildung 32: Vergleich herkömmliches Geogitter mit Flachs-Hochleistungsgewebe.



Quelle: eigene Anfertigung 2022 mit Daten von (Institut für Bauen und Umwelt e.V. 2014, S. 5) und (Bcomp 2016, S. 1).

<sup>100</sup> Vgl. Institut für Bauen und Umwelt e.V. 2014.

Die Körnung der verwendeten Lehmischung beträgt 0-16 mm, wobei Überkorn bis 22 mm möglich ist.<sup>101</sup> Somit sollte die Maschenweite ca. 33 mm aufweisen. Die gewählte Bewehrung von Bcomp weist eine Maschenweite von 28 mm auf und eignet sich somit gut für die gewählte Stampflehmischung von Claytec.

Abbildung 33 zeigt das Gewebe. In eine Richtung (hier vertikal) wurden die Flachsfasern zusätzlich mit Garn bewehrt.

Abbildung 33: PowerRIBS Hochleistungs-Flachsgewebe der Firma Bcomp.

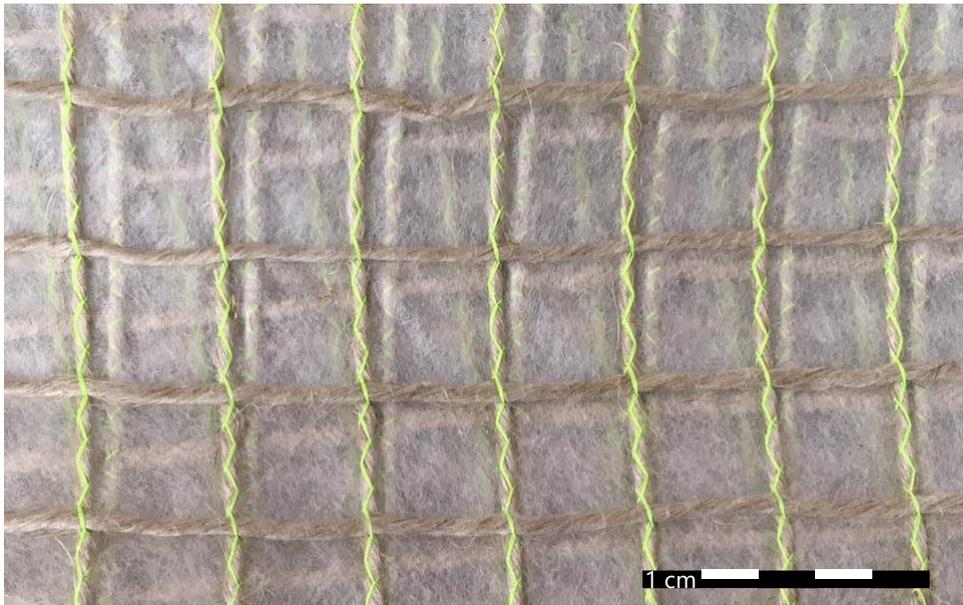


Foto: Daube 2022

---

<sup>101</sup> Vgl. Claytec 2022.

## Versuchsdurchführung

Die numerischen Analysen haben, wie bereits erwähnt, ein besonders großes Potenzial einer Lehm-Kork-Mischung ergeben. Um dies zu überprüfen, wurden im Folgenden mehrere Untersuchungsreihen durchgeführt. Die verwendete Stampflehmischung der Firma Claytec wurde erdfeucht geliefert und hat dadurch laut Hersteller einen Feuchtegehalt von 8 % bis 12 %.<sup>102</sup> Durch Witterungseinflüsse oder Lagerungsdauer kann der genaue Gehalt jedoch etwas schwanken.

### Untersuchungsreihe 1

Durch die Durchführung der ersten Untersuchungsreihe soll eine Analyse von unterschiedlichen Kork-Lehm-Mischungen stattfinden, sodass im Anschluss optimale Rezepturen abgeleitet werden können. Die erste Versuchsreihe findet anhand von Probekörpern mit 10 cm Kantenlänge statt. Die Trocknungsdauer wurde auf 14 Tage beschränkt (20,7 °C Raumtemperatur und 65 % Luftfeuchtigkeit).

Für aussagekräftige Ergebnisse wurde bereits beim Anmischen eine Bewertung der Rezeptur bezüglich ihrer Homogenität abgegeben. Auch der Verdichtungsprozess wurde analysiert und ein Weichen der Mischung dokumentiert. Mischungen, welche zu fett sind, oder einen zu hohen Wassergehalt aufweisen, werden vom Verdichtungswerkzeug verdrängt, wodurch eine gleichmäßige Verdichtung schwierig wird.

Nach der Trocknungszeit wurde die Rohdichte des jeweiligen Probekörpers ermittelt und dokumentiert. Ein abschließender Druckfestigkeitsversuch soll Auskunft über die Eignung als lasttragendes Bauteil liefern (vgl. Kapitel „Allgemeine Anforderungen und Eigenschaften“ ab Seite 64).

Auf Grundlage der ersten Untersuchungsreihe soll anschließend eine zweite Untersuchungsreihe detaillierte Erkenntnisse liefern.

### **Untersuchungsreihe 1 – 30 % Korkanteil**

Um ein Gefühl für die richtige Konsistenz des Lehm-Kork-Gemischs und ihren Einfluss auf Druckfestigkeit, Rohdichte und Schwindmaß, zu bekommen, wurden zunächst drei Mischungen erstellt, welche sich allein durch die Wasserzugabe unterscheiden (vgl. Tabelle 10). In eine weitere, vierte Mischung mit 5 % Wasserzugabe wurde ein Flachs-Gewebe der Firma Bcomp eingelegt, welches die mechanischen Eigenschaften der Mischung verbessern soll. Das Flachsgewebe wurde mittig in den Probewürfel eingestampft (vgl. Kapitel „Anforderungen Bewehrung“ ab Seite 66). Durch die sehr begrenzte Größe der Probekörper (10 cm x 10 cm x 10 cm) und einer Maschenweite von 2,8 cm ist bei dieser Versuchsdurchführung nur mit einer geringen Steigerung der Druckfestigkeit zu rechnen.

---

<sup>102</sup> Vgl. Wolf 2021.

Tabelle 10: Übersicht Probekörper 100 mm.

Gemisch	Probekörper [mm]	Trocknungszeit	Mischung	Rohdichte [ $\text{kg/m}^3$ ]
LG70K30W4	100 x 100 x 100	14 Tage	inhomogen	1.707
LG70K30W5	100 x 100 x 100	14 Tage	homogen	1.700
LG70K30W5S	100 x 100 x 100	14 Tage	homogen	1.701
LG70K30W7.5	100 x 100 x 100	14 Tage	homogen leichtes Weichen	1.609

Quelle: eigene Anfertigung 2022

Die erste Untersuchungsreihe zeigt, dass eine zu geringe Wasserzugabe zu einem inhomogenen Gemisch führt (LG70K30W4). Aus einer zu großen Wasserzugabe resultierte zwar ein homogenes Gemisch, beim Verdichten wurde jedoch ein leichtes Weichen beobachtet. Somit stellte sich, für ein Lehm-Kork-Gemisch mit 30 % Korkanteil, eine Wasserzugabe von 5 %, als optimal heraus.

Auf die Rohdichte hatte der spezifische Wassergehalt einen vernachlässigbaren Einfluss.

Abbildung 34 zeigt die hergestellten Probekörper kurz nach der Fertigstellung. Anhand der Oberflächenbeschaffenheiten der Würfel, lassen sich Rückschlüsse auf die beschriebene Homogenität ziehen. Während Probekörper LG70K30W4 bröselig und instabil wirkt, sieht die Oberfläche von Körper LG70K30W5 homogen und gleichmäßig aus. Körper LG70K30W7.5 wirkt in seiner äußeren Erscheinung zu feucht – jedoch homogen.

Abbildung 34: Probekörper mit 30 % Korkgehalt.

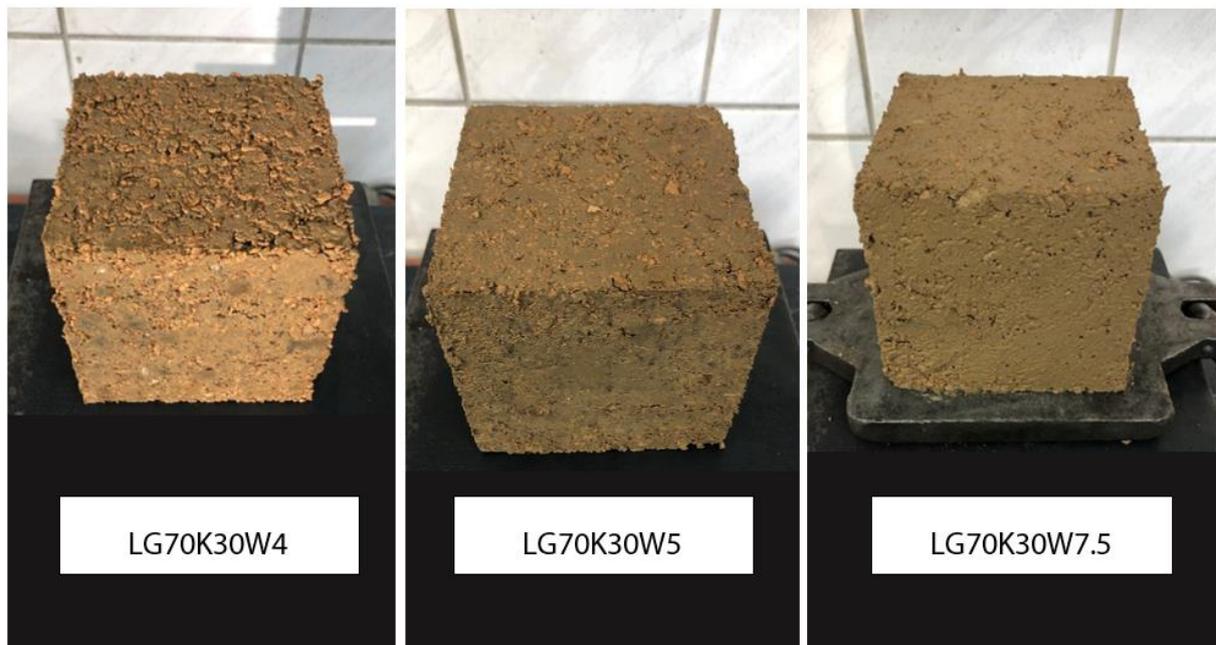


Foto: Schlegel 2021

Nach der beschriebenen Trocknungsdauer von 14 Tagen wurden die Probekörper hinsichtlich ihrer Druckfestigkeit geprüft. Die Prüfungen fanden mit einer Universalprüfmaschine Z 250 der Firma

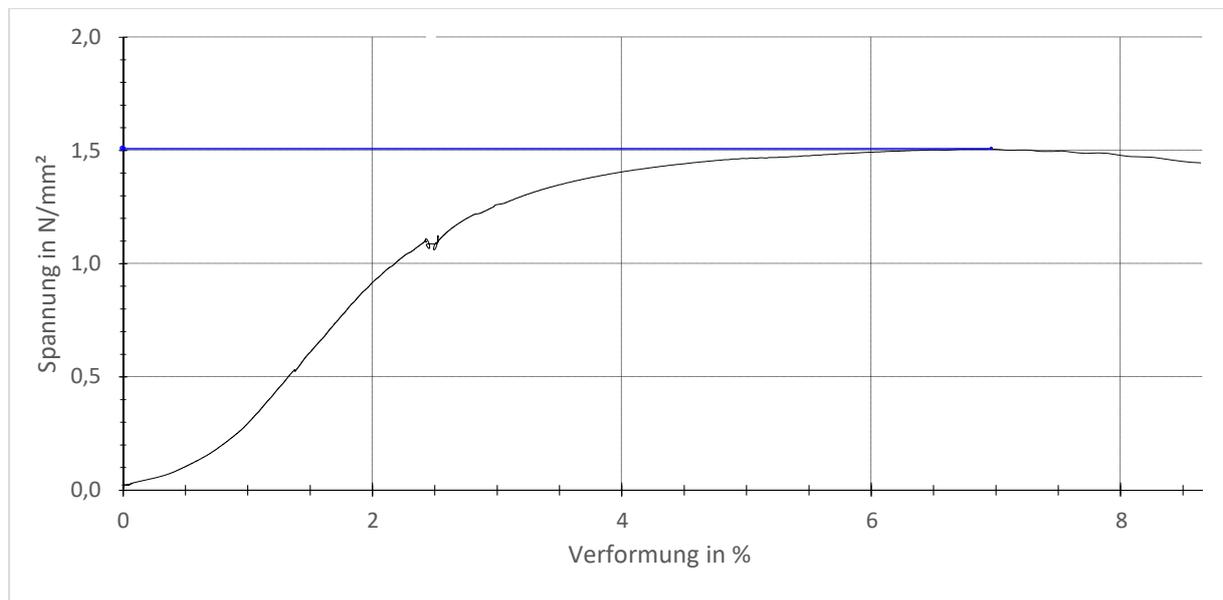
Zwick/Roell unter einer Vorkraft von 250 N und einer Prüfgeschwindigkeit von 400 N/s statt. Die Prüfung ergab eine maximale Druckfestigkeit von  $1,95 \text{ N/mm}^2$  für das Gemisch LG70K30W5S. Sowohl das Gemisch mit 4 % Wasserzugabe als auch 7,5 % Wasserzugabe schnitten deutlich schlechter ab. Der bewehrte Probekörper zeigte nur eine leichte Steigerung der Druckfestigkeit (um 4,2 %) und eine Steigerung der Höchstkraft beim Bruch um etwa 930 N (vgl. Tabelle 11). Daraus lässt sich auf eine Verbesserung der lasttragenden Eigenschaft durch das Flachsgewebe schließen.

Tabelle 11: Ergebnisse Druckfestigkeitsprüfung Untersuchungsreihe 1 - 30 % Korkanteil.

Gemisch	Prüffläche [mm]	Prüfdatum	Druckfestigkeit [ $\text{N/mm}^2$ ]	Höchstkraft bei Bruch [N]	Graph
LG70K30W4	99,7 x 100,6	25.11.2021	1,51	15.104,0	Abbildung 35
LG70K30W5	99,7 x 100	25.11.2021	1,87	18.633,4	Abbildung 36
LG70K30W5S	100,4 x 100	25.11.2021	1,95	19.563,7	Abbildung 37
LG70K30W7,5	100,4 x 99,5	25.11.2021	1,64	16.399,4	Abbildung 38

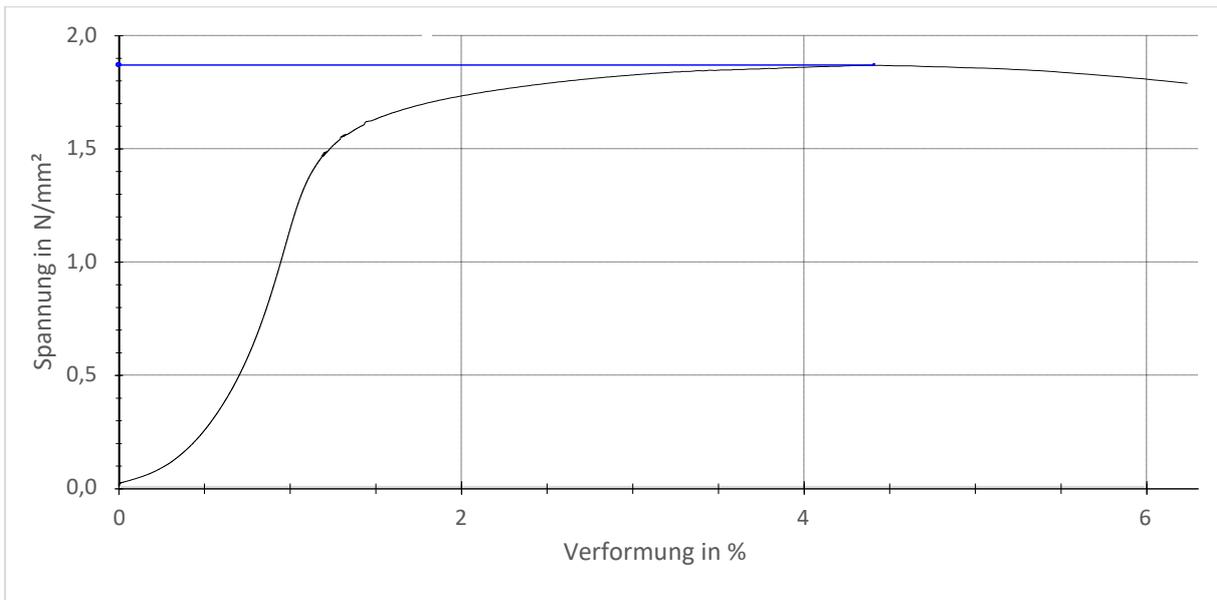
Quelle: eigene Anfertigung 2022

Abbildung 35: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG70K30W4.



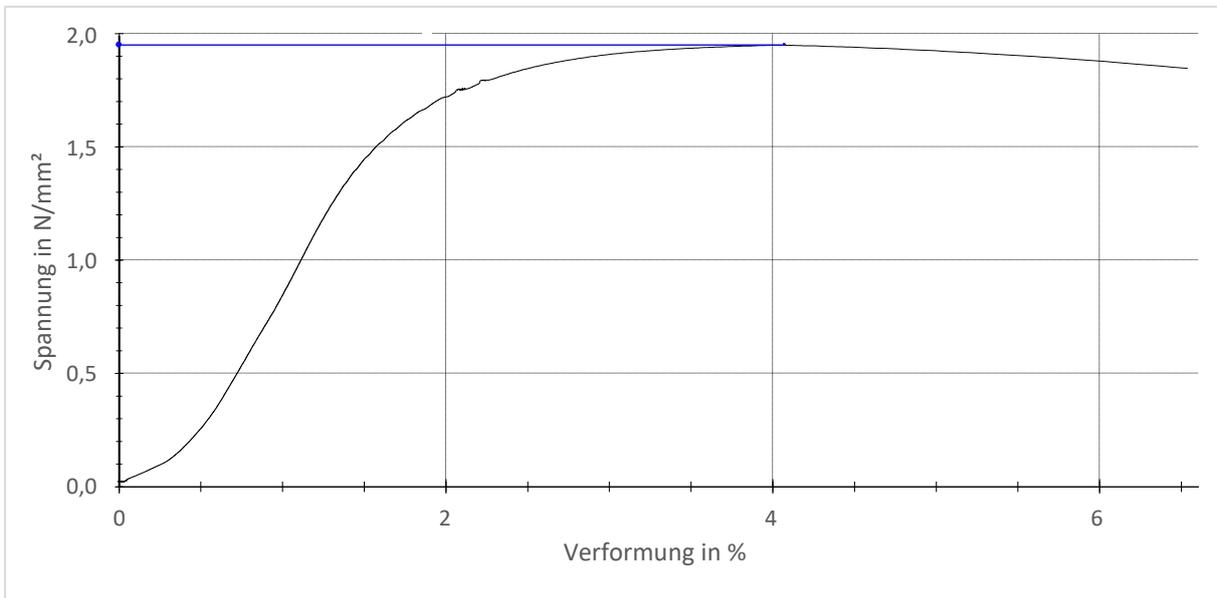
Quelle: Prüfprotokoll vom 25.11.

Abbildung 36: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG70K30W5.



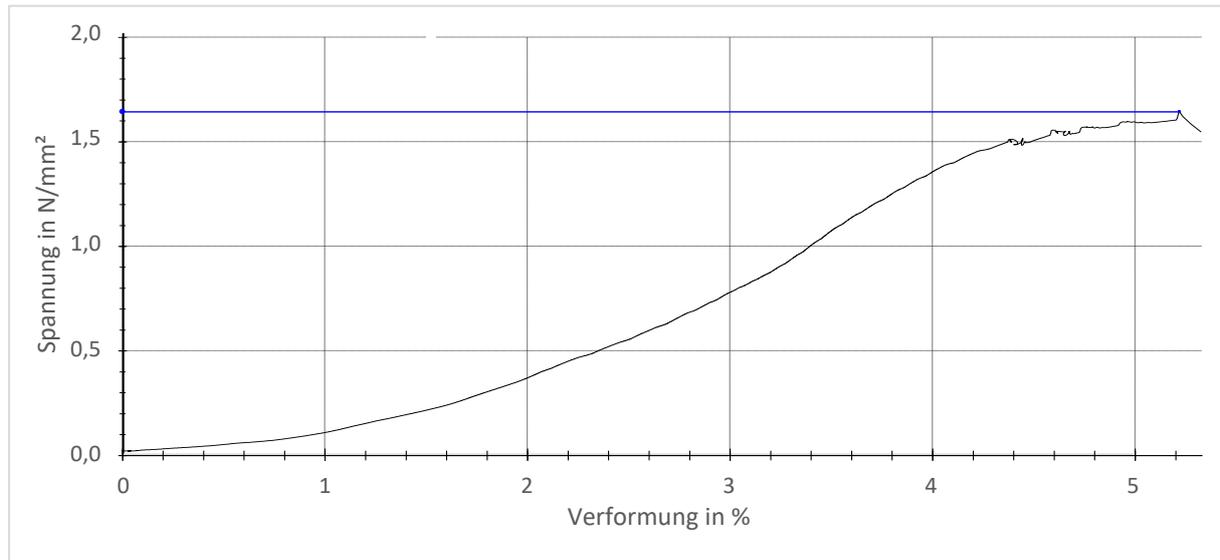
Quelle: Prüfprotokoll vom 25.11.

Abbildung 37: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG70K30W5S.



Quelle: Prüfprotokoll vom 25.11.

Abbildung 38: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG70K30W7.5.



Quelle: Prüfprotokoll vom 25.11.

Die Versuche zeigen, dass ein Lehm-Kork-Gemisch mit 30 % Korkanteil für lasttragende Bauteile in Frage kommen kann. Im zweiten Untersuchungsschritt sollen daher drei Probekörper mit 20 cm Kantenlänge im Mischverhältnis LG70K30W5 und LG70K30W5S weiter analysiert werden. Aus diesem Versuch soll schließlich auch eine Aussage über die Steigerung der Druckfähigkeit, in Verbindung mit eingebrachten Flachsgittern, getroffen werden.

### Untersuchungsreihe 1 – 40 % Korkanteil

Auch für dieses Lehm-Kork-Gemisch wurden zunächst drei Mischungen angerührt, welche sich allein durch die Wasserzugabe unterscheiden (vgl. Tabelle 12). In eine weitere, vierte Mischung mit 7,5 % Wasserzugabe wurde ein Flachs-Gewebe der Firma Bcomp eingelegt, welches die physikalischen Eigenschaften der Mischung verbessern soll. Das Flachsgewebe wurde mittig in den Probewürfel eingestampft (vgl. Kapitel „Anforderungen Bewehrung“ ab Seite 66). Durch die sehr begrenzte Größe der Probekörper (10 cm x 10 cm x 10 cm) und einer Maschenweite von 2,8 cm ist bei dieser Versuchsdurchführung ebenfalls nur mit einer geringen Steigerung der Druckfestigkeit zu rechnen.

Tabelle 12: Übersicht Probekörper 100 mm.

Gemisch	Probekörper [mm]	Trocknungszeit	Mischung	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
LG60K40W5	100 x 100 x 100	14 Tage	leicht inhomogen	1.473
LG60K40W7.5	100 x 100 x 100	14 Tage	homogen	1.461
LG60K40W7.5S	100 x 100 x 100	14 Tage	homogen	1.439
LG60K40W10	100 x 100 x 100	14 Tage	homogen leichtes Weichen	1.401

Quelle: eigene Anfertigung 2022

Auch in dieser Untersuchungsreihe führte eine geringe Wasserzugabe (5 %) zu einem inhomogenen Gemisch (LG60K40W5). Aus einer zu großen Wasserzugabe (10 %) resultierte erneut ein homogenes Gemisch, beim Verdichten wurde aber ebenfalls ein leichtes Weichen beobachtet. Insgesamt ließ sich durch diese Versuchsreihe beobachten, dass der zunehmende Korkanteil einen starken Einfluss auf die Gesamtkonsistenz der Stampflehmischung hat. Während bei einem Korkanteil von 30 % eine Wasserzugabe von 7,5 % zu einer zu wässrigen Mischung führte, verlieh die Zugabe von 7,5 % Wasser der LG60K40W7.5-Mischung eine optimale Verarbeitungskonsistenz.

Auf die Rohdichte hatte der spezifische Wassergehalt erneut einen vernachlässigbaren Einfluss.

Abbildung 39 (S. 76) zeigt die hergestellten Probekörper kurz nach der Fertigstellung. Anhand der Oberflächenbeschaffenheiten der Würfel, lassen sich erneut Rückschlüsse auf die beschriebene Homogenität ziehen. Während Probekörper LG60K40W5 bröselig und instabil wirkt, sieht die Oberfläche von Körper LG60K40W7.5 homogen und gleichmäßig aus. Körper LG60K40W10 wirkt in seiner äußeren Erscheinung zu feucht und matschig – jedoch homogen.

Abbildung 39: Probekörper mit 40 % Korkgehalt.

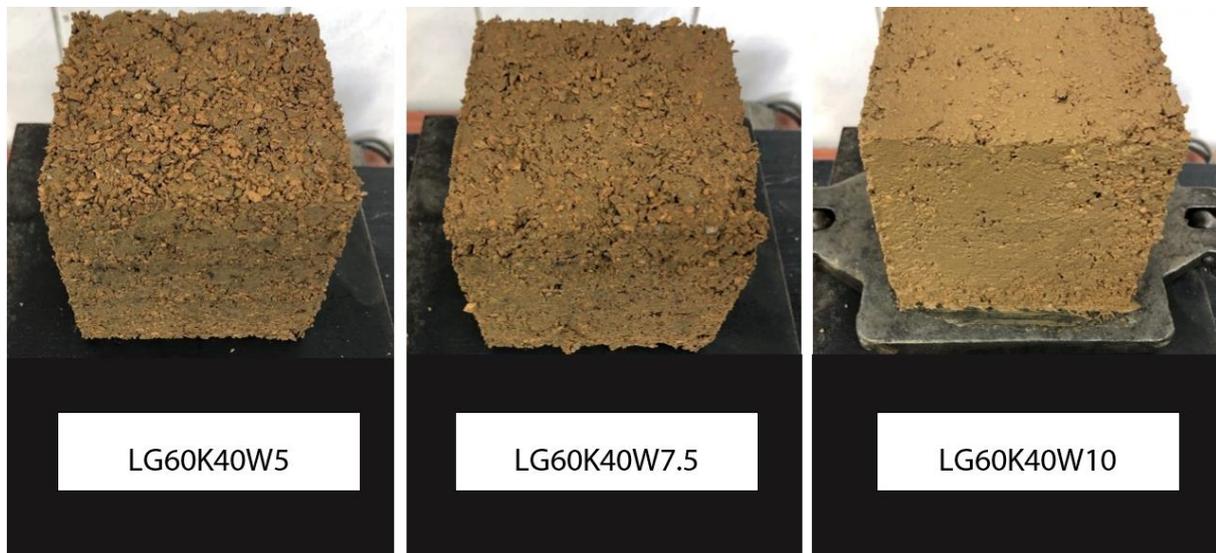


Foto: Schlegel 2021

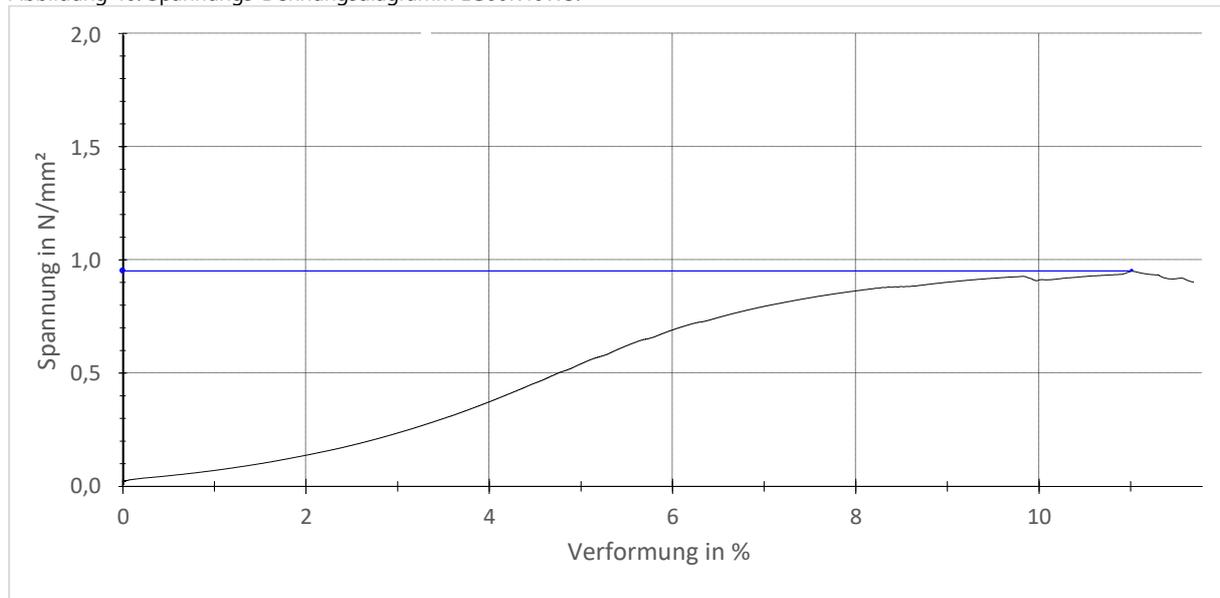
Nach der beschriebenen Trocknungsdauer von 14 Tagen wurden die Probekörper hinsichtlich ihrer Druckfestigkeit geprüft. Die Prüfungen fanden mit einer Universalprüfmaschine Z 250 der Firma Zwick/Roell ebenfalls unter einer Vorkraft von 250 N und einer Prüfgeschwindigkeit von 400 N/s statt. Die Prüfung ergab eine maximale Druckfestigkeit von  $1,51 \text{ N/mm}^2$  für das Gemisch LG60K40W7.5S. Das Gemisch mit 5 % Wasserzugabe schnitt mit  $0,95 \text{ N/mm}^2$  deutlich schlechter ab. Die Mischung LG60K40W7.5 liegt mit  $1,24 \text{ N/mm}^2$  und LG60K40W10 mit  $1,40 \text{ N/mm}^2$  sehr dicht an dem beschriebenen Höchstwert. Der bewehrte Probekörper zeigte in dieser Versuchsreihe eine deutliche Steigerung der Druckfestigkeit. Seine Steigerung der Höchstkraft beim Bruch lag etwa 2.764 N (vgl. Tabelle 13) über dem der unbewehrten Mischung, was einer Steigerung von ca. 22 % entspricht. Daraus lässt sich auf eine mutmaßliche Verbesserung der lasttragenden Eigenschaft durch das Flachsgewebe schließen.

Tabelle 13: Ergebnisse Druckfestigkeitsprüfung Untersuchungsreihe 1 - 40 % Korkanteil.

Gemisch	Prüffläche [mm]	Prüfdatum	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Höchstkraft bei Bruch [N]	Graph
LG60K40W5	100,2 x 100,3	25.11.2021	0,95	9.545,3	Abbildung 40
LG60K40W7.5	100 x 100	25.11.2021	1,24	12.373,0	Abbildung 41
LG60K40W7.5S	100,6 x 99,4	25.11.2021	1,51	15.137,3	Abbildung 41
LG60K40W10	99,3 x 100	25.11.2021	1,40	13.902,0	Abbildung 42

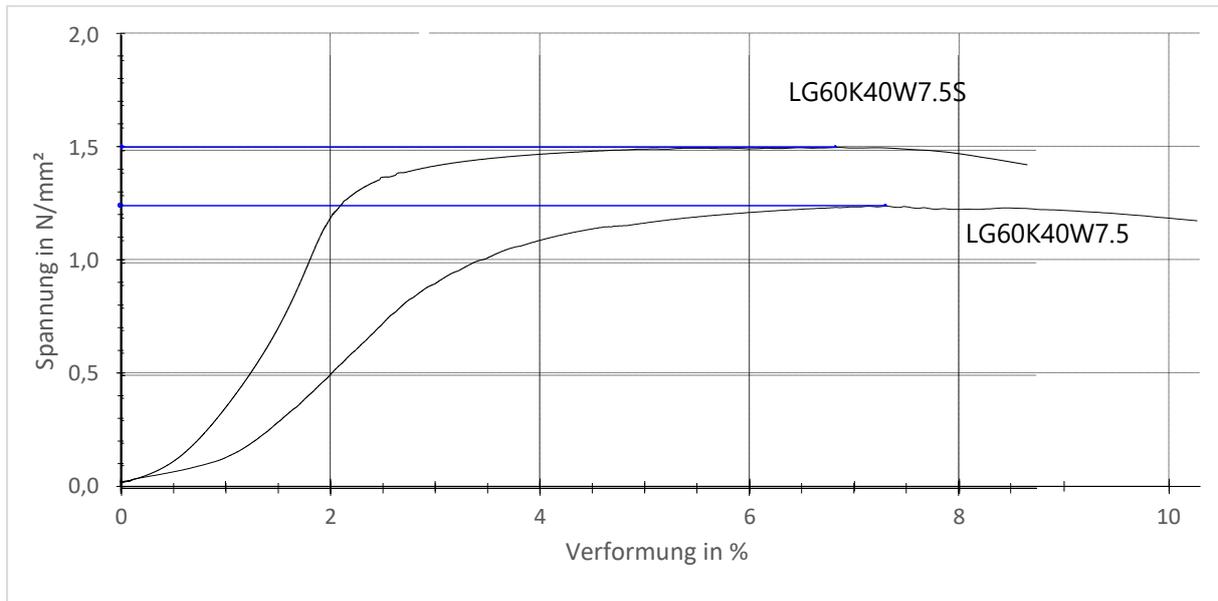
Quelle: eigene Anfertigung 2022

Abbildung 40: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG60K40W5.



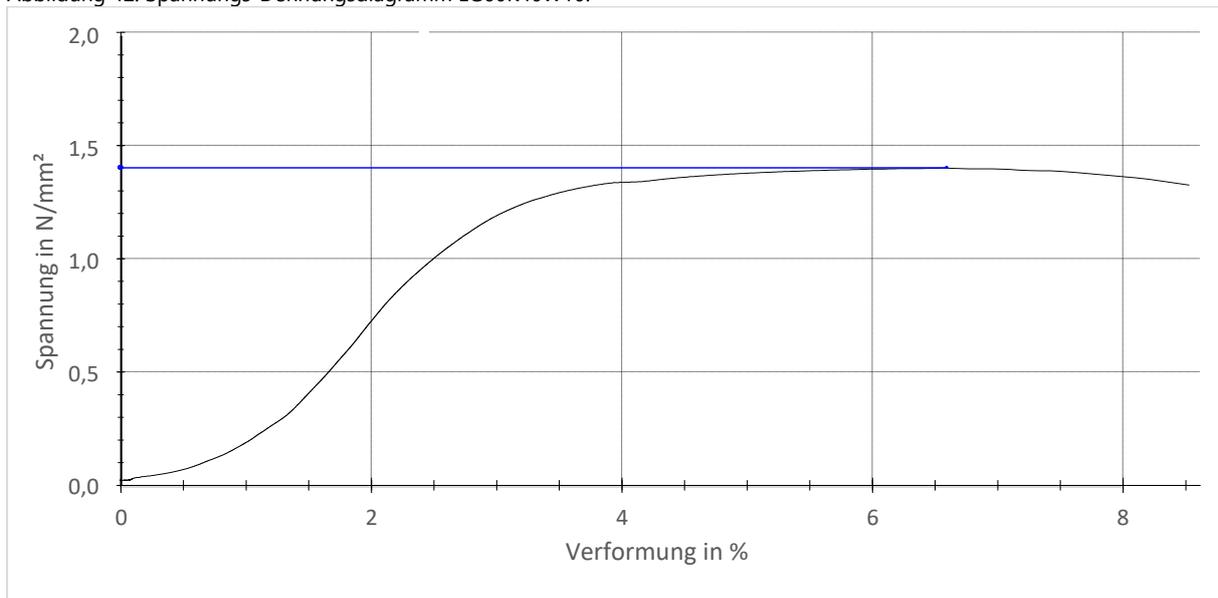
Quelle: Prüfprotokoll vom 25.11.

Abbildung 41: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG60K40W7.5 und LG60K40W7.5S.



Quelle: Prüfprotokoll vom 25.11.

Abbildung 42: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG60K40W10.



Quelle: Prüfprotokoll vom 25.11.

Die Versuchsreihe zeigt, dass ein Lehm-Kork-Gemisch mit 40 % Korkanteil für lasttragende Bauteile nicht mehr in Frage kommen kann. Die untersuchte Rezeptur eignet sich aufgrund ihrer Eigenschaften für nichttragende Elemente, wie beispielsweise eine Dämmung. Da bei 40 % Korkanteil die wärmedämmenden Eigenschaften jedoch begrenzt sind, soll diese Mischung zunächst nicht weiter betrachtet werden.

### Untersuchungsreihe 1 – 50 % Korkanteil

Auch für dieses Lehm-Kork-Gemisch mit 50 % Korkanteil (Volumenprozent) wurden zunächst drei Mischungen angerührt, welche sich allein durch die Wasserzugabe unterscheiden (vgl. Tabelle 14). In eine weitere, vierte Mischung mit 12 % Wasserzugabe wurde ein Flachs-Gewebe der Firma Bcomp eingelegt, welches die physikalischen Eigenschaften der Mischung verbessern soll. Das Flachs-gewebe wurde mittig in den Probewürfel eingestampft (vgl. Kapitel „Anforderungen Bewehrung“ ab Seite 66). Durch die sehr begrenzte Größe der Probekörper (10 cm x 10 cm x 10 cm) und einer Maschenweite von 2,8 cm ist bei dieser Versuchsdurchführung nur mit einer geringen Steigerung der Druckfestigkeit zu rechnen.

Tabelle 14: Übersicht Probekörper 100 mm.

Gemisch	Probekörper [mm]	Trocknungszeit	Mischung	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
LG50K50W7.5	100 x 100 x 100	14 Tage	leicht inhomogen	1.253
LG50K50W12	100 x 100 x 100	14 Tage	homogen	1.271
LG50K50W12S	100 x 100 x 100	14 Tage	homogen	1.301
LG50K50W12.5	100 x 100 x 100	14 Tage	homogen leichtes Weichen	1.223

Quelle: eigene Anfertigung 2022

Auch in dieser Untersuchungsreihe führte eine geringe Wasserzugabe (7,5 %) zu einem inhomogenen Gemisch (LG50K50W7.5). Aus einer zu großen Wasserzugabe (12.5 %) resultierte auch in dieser Versuchsreihe ein homogenes Gemisch, welches beim Verdichten jedoch unter dem Stampfer wich. Bei zu viel Wasserzugabe blieben außerdem Rückstände der Mischung am Verdichtungswerkzeug haften (vgl.

Abbildung 43). Insgesamt ließ sich durch diese Versuchsreihe bestätigen, dass der zunehmende Korkanteil einen starken Einfluss auf die Gesamtkonsistenz der Stampflehmischung hat. Während bei einem Korkanteil von 30 % eine Wasserzugabe von 7,5 % zu einer zu wässrigen Mischung führte, verließ die Zugabe von 12 % Wasser der LG50K50W12-Mischung eine optimale Verarbeitungskonsistenz.

Abbildung 43: Verdichtungswerkzeug mit Stampflehm-Anhaftungen.



Foto: Schlegel 2021

Auf die Rohdichte hatte der spezifische Wassergehalt erneut einen vernachlässigbaren Einfluss.

Abbildung 44 zeigt die hergestellten Probekörper kurz nach der Fertigstellung. Anhand der Oberflächenbeschaffenheiten der Würfel, lassen sich erneut Rückschlüsse auf die beschriebene Homogenität ziehen. Während Probekörper LG50K50W7.5 bröselig und instabil wirkt, sieht die Oberfläche von Körper LG50K50W10 homogen und gleichmäßig aus. Körper LG50K50W12.5 wirkt in seiner äußeren Erscheinung etwas feucht und matschig – jedoch homogen.

Abbildung 44: Probekörper mit 50 % Korkgehalt.

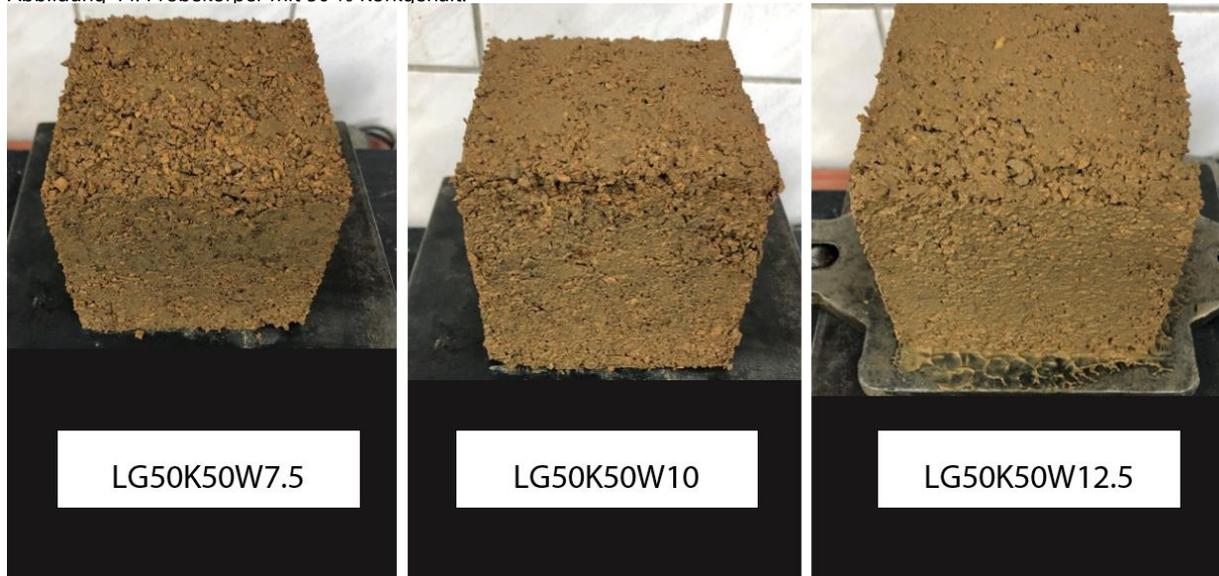


Foto: Schlegel 2021

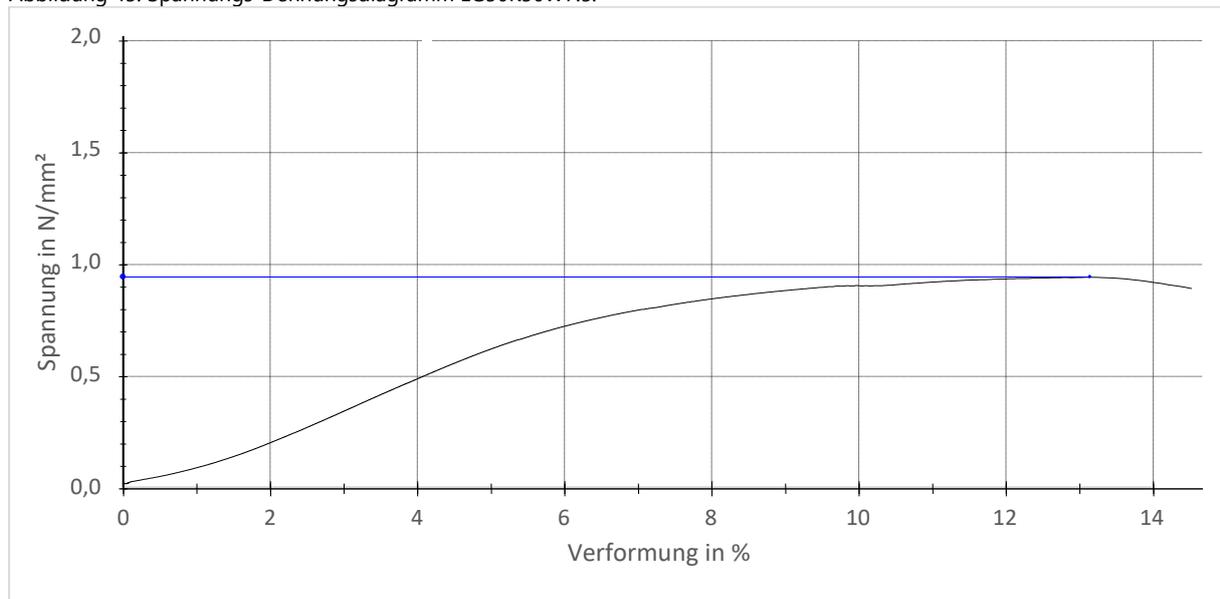
Nach der beschriebenen Trocknungsdauer von 14 Tagen wurden die Probekörper hinsichtlich ihrer Druckfestigkeit geprüft. Die Prüfungen fanden erneut mit einer Universalprüfmaschine Z 250 der Firma Zwick/Roell unter einer Vorkraft von 250 N und einer Prüfgeschwindigkeit von 400 N/s statt. Die Prüfung ergab eine maximale Druckfestigkeit von 1,13 N/mm<sup>2</sup> für das Gemisch LG50K50W10S. Das Gemisch mit 7,5 % Wasserzugabe hatte mit nur 0,94 N/mm<sup>2</sup> eine deutlich schlechtere Druckfestigkeit. Die Mischung LG50K50W12.5 liegt mit 1,08 N/mm<sup>2</sup>, genauso weit von der stabilisierten Mischung entfernt wie LG50K50W10. Der bewehrte Probekörper zeigte in dieser Versuchsreihe erneut eine leichte Steigerung der Druckfestigkeit (ca. 4 %). Durch das Hochleistungs-Flachsgewebe konnte eine Steigerung der Höchstkraft beim Bruch um etwa 843 N (vgl. Tabelle 15) erzielt werden. Daraus lässt sich auf eine mutmaßliche Verbesserung der lasttragenden Eigenschaft durch das Flachsgewebe schließen.

Tabelle 15: Ergebnisse Druckfestigkeitsprüfung Untersuchungsreihe 1 - 50 % Korkanteil.

Gemisch	Prüffläche [mm]	Prüfdatum	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Höchstkraft bei Bruch [N]	Graph
LG50K50W7.5	100 x 99,4	25.11.2021	0,94	9.390,8	Abbildung 45
LG50K50W10	100 x 99,1	25.11.2021	1,13	11.208,2	Abbildung 46
LG50K50W10S	101,5 x 101	25.11.2021	1,18	12.051,0	Abbildung 46
LG50K50W12.5	98,8 x 98,8	25.11.2021	1,08	10.569,0	Abbildung 47

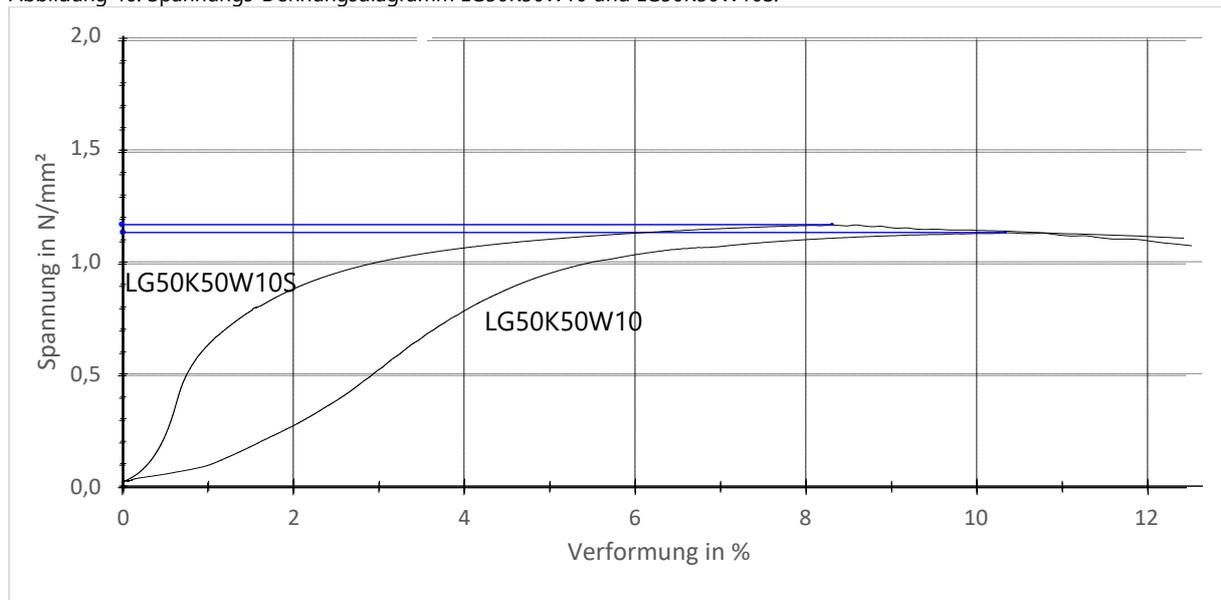
Quelle: eigene Anfertigung 2022

Abbildung 45: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG50K50W7.5.



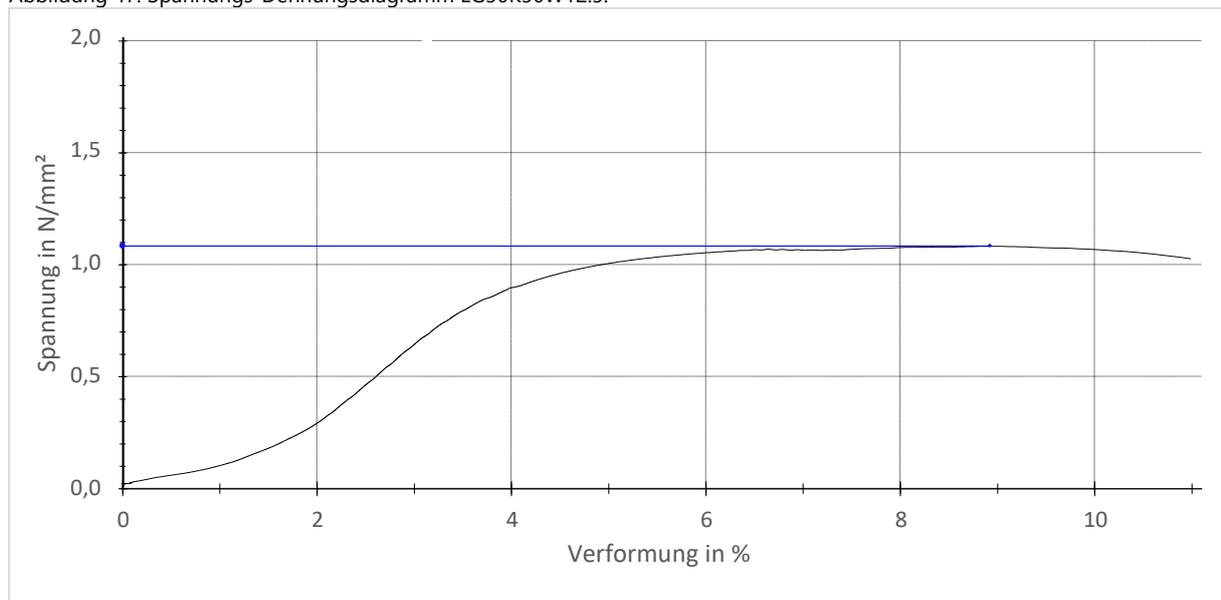
Quelle: Prüfprotokoll vom 25.11.

Abbildung 46: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG50K50W10 und LG50K50W10S.



Quelle: Prüfprotokoll vom 25.11.

Abbildung 47: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG50K50W12.5.



Quelle: Prüfprotokoll vom 25.11.

Die Versuchsreihe zeigt, dass ein Lehm-Kork-Gemisch mit 50 % Korkanteil nicht für tragende Bauteile verwendet werden kann. Die untersuchte Rezeptur eignet sich aufgrund ihrer Eigenschaften jedoch für nichttragende Elemente, wie beispielsweise eine Dämmung. Da bei 50 % Korkanteil die wärmedämmenden Eigenschaften jedoch begrenzt sind, soll diese Mischung zunächst nicht weiter betrachtet werden.

### Untersuchungsreihe 1 – 60 % Korkanteil

Auch für dieses Lehm-Kork-Gemisch mit 60 % Korkanteil (Volumenprozent) wurden zunächst drei Mischungen angerührt, welche sich allein durch die Wasserzugabe unterscheiden (vgl. Tabelle 16). In eine weitere, vierte Mischung mit 12,5 % Wasserzugabe wurde ein Flachs-Gewebe der Firma Bcomp eingelegt, welches die physikalischen Eigenschaften der Mischung verbessern soll. Das Flachs-gewebe wurde mittig in den Probewürfel eingestampft (vgl. Kapitel „Anforderungen Bewehrung“ ab Seite 66). Durch die sehr begrenzte Größe der Probekörper (10 cm x 10 cm x 10 cm) und einer Maschenweite von 2,8 cm ist bei dieser Versuchsdurchführung ebenfalls nur mit einer geringen Steigerung der Druckfestigkeit zu rechnen.

Tabelle 16: Übersicht Probekörper 100 mm.

Gemisch	Probekörper [mm]	Trocknungszeit	Mischung	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
LG40K60W10	100 x 100 x 100	14 Tage	inhomogen	1.074
LG40K60W12.5	100 x 100 x 100	14 Tage	homogen	1.028
LG40K60W12.5S	100 x 100 x 100	14 Tage	homogen	1.119
LG40K60W15	100 x 100 x 100	14 Tage	homogen starkes Weichen	1.038

Quelle: eigene Anfertigung 2022

Auch in dieser Untersuchungsreihe führte eine geringe Wasserzugabe (10 %) zu einem inhomogenen Gemisch (LG40K60W10), welches gerade in den letzten Schichten nur schwer zu verdichten war. Aus einer zu großen Wasserzugabe (15 %) resultierte auch in dieser Versuchsreihe ein homogenes Gemisch, welches beim Verdichten jedoch stark unter dem Stampfer wich. Bei zu viel Wasserzugabe blieben erneut Rückstände der Mischung am Verdichtungswerkzeug haften. Insgesamt ließ sich durch diese Versuchsreihe erneut bestätigen, dass der zunehmende Korkanteil einen starken Einfluss auf die Gesamtkonsistenz der Stampflehmischung hat. Während bei einem Korkanteil von 30 % eine Wasserzugabe von 7,5 % zu einer zu wässrigen Mischung führte, verlieh die Zugabe von 12,5 % Wasser der LG40K60W12.5-Mischung eine optimale Verarbeitungskonsistenz. Gleichzeitig lässt der Versuch eine Sättigungsgrenze bei etwa 13 % Wasserzugabe vermuten.

Auf die Rohdichte hatte der spezifische Wassergehalt erneut einen vernachlässigbaren Einfluss.

Abbildung 48 zeigt die hergestellten Probekörper kurz nach der Fertigstellung. Anhand der Oberflächenbeschaffenheiten der Würfel, lassen sich erneut Rückschlüsse auf die beschriebene Homogenität ziehen. Während Probekörper LG40K60W10 bröselig und instabil wirkt, sieht die Oberfläche von Körper LG40K60W12.5 bereits deutlich homogener und gleichmäßiger aus. Körper LG40K60W15 wirkt in seiner äußeren Erscheinung nur minimal feucht und ist darüber hinaus als homogen einzustufen.

Abbildung 48: Probekörper mit 60 % Korkgehalt.

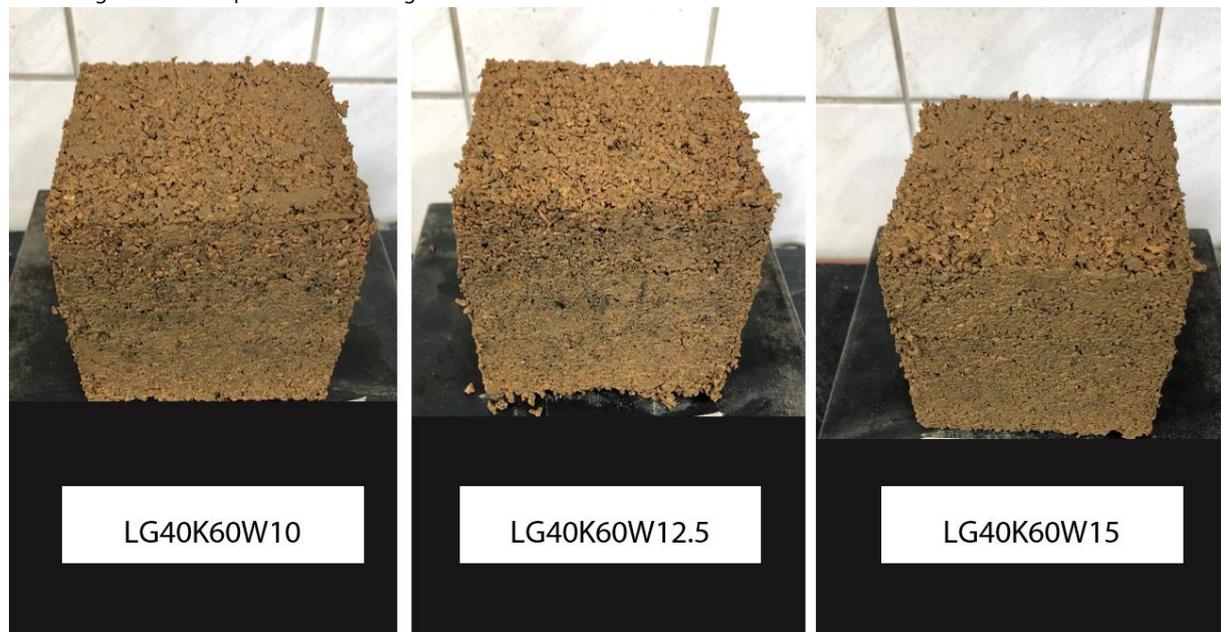


Foto: Schlegel 2021

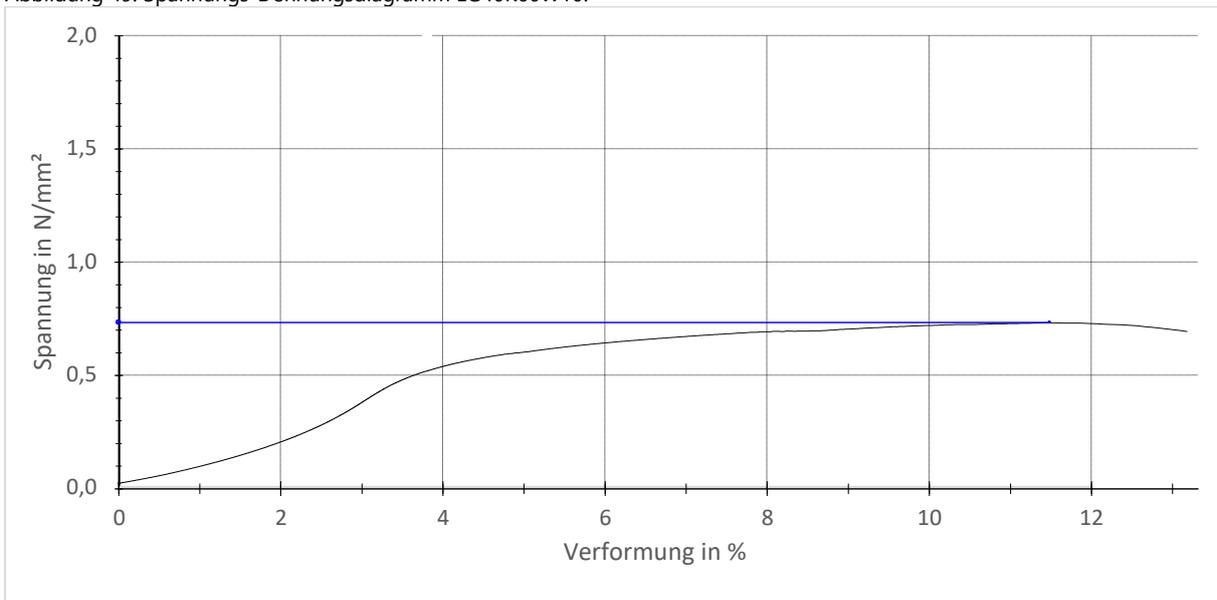
Nach der beschriebenen Trocknungsdauer von 14 Tagen wurden die Probekörper hinsichtlich ihrer Druckfestigkeit geprüft. Die Prüfungen fanden mit einer Universalprüfmaschine Z 250 der Firma Zwick/Roell unter einer Vorkraft von 250 N und einer Prüfgeschwindigkeit von 400 N/s statt. Die Prüfung ergab eine maximale Druckfestigkeit von knapp 1 N/mm<sup>2</sup> für das Gemisch LG40K60W12.5S. Das Gemisch mit 10 % Wasserzugabe hatte mit nur 0,73 N/mm<sup>2</sup> eine deutlich schlechtere Druckfestigkeit. Die Mischung LG40K60W15 liegt mit 0,70 N/mm<sup>2</sup>, fast genauso weit von der stabilisierten Mischung entfernt wie LG40K60W12.5. Der bewehrte Probekörper zeigte in dieser Versuchsreihe eine signifikante Steigerung der Druckfestigkeit um ca. 60 %. So konnte durch das Hochleistungs-Flachsgewebe eine Steigerung der Höchstkraft beim Bruch um etwa 3.835 N (vgl. Tabelle 17) erzielt werden. Daraus lässt sich auf eine mutmaßliche Verbesserung der lasttragenden Eigenschaft durch das Flachsgewebe schließen.

Tabelle 17: Ergebnisse Druckfestigkeitsprüfung Untersuchungsreihe 1 - 60 % Korkanteil.

Gemisch	Prüffläche [mm]	Prüfdatum	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Höchstkraft bei Bruch [N]	Graph
LG40K60W10	101 x 100,7	25.11.2021	0,73	7.446,5	Abbildung 49
LG40K60W12.5	100,2 x 100,2	25.11.2021	0,61	6.079,2	Abbildung 50
LG40K60W12.5S	100,4 x 100,5	25.11.2021	0,98	9.914,3	Abbildung 50
LG40K60W15	100 x 99,6	25.11.2021	0,70	6.986,2	Abbildung 51

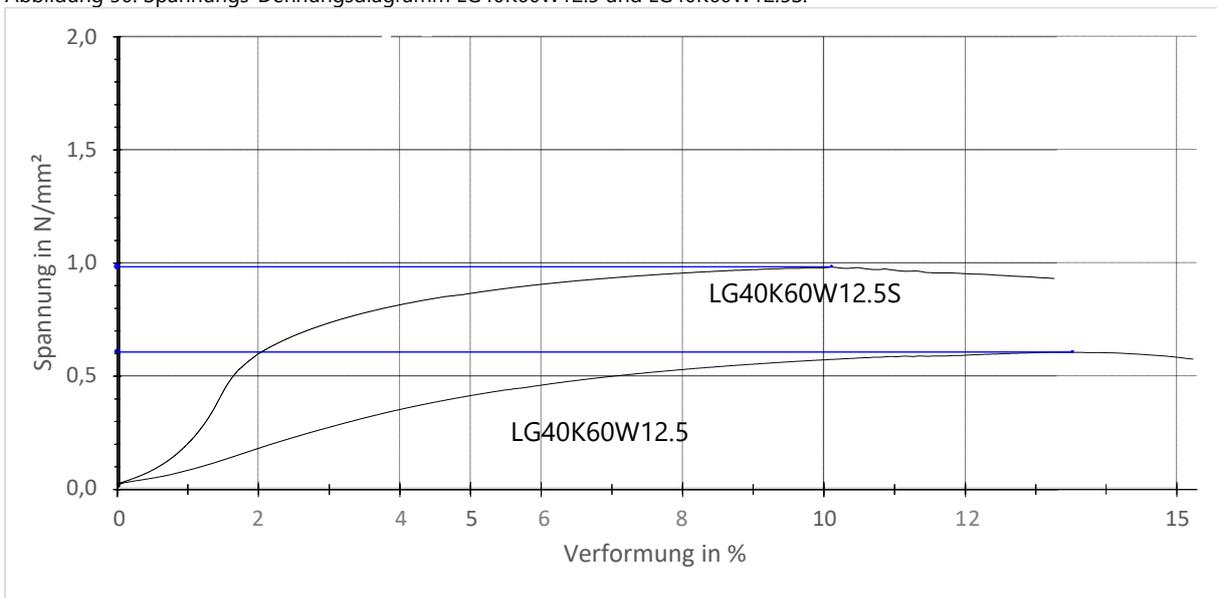
Quelle: eigene Anfertigung 2022

Abbildung 49: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG40K60W10.



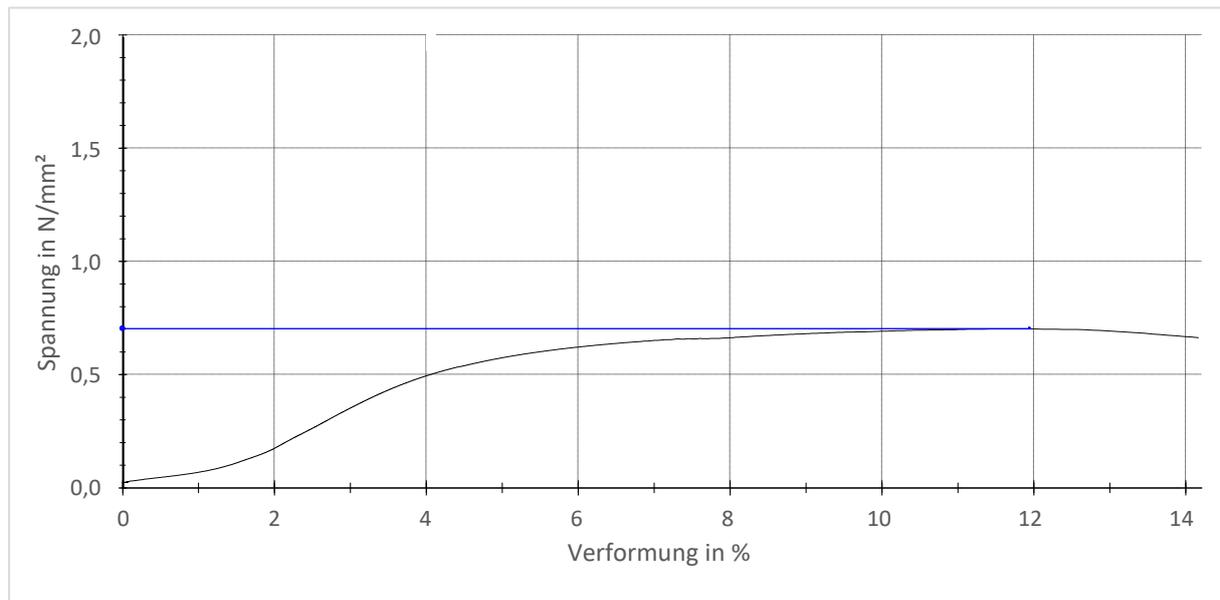
Quelle: Prüfprotokoll vom 25.11.

Abbildung 50: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG40K60W12.5 und LG40K60W12.5S.



Quelle: Prüfprotokoll vom 25.11.

Abbildung 51: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG40K60W15.



Quelle: Prüfprotokoll vom 25.11.

Die Versuchsreihe zeigt, dass ein Lehm-Kork-Gemisch mit 60 % Korkanteil zwar nicht für tragende Bauteile verwendet werden kann, jedoch stabil genug für eine Dämmung sein kann. Die untersuchte Rezeptur eignet sich aufgrund ihrer Eigenschaften optimal für eine Dämmung (vgl. Kapitel „Korkgranulat“ ab S. 35). Aus diesem Grund soll eine weitere Versuchsreihe zu dem in diesem Kapitel analysierten Lehm-Korkgemisch durchgeführt werden.

### **Untersuchungsreihe 1 – 70 % Korkanteil**

Um die Grenzen der Mischverhältnisse herauszufinden, wurde im letzten Schritt noch eine Mischung mit 70 % Korkanteil hergestellt. Die Mischung stellte sich jedoch als schwer handhabbar heraus, da die Lehmblättchen zwischen all dem Kork ihre Bindung nur schwer aufrechterhalten konnten.

Es musste nur eine Mischung mit 15 % Wassergehalt hergestellt werden, um eine Anwendung für die weitere Forschung auszuschließen (vgl. Tabelle 18). In den Probekörper wurde eine Stabilisierung eingebracht.

Tabelle 18: Übersicht Probekörper 100 mm.

Gemisch	Probekörper [mm]	Trocknungszeit	Mischung	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
LG30K70W15S	100 x 100 x 100	14 Tage	inhomogen	836

Quelle: eigene Anfertigung 2022

Wie die anderen Probekörper auch, wurde der Würfel nach 14 Tagen hinsichtlich seiner Druckfestigkeit geprüft. Das Zerstörungsbild in Abbildung 52 weist eindeutig auf eine zu geringe Bindekraft des verwendeten Lehmgemischs hin.

Abbildung 52: Druckfestigkeitsprüfung LG30K70W10.



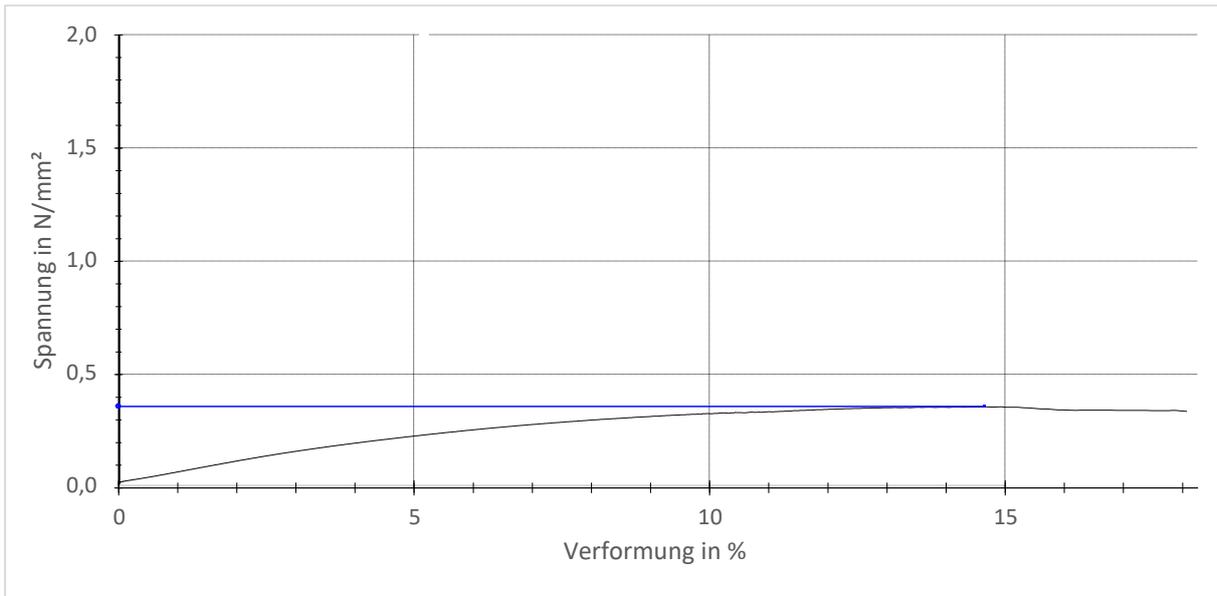
Foto: Schlegel 2021

Tabelle 19: Ergebnisse Druckfestigkeitsprüfung Untersuchungsreihe 1 - 70 % Korkanteil.

Gemisch	Prüffläche [mm]	Prüfdatum	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Höchstkraft bei Bruch [N]	Graph
LG30K70W15S	101,8 x 100,5	25.11.2021	0,36	3.659,7	Abbildung 53

Quelle: eigene Anfertigung 2022

Abbildung 53: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG30K70W15S.



Quelle: Prüfprotokoll vom 25.11.

Die Untersuchungen zeigen, dass sich ein Lehm-Kork-Gemisch mit 70 % Korkanteil nicht mehr für eine praktische Anwendung eignet.

**Zusammenfassung Untersuchungsreihe 1**

Die erste Untersuchungsreihe hat gezeigt, dass sich das Lehmgemisch LG70K30W5S, mit minimalem Optimierungsbedarf, als Grundlage für die Tragschicht eignet. Bei den Versuchen konnte eine maximale Druckfestigkeit von  $1,95 \text{ N/mm}^2$  erzielt werden. Um als Tragendes Bauteil in Frage zu kommen, muss die Druckfestigkeit demnach um mindestens  $0,50 \text{ N/mm}^2$  gesteigert werden, was einer Steigerung von knapp 3 % entspricht.

Für die Dämmschicht erwies sich die Mischung LG40K60W12.5S mit einer maximalen Druckfestigkeit von  $0,98 \text{ N/mm}^2$  als besonders geeignet. Auch bei diesem Gemisch gibt es einen Optimierungsbedarf. Ziel ist es für die Dämmschicht eine Druckfestigkeit von mindestens  $1 \text{ N/mm}^2$  zu erreichen.

Eine zweite Untersuchungsreihe soll die Ergebnisse validieren

## **Untersuchungsreihe 2**

Durch eine zweite Untersuchungsreihe sollen zwei Lehm-Kork-Mischungen, welche sich im Zuge der Untersuchungsreihe 1 (U1) als besonders geeignet herauskristallisierten, nach den Regeln der Lehmbau-Technik geprüft werden. Die Prüfung soll zeigen, ob die gewählten Rezepturen alle Anforderungen an die jeweilige Bauteilschicht erfüllen, oder ob eine weitergehende Optimierung notwendig ist.

Die Versuchsreihe wird anhand von jeweils drei Probekörpern mit einer Kantenlänge von 20 cm durchgeführt. Die Trocknungsdauer betrug 6 Wochen (20,7 °C Raumtemperatur und 65 % Luftfeuchtigkeit).

Durch den Versuchsaufbau mussten in dieser Untersuchungsreihe größere Mengen an Lehm-Korkgemisch angerührt werden. Deshalb wurde nun zum Anrühren – im Gegensatz zur U1 – ein Zwangsmischer verwendet. Durch die Verwendung des Zwangsmischers, wurde das Gemisch homogener und das beigefügte Wasser wurde gleichmäßiger verteilt. Daraus lässt sich ableiten, dass die angenommenen Wassergehälter bei der Verwendung eines Zwangsmischers leicht abgeschwächt werden können.

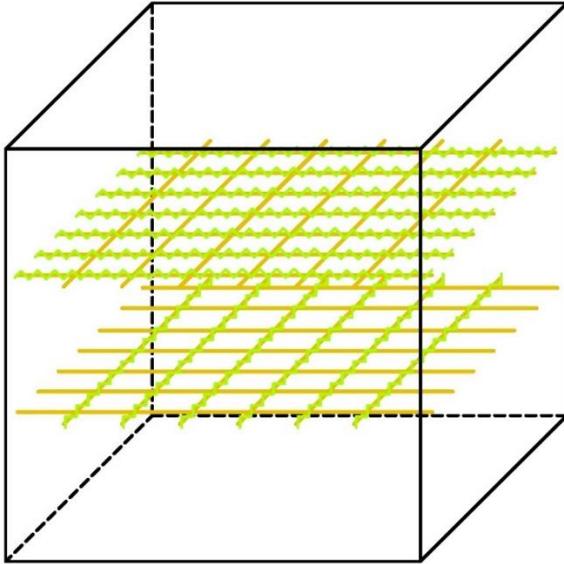
Nach der Trocknungszeit wurde die Rohdichte der Probekörper ermittelt und dokumentiert. Ein abschließender Druckfestigkeitsversuch soll Auskunft über die Eignung als lasttragendes/dämmendes Bauteil liefern.

### ***Untersuchungsreihe 2 – 30 % Korkanteil***

Anhand der Ergebnisse der ersten Untersuchungsreihe, wurde ein Kork-Lehm-Gemisch mit 30 % Korkanteil gewählt, welchem insgesamt noch fünf Prozent Wasser zugesetzt wurde. Außerdem stellte sich das Flachsgewebe der Firma Bcomp als geeignete Bewehrung zur Steigerung der Druckfestigkeit heraus.

In jeden Probekörper wurden insgesamt zwei Flachsgitter eingestampft. Da die Flachsgitter jeweils in eine Richtung zusätzlich verstärkt sind, wurde das Flachsgewebe einmal längs- und einmal quer zur verstärkten Richtung eingebracht (vgl. Abbildung 54). Dadurch sollen die Gitter besonders effizient arbeiten.

Abbildung 54: Flachsgewebe in Probewürfel (Einlege-Schema).



Quelle: eigene Anfertigung 2022

Um das Gewebe in den Probekörper einzustampfen, wurden zunächst ca. 7,5 cm lose Lehm-Kork-Mischung in die Schalung gefüllt. Auf die lose Mischung wurde dann das Gewebe gelegt und erneut 7,5 cm lose Lehm-Kork-Mischung auf das Gitter gefüllt (vgl. Abbildung 55). Erst im nächsten Schritt wurde das Gemisch durch Stampfen, auf etwa 10 cm, verdichtet. Durch diese Vorgehensweise kann sich der Stampflehm optimal um das Gitter verteilen.

Abbildung 55: Lage des Flachsgewebes im unverdichteten Probekörper.



Foto: Daube 2021

Nach der beschriebenen Trocknungsdauer von 6 Wochen konnte die Rohdichte der einzelnen Probekörper ermittelt werden. In Tabelle 20 sind die ermittelten Rohdichten, sowie ein repräsentativer Durchschnitt aufgelistet.

Tabelle 20: Übersicht Probekörper 200 mm.

Nr.	Gemisch	Probekörper [mm]	Trocknungszeit	Mischung	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
PK1	LG70K30W5S	200 x 200 x 200	6 Wochen	Homogen,	1.705
PK2	LG70K30W5S			gut verarbeitbar,	1.716
PK3	LG70K30W5S			kein Weichen,	1.701
Ø	<b>LG70K30W5S</b>			gute Bindekraft	<b>1.707</b>

Quelle: eigene Anfertigung 2022

Die Probekörper ließen sich mit der gewählten Rezeptur gut verarbeiten. Die Mischung war insgesamt homogen und entfaltete durch das zugefügte Wasser eine sehr gute Bindekraft.

Abbildung 56 zeigt einen hergestellten Probekörper nach etwa zweiwöchiger Trocknungszeit. Anhand der Oberflächenbeschaffenheiten der Würfel, lassen sich erneut Rückschlüsse auf die beschriebene Homogenität ziehen. Die Probekörper weisen eine homogene Oberflächenstruktur auf, welche bereits nach zwei Wochen beständig gegen Abrieb war.

Abbildung 56: Probekörper mit 30 % Korkgehalt.



Foto: Schlegel 2021

Nach einer Trocknungsdauer von 6 Wochen wurden auch diese Probekörper hinsichtlich ihrer Druckfestigkeit geprüft. Die Prüfungen fanden mit einer Universalprüfmaschine Z 250 der Firma Zwick/Roell unter einer Vorkraft von 250 N und einer Prüfungsgeschwindigkeit von 400 N/s statt (vgl. Tabelle 21, S. 92). Die Prüfung ergab erneut eine maximale Druckfestigkeit von knapp 1,9 N/mm<sup>2</sup>. Damit konnte keine Verbesserung zu den kleineren Probekörpern aus der U1 festgestellt werden. Die maximale Höchstkraft beim Bruch lag bei knapp 74.465 N.

Um als tragendes Bauteil in Frage zu kommen, muss die Druckfestigkeit um mindestens 0,1 N/mm<sup>2</sup> verbessert werden. Um das zu erreichen könnte der Korkanteil beispielsweise um 5 % reduziert werden oder dem Gemisch ein weiterer Stabilisator, beispielsweise Ton, beigesetzt werden.

Tabelle 21: Ergebnisse Druckfestigkeitsprüfung Untersuchungsreihe 2 - 30 % Korkanteil.

Nr.	Gemisch	Prüffläche [mm]	Prüfdatum	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Höchstkraft bei Bruch [N]	Graph
PK1	LG70K30W5S	197,9 x 198,8	18.01.2022	1,88	73.982,2	Abbildung 58
PK2	LG70K30W5S	198,8 x 197,7	18.01.2022	1,89	74.464,8	
PK3	LG70K30W5S	198,4 x 198,2	18.01.2022	1,89	74.336,8	
<b>Ø</b>	<b>LG70K30W5S</b>	-	-	<b>1,89</b>	<b>74.261,1</b>	

Quelle: eigene Anfertigung 2022

Die Ober- und Unterseite des Probekörpers war nach der Prüfung noch gut intakt. Die nicht belasteten Seiten des Probewürfels zeigten nach der Prüfung eine starke Rissbildung und lösten sich teilweise kegelförmig ab (vgl. Abbildung 57).

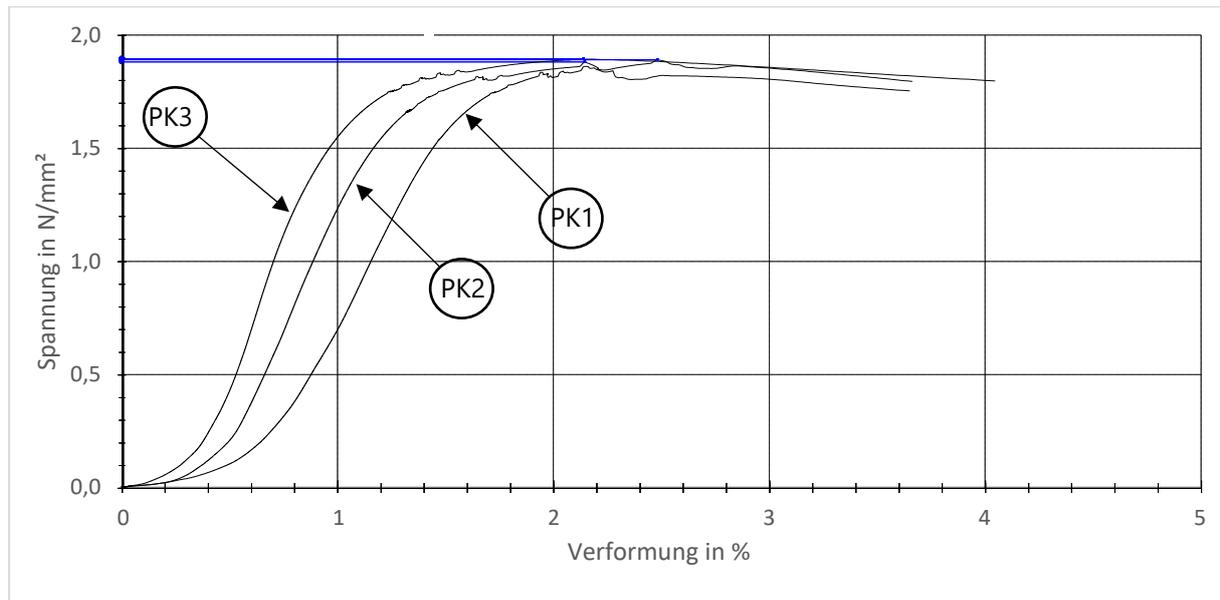
Abbildung 57: Prüfkörper vor- und nach Druckfestigkeitsprüfung.



Foto: Schlegel 2021

Die folgende Abbildung zeigt die Spannungs-Dehnungsdiagramme der Versuchsreihe (vgl. Abbildung 58).

Abbildung 58: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG70K30W5S.



Quelle: Prüfprotokoll vom 18.01

Die Versuche zeigen, dass ein Lehm-Kork-Gemisch mit 30 % Korkanteil für lasttragende Bauteile nur dann in Frage kommen kann, wenn eine weitere Stabilisation erreicht wird. Im nächsten Untersuchungsschritt soll daher ein Lehm-Kork-Gemisch mit 25 % Korkanteil, sowie ein zusätzlich stabilisiertes Gemisch bezüglich seiner Eignung untersucht werden.

### **Untersuchungsreihe 2 – 60 % Korkanteil**

Anhand der Ergebnisse der ersten Untersuchungsreihe, wurde für die Dämmschicht ein Kork-Lehm-Gemisch mit 60 % Korkanteil gewählt, welchem insgesamt noch 12,5 Prozent Wasser zugesetzt wurde. Außerdem stellte sich das Flachsgewebe der Firma Bcomp als geeignete Bewehrung zur Steigerung der Druckfestigkeit heraus.

In jeden Probekörper wurden, wie bereits bei den Probekörpern mit 30 % Korkgehalt, insgesamt zwei Flachsgitter eingestampft. Da die Flachsgitter jeweils in eine Richtung zusätzlich verstärkt sind, wurde das Flachsgewebe einmal längs- und einmal quer zur verstärkten Richtung eingebracht (vgl. Abbildung 54, S. 90). Dadurch sollen die Gitter besonders effizient arbeiten.

Um das Gewebe in den Probekörper einzustampfen, wurden erneut ca. 7,5 cm lose Lehm-Kork-Mischung in die Schalung gefüllt. Auf die lose Mischung wurde dann das Gewebe gelegt und erneut 7,5 cm lose Lehm-Kork-Mischung auf das Gitter gefüllt (vgl. Abbildung 55, S. 90). Erst im nächsten Schritt wurde das Gemisch durch Stampfen, auf etwa 10 cm, verdichtet. Durch diese Vorgehensweise kann sich der Stampflehm optimal um das Gitter verteilen.

Nach der beschriebenen Trocknungsdauer von 6 Wochen konnte die Rohdichte der einzelnen Probekörper ermittelt werden. In Tabelle 22 sind die einzelnen Rohdichten, sowie ein repräsentativer Durchschnitt aufgelistet. Der Durchschnittswert darf dabei nicht um mehr als 10 % von den Einzelwerten abweichen.

Tabelle 22: Übersicht Probekörper 200 mm.

Nr.	Gemisch	Probekörper [mm]	Trocknungszeit	Mischung	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
PK1	LG40K60W12.5S	200 x 200 x 200	6 Wochen	Homogen,	1.043
PK2	LG40K60W12.5S			gut verarbeitbar,	1.109
PK3	LG40K60W12.5S			kein Weichen,	1.134
Ø	<b>LG40K60W12.5S</b>			mittel bis gute Bindekraft	<b>1.059</b>

Quelle: eigene Anfertigung 2022

Die Probekörper ließen sich mit der gewählten Rezeptur gut verarbeiten. Die Mischung war insgesamt homogen und entfaltete durch das zugefügte Wasser eine sehr gute Bindekraft. Gegen Ende des Stampfprozesses wirkte die Mischung jedoch zunehmend trockener und sehr mager. In künftigen Versuchen könnte der Mischung – v.a. für die Fertigung der letzten Schicht – nochmal etwas Wasser beigemischt werden.

Abbildung 59 zeigt einen hergestellten Probekörper nach etwa zweiwöchiger Trocknungszeit. Anhand der Oberflächenbeschaffenheiten der Würfel, lassen sich erneut Rückschlüsse auf die beschriebene Homogenität ziehen. Die Probekörper weisen eine homogene Oberflächenstruktur auf, welche bereits nach zwei Wochen recht beständig gegen Abrieb war.

Abbildung 59: Probekörper mit 60 % Korkgehalt.



Foto: Schlegel 2021

Nach einer Trocknungsdauer von 6 Wochen wurden auch diese Probekörper hinsichtlich ihrer Druckfestigkeit geprüft. Die Prüfungen fanden mit einer Universalprüfmaschine Z 250 der Firma Zwick/Roell unter einer Vorkraft von 250 N und einer Prüfgeschwindigkeit von 400 N/s statt (vgl. Tabelle 23, S. 95). Die Prüfung ergab eine maximale Druckfestigkeit von 0,97 N/mm<sup>2</sup>. Somit gab es keine Verbesserung im Vergleich zur U1, bei welcher eine maximale Druckfestigkeit von 0,98 N/mm<sup>2</sup> erzielt werden konnte. Die maximale Höchstkraft beim Bruch lag bei knapp 38.545 N.

Die Mischung kommt somit nach wie vor für die Dämmschicht in Frage, bedarf jedoch einer nachträglichen Optimierung. Ein Lastabtrag ist über diese Schicht nicht möglich – wurde durch die Forschung jedoch auch nicht vorgesehen.

Tabelle 23: Ergebnisse Druckfestigkeitsprüfung Untersuchungsreihe 2 - 60 % Korkanteil.

Nr.	Gemisch	Prüffläche [mm]	Prüfdatum	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Höchstkraft bei Bruch [N]	Graph
PK1	LG40K60W12.5S	199,1 198,4	x	18.01.2022	0,82	32.366,2
PK2	LG40K60W12.5S	198,1 199,3	x	18.01.2022	0,81	32.009,7
PK3	LG40K60W12.5S	199,2 199,0	x	18.01.2022	0,97	38.545,1
<b>Ø</b>	<b>LG40K60W12.5S</b>	-	-	<b>0,87</b>	<b>34.307,0</b>	

Quelle: eigene Anfertigung 2022

Die Ober- und Unterseite des Probekörpers war nach der Prüfung noch gut intakt. Die nicht belasteten Seiten des Probewürfels zeigten nach der Prüfung eine starke Rissbildung und lösten sich teilweise kegelförmig ab (vgl. Abbildung 60). Während der Druckfestigkeitsprüfung ließ sich der Probekörper stark zusammenstauchen. Das Gemisch lässt sich demnach als sehr flexibel und beweglich einstufen. Diese Eigenschaft könnte den Lehmtafeln bei dem Verbund von mehreren unterschiedlichen Schichten zugutekommen.

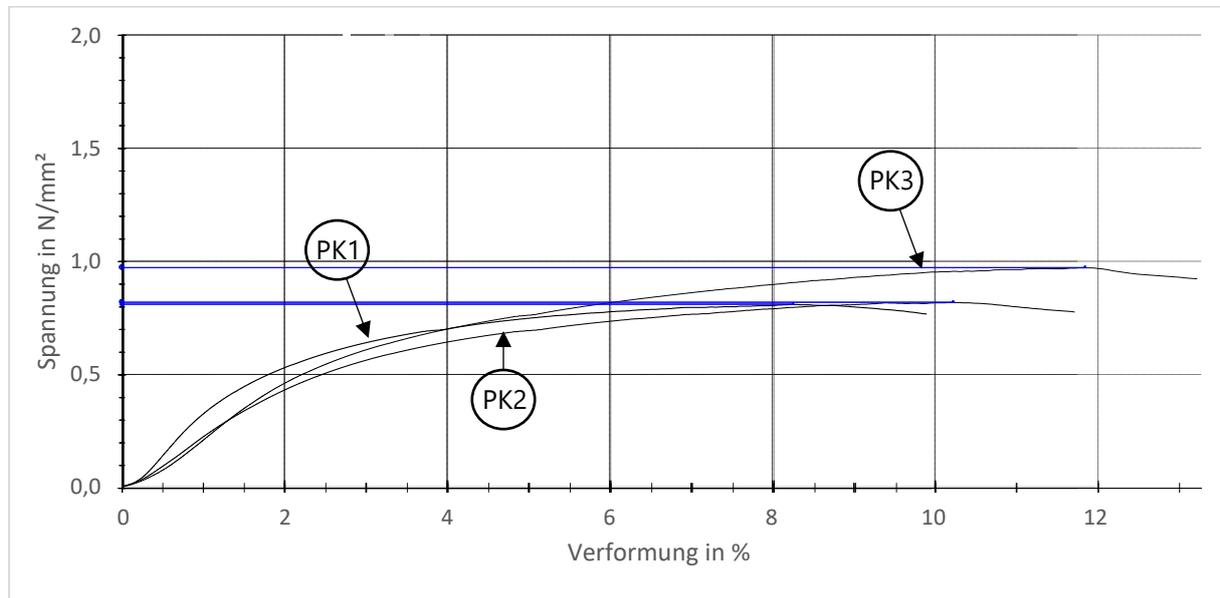
Abbildung 60: Prüfkörper bei Druckfestigkeitsprüfung.



Foto: Schlegel 2021

Die folgende Abbildung zeigt die Spannungs-Dehnungsdiagramme der beschriebenen Versuchsreihe (vgl. Abbildung 61).

Abbildung 61: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG40K60W12.5S.



Quelle: Prüfprotokoll vom 18.01

### **Zusammenfassung Untersuchungsreihe 2**

Die zweite Untersuchungsreihe bestätigt die Ergebnisse der ersten Untersuchungsreihe. Gleichzeitig wird aus U2 deutlich, dass sich auch kleinere Probekörper, mit einer Kantenlänge von 10 cm, gut für Druckfestigkeitsversuche eignen. Durch das Runterskalieren der Versuche kann wertvolle Zeit eingespart werden, da die kleineren Probekörper nur zwei statt sechs Wochen lang getrocknet werden müssen.

In der zweiten Untersuchungsreihe konnte für das Lehmgemisch LG70K30W5S eine mittlere Druckfestigkeit von 1,89 N/mm<sup>2</sup> gemessen werden. Für die Mischung LG40K60W12.5S konnte eine mittlere Druckfestigkeit von 0,87 N/mm<sup>2</sup> gemessen werden. Für beide Mischungen besteht nachträglicher Optimierungsbedarf.

Einerseits könnte der Korkgehalt arretiert werden, andererseits könnte Ton als Stabilisator die Druckfestigkeit erhöhen. Darüber hinaus kann im nächsten Schritt der Verbund zwischen zwei Schichten mit unterschiedlichem Korkgehalt, untersucht werden

### Untersuchungsreihe 3

Durch eine dritte Untersuchungsreihe sollen zwei weitere Lehm-Kork-Mischungen, angelehnt an die zuvor untersuchte Mischung LG70K30W5S, mit etwas verringertem Korkgehalt untersucht werden. Ziel der Untersuchung ist das Erreichen einer tragfähigen Druckfestigkeit von mindestens 2 N/mm<sup>2</sup>.

Die Versuchsreihe wird anhand von drei Probekörpern mit einer Kantenlänge von 10 cm durchgeführt. Die Trocknungsdauer betrug 2 Wochen (20,7 °C Raumtemperatur und 65 % Luftfeuchtigkeit).

Nach der Trocknungszeit wurde die Rohdichte der Probekörper ermittelt und dokumentiert. Ein abschließender Druckfestigkeitsversuch soll Auskunft über die Eignung als lasttragendes Bauteil liefern.

#### Untersuchungsreihe 3 – 25 % Korkanteil

Anhand der Ergebnisse der ersten und zweiten Untersuchungsreihe, wurde ein Kork-Lehm-Gemisch mit 25 % Korkanteil gewählt, welchem insgesamt noch vier Prozent Wasser zugesetzt wurde. Auf ein zusätzliches Geogitter wurde für diesen Versuch zunächst verzichtet.

Nach der beschriebenen Trocknungsdauer von 2 Wochen konnte die Rohdichte der einzelnen Probekörper ermittelt werden. In Tabelle 22 sind die einzelnen Rohdichten, sowie ein repräsentativer Durchschnitt aufgelistet. Der Durchschnittswert darf dabei nicht um mehr als 10 % von den Einzelwerten abweichen.

Tabelle 24: Übersicht Probekörper 100 mm.

Nr.	Gemisch	Probekörper [mm]	Trocknungszeit	Mischung	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
PK1	LG75K25W4	100 x 100 x 100	2 Wochen	Homogen,	1.745
PK2	LG75K25W4			gut verarbeitbar,	1.727
PK3	LG75K25W4			kein Weichen,	1.728
Ø	<b>LG75K25W4</b>			gute Bindekraft	<b>1.733</b>

Quelle: eigene Anfertigung 2022

Die Probekörper ließen sich mit der gewählten Rezeptur gut verarbeiten. Die Mischung war insgesamt homogen und entfaltete durch das zugefügte Wasser eine sehr gute Bindekraft.

Abbildung 62 zeigt einen hergestellten Probekörper kurz nach dem Ausschalen. Anhand der Oberflächenbeschaffenheiten der Würfel, lassen sich erneut Rückschlüsse auf die beschriebene Homogenität ziehen. Die Probekörper weisen eine homogene Oberflächenstruktur auf.

Abbildung 62: Probekörper mit 25 % Korkanteil.



Foto: Daube 2022

Nach einer Trocknungsdauer von 2 Wochen wurden auch diese Probekörper hinsichtlich ihrer Druckfestigkeit geprüft. Die Prüfungen fanden mit einer Universalprüfmaschine Z 250 der Firma Zwick/Roell unter einer Vorkraft von 250 N und einer Prüfgeschwindigkeit von 400 N/s statt (vgl. Tabelle 25). Die Prüfung ergab eine maximale Druckfestigkeit von  $0,97 \text{ N/mm}^2$ . Somit gab es keine Verbesserung im Vergleich zur U1, bei welcher eine maximale Druckfestigkeit von  $0,98 \text{ N/mm}^2$  erzielt werden konnte. Die maximale Höchstkraft beim Bruch lag bei knapp 38.545 N.

Die Mischung kommt somit nach wie vor für die Dämmschicht in Frage, bedarf jedoch einer nachträglichen Optimierung. Ein Lastabtrag ist über diese Schicht nicht möglich – wurde durch die Forschung jedoch auch nicht vorgesehen.

Tabelle 25: Ergebnisse Druckfestigkeitsprüfung Untersuchungsreihe 3 - 25 % Korkanteil.

Nr.	Gemisch	Prüffläche [mm]	Prüfdatum	Druckfestigkeit [ $\text{N/mm}^2$ ]	Höchstkraft bei Bruch [N]	Graph
PK1	LG75K25W4	100 x 99,5	04.03.2022	2,07	20.629,6	Abbildung 64
PK2	LG75K25W4	100,3 x 100,2	04.03.2022	2,20	22.087,6	
PK3	LG75K25W4	101,2 x 100,7	04.03.2022	2,07	21.049,8	
<b>Ø</b>	<b>LG75K25W4</b>	-	-	<b>2,11</b>	<b>21.255,7</b>	

Quelle: eigene Anfertigung 2022

Die Ober- und Unterseite des Probekörpers war nach der Prüfung noch gut intakt. Die nicht belasteten Seiten des Probewürfels zeigten nach der Prüfung eine starke Rissbildung und lösten sich leicht kegelförmig ab (vgl. Abbildung 63).

Abbildung 63: Probekörper bei Druckfestigkeitsprüfung

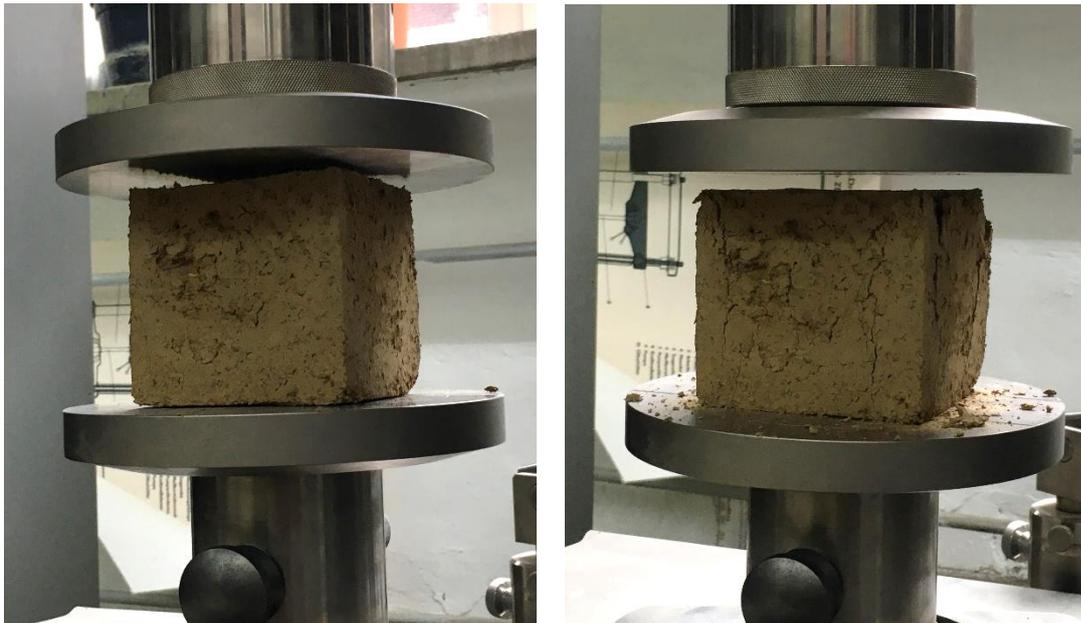
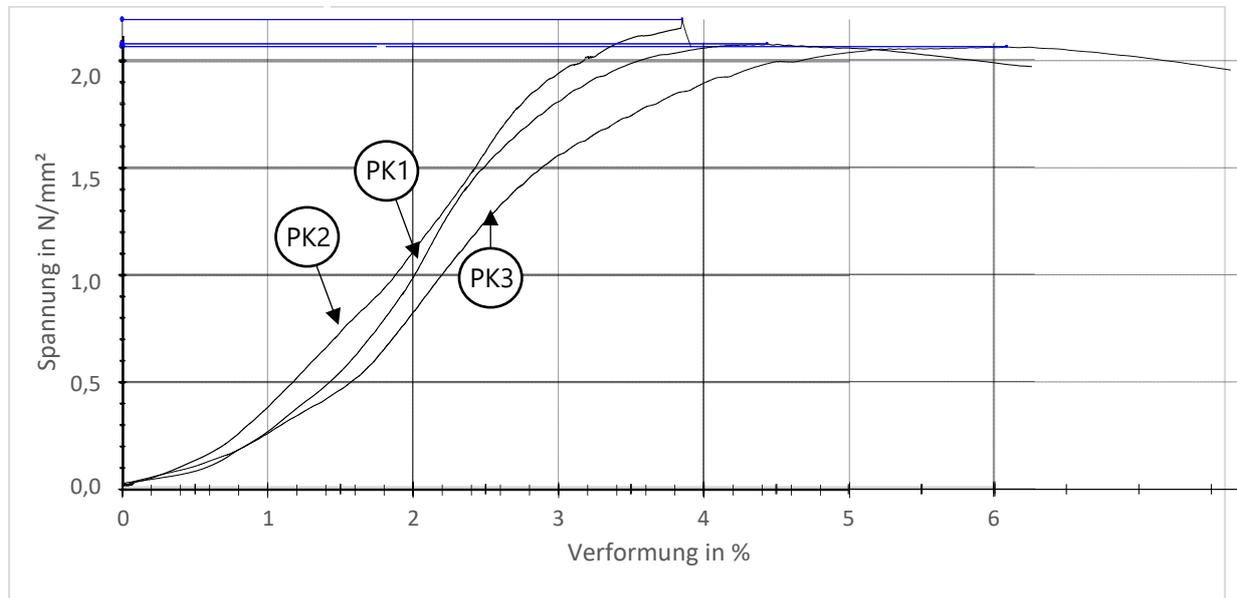


Foto: Plattner 2022

Die folgende Abbildung 64 zeigt die Spannungs-Dehnungsdiagramme der beschriebenen Versuchsreihe.

Abbildung 64: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG75K25W4.



Quelle: Prüfprotokoll vom 04.03.

### **Zusammenfassung Untersuchungsreihe 3**

Die dritte Untersuchungsreihe bestätigt die Annahme der zweiten Untersuchungsreihe, dass aus einem minimal geringeren Korkanteil (25 % statt 30 %) wesentlich bessere Druckfestigkeiten resultieren. Die untersuchte Mischung LG75K25W4 erfüllt mit 2,11 N/mm<sup>2</sup> durchschnittlicher Druckfestigkeit, bereits ohne Geogitter die Anforderungen an die Mindestdruckfestigkeit von tragenden Bauteilen

## Untersuchungsreihe 4

Durch eine vierte Untersuchungsreihe soll die Möglichkeit der zusätzlichen Stabilisierung durch Beimengen von Tonmehl überprüft werden. Dafür wurde ein weiterer Probekörper, mit dem ursprünglichen Korkgehalt von 30 %, mit 60 g Tonmehl (ca. 3 %) angemischt (LG70K30W5T3).

Ziel der Untersuchung ist das Erreichen einer tragfähigen Druckfestigkeit von mindestens 2 N/mm<sup>2</sup>.

Die Versuchsreihe wird anhand von einem Probekörper mit einer Kantenlänge von 10 cm durchgeführt. Die Trocknungsdauer betrug 2 Wochen (20,7 °C Raumtemperatur und 65 % Luftfeuchtigkeit).

Nach der Trocknungszeit wurde die Rohdichte des Probekörpers ermittelt und dokumentiert. Ein abschließender Druckfestigkeitsversuch soll Auskunft über die Eignung als lasttragendes Bauteil liefern.

### Untersuchungsreihe 4 – 30 % Korkanteil

Anhand der Ergebnisse der ersten und zweiten Untersuchungsreihe, wurde ein Kork-Lehm-Gemisch mit erneut 30 % Korkanteil gewählt, welchem insgesamt noch fünf Prozent Wasser und ca. drei Prozent Tonmehl zugesetzt wurden. Auf ein zusätzliches Geogitter wurde für diesen Versuch zunächst verzichtet.

Nach der beschriebenen Trocknungsdauer von 2 Wochen konnte die Rohdichte des Probekörpers ermittelt werden (Tabelle 26).

Tabelle 26: Probekörper LG70K30W5T3.

Nr.	Gemisch	Probekörper [mm]	Trocknungszeit	Mischung	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
PK1	LG70K30W5T3	100 x 100 x 100	2 Wochen	Homogen, gut verarbeitbar, kein Weichen, gute Bindekraft	1.715

Quelle: eigene Anfertigung 2022

Der Probekörper ließ sich mit der gewählten Rezeptur gut verarbeiten. Die Mischung war insgesamt homogen und entfaltete durch das zugefügte Wasser und den zusätzlichen Ton eine sehr gute Bindekraft.

Nach einer Trocknungsdauer von 2 Wochen wurde auch dieser Probekörper hinsichtlich seiner Druckfestigkeit geprüft. Die Prüfung fanden mit einer Universalprüfmaschine Z 250 der Firma Zwick/Roell unter einer Vorkraft von 250 N und einer Prüfgeschwindigkeit von 400 N/s statt (vgl. Tabelle 27). Die Prüfung ergab eine maximale Druckfestigkeit von 2,26 N/mm<sup>2</sup>. Somit gab es eine deutliche Verbesserung im Vergleich zur U1, bei welcher eine maximale Druckfestigkeit von 1,95 N/mm<sup>2</sup> erzielt werden konnte.

Die Mischung kommt somit für die Tragschicht in Frage und erfüllt die geforderte Mindestdruckfestigkeit deutlich.

Tabelle 27: Ergebnisse Druckfestigkeitsprüfung Untersuchungsreihe 4 - 30 % Korkanteil.

Nr.	Gemisch	Prüffläche [mm]	Prüfdatum	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Höchstkraft bei Bruch [N]	Graph
PK1	LG70K30W5T3	101,2 x 99,5	31.03.2022	2,26	22.715,1	Abbildung 64

Quelle: eigene Anfertigung 2022

Die Ober- und Unterseite des Probekörpers war nach der Prüfung noch gut intakt. Die nicht belasteten Seiten des Probewürfels zeigten nach der Prüfung eine starke Rissbildung und lösten sich leicht kegelförmig ab (vgl. Abbildung 65).

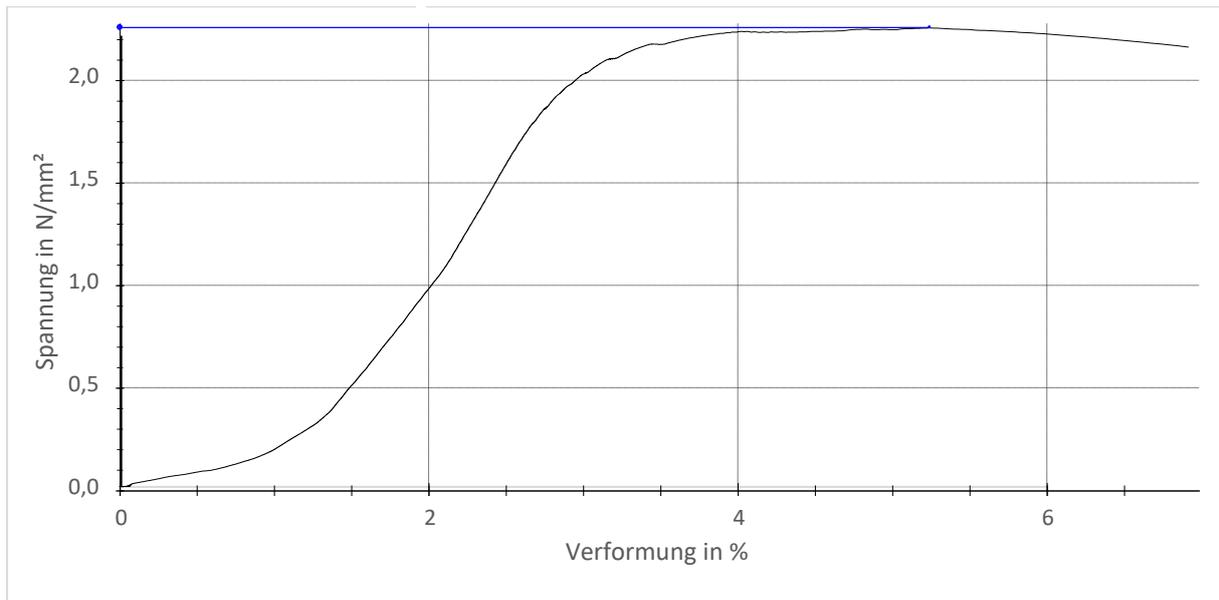
Abbildung 65: Probekörper nach Druckfestigkeitsprüfung.



Foto: Daube 2022

Die folgende Abbildung 66 zeigt das Spannungs-Dehnungsdiagramm des beschriebenen Probekörpers.

Abbildung 66: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG70K30W5T3.



Quelle: Prüfprotokoll vom 31.03.

#### **Zusammenfassung Untersuchungsreihe 4**

Die vierte Untersuchungsreihe bestätigt die Annahme der zweiten Untersuchungsreihe, dass das Beimengen von Tonmehl (3 %) zu wesentlich besseren Druckfestigkeiten führen kann. Die untersuchte Mischung LG70K30W5T3 erfüllt mit einer Druckfestigkeit von 2,26 N/mm<sup>2</sup>, bereits ohne Geogitter, die Anforderungen an die Mindestdruckfestigkeit von tragenden Bauteilen. Das Beimengen von zusätzlichem Tonmehl soll im weiteren Verlauf der Forschung, zugunsten eines höheren Kork-Anteils, beibehalten werden

## Untersuchungsreihe 5

Durch eine vierte Untersuchungsreihe soll der Verbund von Trag- und Dämmschicht untersucht werden. Die Konstruktion der Lehmtafelbauweise sieht vor, dass ausschließlich die Tragschicht Lasten aufnehmen soll. Die Dämmschicht ist zwar fest mit der Tragschicht verbunden, soll jedoch ausschließlich selbsttragend sein. In dieser Untersuchungsreihe sollen dieser Verbund und das Verhalten der Schichten unter Druckbelastung überprüft werden. Darüber hinaus soll untersucht werden, wie sich die beiden Mischungen (LG75K25W3.5 und LG40K60W10) beim gemeinsamen Verdichten verhalten.

Der Versuch wird anhand von einem Probekörper mit den Abmessungen 200 mm x 100 mm x 100 mm durchgeführt. Die Trocknungsdauer betrug knapp 4 Wochen (20,7 °C Raumtemperatur und 65 % Luftfeuchtigkeit).

Nach der Trocknungszeit wurde die Rohdichte des Probekörpers ermittelt und dokumentiert. Ein abschließender Druckfestigkeitsversuch soll Auskunft über die Verbundwirkung geben.

### **Untersuchungsreihe 5 – Verbundwerkstoff**

Anhand der Ergebnisse der vorausgegangenen Untersuchungsreihen, wurden zwei Kork-Lehm-Gemische mit 25 % bzw. 60 % Korkanteil gewählt, welchem im Verbund gestampft werden. In das Bauteil wurden zwei Flachgitter (unteres und oberes Drittel der Höhe) eingelegt (vgl. Abbildung 67) Die Lehmdeckung betrug somit jeweils ca. 20 mm.

Abbildung 67: Verbundprobekörper mit eingelegtem Flachgitter



Foto: Daube 2022

Für die Herstellung wurde in die Schalung zentral eine vertikale Trennschicht eingelegt, welche beim Einfüllen die beiden Lehmmischungen voneinander trennte. Erst nach dem Einfüllen beider Mischungen wurde die Trennschicht gezogen und das Geogitter auf den losen Lehm (über beide Schichten hinweg) gelegt. Im nächsten Schritt wurde erneut die Trennschicht (etwa bis zum Geogitter) eingeschoben und Lehm auf das Geogitter gefüllt. Erst nach dem erneuten Ziehen der Trennschicht wurde der Lehm

gestampft. Durch dieses Vorgehen vermischen sich die beiden Schichten beim Stampfen nur minimal und ergeben dadurch einen kraftschlüssigen Verbund, welcher durch das Geogitter zusätzlich verstärkt wird.

Nach der beschriebenen Trocknungsdauer von knapp 4 Wochen konnte die Rohdichte des Probekörpers ermittelt werden (Tabelle 28).

Tabelle 28: Probekörper Verbund.

Nr.	Gemisch	Probekörper [mm]	Trocknungszeit	Mischung	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
Verbund	LG75K25W3.5 + LG40K60W10	200 x 100 x 100	4 Wochen	Homogen, gut verarbeitbar, kein Weichen, gute Bindekraft	1.449

Quelle: eigene Anfertigung 2022

Der Probekörper (vgl. Abbildung 68) ließ sich mit der gewählten Rezeptur gut verarbeiten. Die Mischungen waren insgesamt homogen und entfalteten durch das zugefügte Wasser eine sehr gute Bindekraft. Das Verarbeiten von zwei unterschiedlichen Mischungen stellte keine Herausforderung dar.

Abbildung 68: Verbundprobekörper vor der Prüfung



Foto: Daube 2022

Nach einer Trocknungsdauer von etwa 4 Wochen wurde auch dieser Probekörper hinsichtlich seiner Druckfestigkeit geprüft. Die Prüfungen fanden mit einer Universalprüfmaschine Z 250 der Firma Zwick/Roell unter einer Vorkraft von 250 N und einer Prüfgeschwindigkeit von 400 N/s statt (vgl. Tabelle 29). Anders als bei den vorangegangenen Prüfungen, wurde bei dieser Untersuchung die Last beim

Druckversuch zunächst nur so lange erhöht, bis sich eine Spannung von  $2 \text{ N/mm}^2$  im Bauteil einstellt. Nach diesem ersten Belastungszyklus konnte der Verbundkörper auf Risse und Bruchstellen untersucht werden. Erst nach dieser Untersuchung wurde der Probekörper bis zum vollständigen Versagen belastet.

Um eine gezielte Belastung der Tragschicht zu erreichen, wurde auf den Probekörper eine zusätzliche Stahlplatte, mit einer Fläche von  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  aufgelegt. Das Gewicht dieser Platte von  $2.313 \text{ g}$  muss nach der Versuchsdurchführung noch auf die Bruchlast addiert werden.

Die Prüfung ergab eine maximale Druckfestigkeit von  $2,36 \text{ N/mm}^2$ . Die maximale Höchstkraft beim Bruch lag bei  $23.674,9 \text{ N}$ .

Bei der Untersuchung des Probekörpers hinsichtlich Bruchstellen, konnten keine Abplatzungen, Risse oder Bruchstellen erkannt werden. Erst bei einer Last von knapp  $2,4 \text{ N/mm}^2$  weicht die Tragschicht seitlich aus, sodass diagonale Risse entlang der Schichtübergänge auftraten. Die Dämmschicht blieb bei diesem Versuch unversehrt.

Tabelle 29: Ergebnisse Druckfestigkeitsprüfung Untersuchungsreihe 4 - Verbundkörper.

Nr.	Gemisch	Prüffläche [mm]	Prüfdatum	Druckfestigkeit [ $\text{N/mm}^2$ ]	Höchstkraft bei Bruch [N]	Graph
Verbund	LG75K25W3.5 + LG40K60W10	100 x 100	31.03.2022	2,36	23.674,9	Abbildung 70

Quelle: eigene Anfertigung 2022

Die Ober- und Unterseite des Probekörpers war nach der Prüfung noch gut intakt. Die nicht belasteten Seiten des Probekörpers zeigten nach der Prüfung eine starke Rissbildung und lösten sich leicht kegelförmig ab (vgl. Abbildung 69).

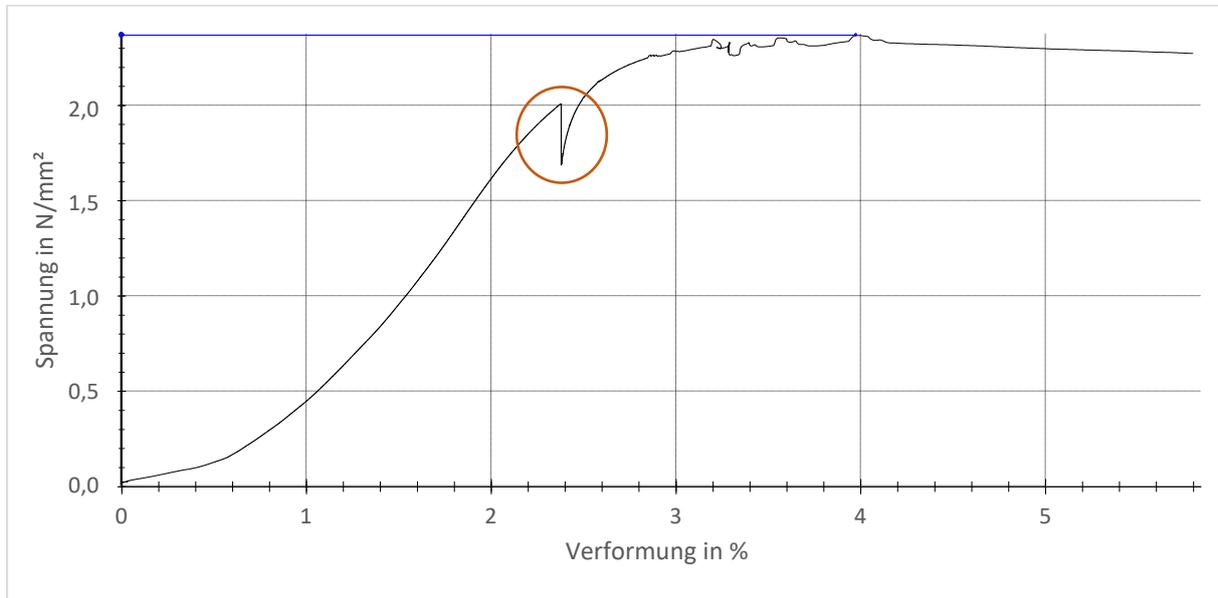
Abbildung 69: Verbundkörper nach der Druckfestigkeitsprüfung.



Foto: Plattner 2022

Die folgende Abbildung 70 zeigt das Spannungs-Dehnungsdiagramm des beschriebenen Probekörpers. An der markierten Stelle, bei einer Spannung von  $2 \text{ N/mm}^2$ , lässt sich im Graph ein markanter Spannungsabfall beobachten. Dieser ist auf die beschriebene Zwischenuntersuchung zurückzuführen und ist nicht durch einen tatsächlichen Spannungsabfall aufgrund von Materialversagen verursacht.

Abbildung 70: Spannungs-Dehnungsdiagramm Verbundprobekörper.



Quelle: Prüfprotokoll vom 31.03.

### **Zusammenfassung Untersuchungsreihe 5**

Die fünfte Untersuchungsreihe zeigt, dass das beschriebene Vorgehen zu einem kraftschlüssigen Verbund von Trag- und Dämmschicht führt. Die Dämmschicht wies selbst nach der Bruchbelastung der Tragschicht von  $2,36 \text{ N/mm}^2$  keine erkennbaren Schäden auf. Bis zu einer Spannung von  $2 \text{ N/mm}^2$  zeigen weder Dämm- noch Tragschicht Anzeichen von Versagen (Rissbildung, Abplatzungen). Daher soll dieser Aufbau in der Forschung weiterverfolgt werden.

## Untersuchungsreihe 6

Durch eine sechste Untersuchungsreihe soll erforscht werden, welchen Einfluss die Art der Versuchsdurchführung (Weg- oder Lastgeregelt) auf die erzielten Ergebnisse hat.

Bei einer lastgesteuerten Versuchsdurchführung wird die Kraft konstant und linear ansteigend auf den Prüfkörper aufgebracht, bis ein maximales Verformungskriterium oder ein definierter Lastabfall der maximalen Druckkraft erreicht wird.

Bei weggeregelten Versuchen wird die Druckpresse nicht über eine definierte Last, sondern über vorgegebene Verschiebung der Traverse innerhalb eines definierten Zeitintervalls gesteuert (bspw. 0,75 mm/min). Dadurch beanspruchen weggeregelte Druckfestigkeitsprüfungen deutlich mehr Zeit, geben aber detaillierte Informationen über das Materialverhalten nach dem Bruch, da der Probekörper nicht schlagartig versagt.

Dafür wurden insgesamt fünf Probekörper (LG70K30W3.5T3) mit einer Kantenlänge von 150 mm hergestellt. Drei der Probekörper wurden anschließend weggeregelt geprüft, die anderen beiden kraftgeregelt.

Die Trocknungsdauer der Probekörper betrug knapp 4 Wochen (20,7 °C Raumtemperatur und 65 % Luftfeuchtigkeit).

Nach der Trocknungszeit wurden die Rohdichten der Probekörper ermittelt und dokumentiert und die Probekörper durch ein Gipsbett ausgebessert und nivelliert. Ein abschließender Druckfestigkeitsversuch soll Auskunft über die Ergebnisse geben

### Untersuchungsreihe 6 – weggeregelt

Für die Untersuchungsreihe wurde das Lehmgemisch LG70K30W3.5T3 verwendet. Auf ein Flachsgewebe wurde bei diesem Versuch verzichtet, da allein die Diskrepanz der beiden Versuchsreihen von Interesse ist, nicht die tatsächliche Druckfestigkeit. Abbildung 71 zeigt einen der Probekörper vor dem Nivellieren mit Gips.

Abbildung 71: Probekörper A vor dem Nivellieren.



Foto: Plattner 2022

Nach der beschriebenen Trocknungsdauer von knapp 4 Wochen konnten die Rohdichten der Probekörper ermittelt werden (Tabelle 30).

Tabelle 30: Probekörper weggeregelt.

Nr.	Gemisch	Probekörper [mm]	Trocknungszeit	Mischung	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
PKA	LG70K30W3.5T3	150 x 150 x 150	4 Wochen	Homogen, gut verarbeitbar, kein Weichen, gute Bindekraft	1.800
PKB	LG70K30W3.5T3	150 x 150 x 150			1.738
PKC	LG70K30W3.5T3	150 x 150 x 150			1.750
Ø	<b>LG70K30W3.5T3</b>	-			<b>1.763</b>

Quelle: eigene Anfertigung 2022

Der Probekörper (vgl. Abbildung 71) ließ sich mit der gewählten Rezeptur gut verarbeiten. Die Mischung war insgesamt homogen und entfaltete durch das zugefügte Wasser eine sehr gute Bindekraft.

Nach einer Trocknungsdauer von etwa 4 Wochen wurden die Probekörper hinsichtlich ihrer Druckfestigkeit geprüft. Die Prüfungen fanden mit einer Universalprüfmaschine Z 250 der Firma Zwick/Roell unter einer Vorkraft von 250 N und einer Prüfgeschwindigkeit von 0,75 mm/min statt (vgl. Tabelle 31).

Die Prüfung ergab eine mittlere Druckfestigkeit von 1,55 N/mm<sup>2</sup>. Die mittlere Höchstkraft beim Bruch lag bei 34.233 N. Insgesamt fallen die Ergebnisse damit niedriger aus als erwartet.

Tabelle 31: Ergebnisse Druckfestigkeitsprüfung Untersuchungsreihe 6 - weggeregelt.

Nr.	Gemisch	Prüffläche [mm]	Prüfdatum	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Höchstkraft bei Bruch [N]	Graph
PKA	LG70K30W3.5T3	149,2 x 145,2	28.07.2022	1,52	32.800	Abbildung 73
PKB	LG70K30W3.5T3	148,6 x 150,3	28.07.2022	1,49	33.300	-
PKC	LG70K30W3.5T3	149,8 x 149,7	28.07.2022	1,63	36.600	-
Ø	<b>LG70K30W3.5T3</b>	-	-	<b>1,55</b>	<b>34.233</b>	-

Quelle: eigene Anfertigung 2022

Die Probekörper zeigten nach der Prüfung nur leichte Beschädigungen. Eine kegelförmige Ablösung war nicht erkennbar (vgl. Abbildung 72).

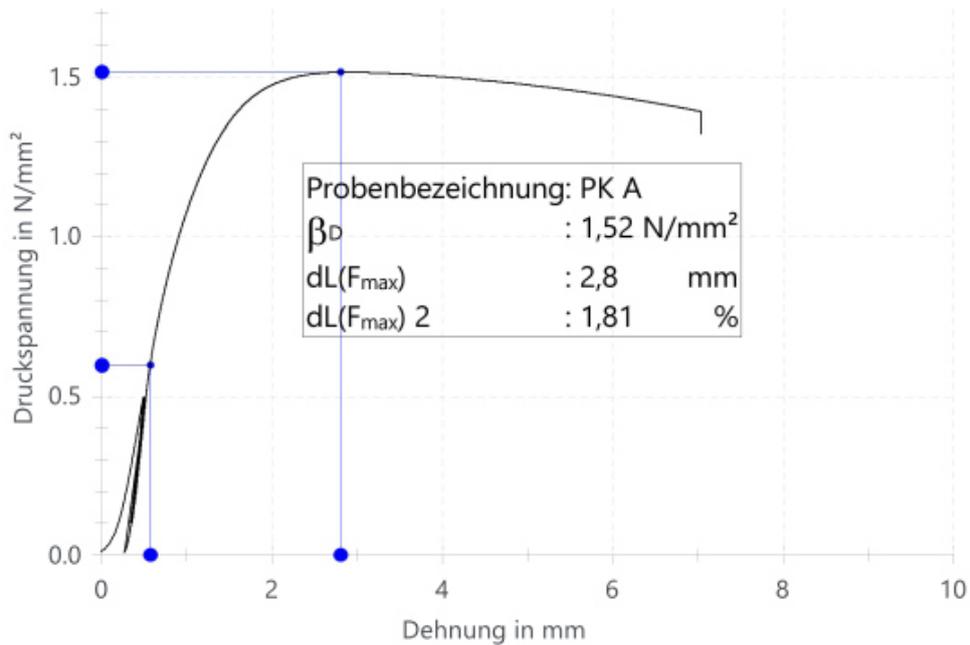
Abbildung 72: Probekörper A nach dem Druckversuch.



Foto: Plattner 2022

Die folgende Abbildung 73 zeigt exemplarisch das Spannungs-Dehnungsdiagramm des beschriebenen Probekörper A.

Abbildung 73: Spannungs-Dehnungsdiagramm weggeregelt.



Quelle: Prüfprotokoll W150 28.07.

### Untersuchungsreihe 6 – kraftgeregelt

Auch für diese Untersuchungsreihe wurde das Lehmgemisch LG70K30W3.5T3 verwendet. Auf ein Flachsgewebe wurde bei diesem Versuch verzichtet, da allein die Diskrepanz der beiden Versuchsreihen von Interesse ist, nicht die tatsächliche Druckfestigkeit. Abbildung 74 zeigt einen der Probekörper vor dem Nivellieren mit Gips.

Abbildung 74: Probekörper D vor dem Nivellieren.



Foto: Plattner 2022

Nach der beschriebenen Trocknungsdauer von knapp 4 Wochen konnten die Rohdichten der Probekörper ermittelt werden (Tabelle 32).

Tabelle 32: Probekörper kraftgeregelt.

Nr.	Gemisch	Probekörper [mm]	Trocknungszeit	Mischung	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
PKD	LG70K30W3.5T3	150 x 150 x 150	4 Wochen	Homogen, gut verarbeitbar,	1.725
PKE	LG70K30W3.5T3	150 x 150 x 150		kein Weichen,	1.728
Ø	<b>LG70K30W3.5T3</b>	-		gute Bindekraft	<b>1.727</b>

Quelle: eigene Anfertigung 2022

Der Probekörper (vgl. Abbildung 74) ließ sich mit der gewählten Rezeptur gut verarbeiten. Die Mischung war insgesamt homogen und entfaltete durch das zugefügte Wasser eine sehr gute Bindekraft.

Nach einer Trocknungsdauer von etwa 4 Wochen wurden die Probekörper hinsichtlich ihrer Druckfestigkeit geprüft. Die Prüfungen fanden mit einer Universalprüfmaschine Z 250 der Firma Zwick/Roell unter einer Vorkraft von 250 N und einer Prüfgeschwindigkeit von 0,05 MPa/s statt (vgl. Tabelle 33).

Die Prüfung ergab eine mittlere Druckfestigkeit von 1,55 N/mm<sup>2</sup>. Die mittlere Höchstkraft beim Bruch lag bei 34.233 N. Insgesamt fallen die Ergebnisse damit niedriger aus als erwartet.

Tabelle 33: Ergebnisse Druckfestigkeitsprüfung Untersuchungsreihe 6 - kraftgeregelt.

Nr.	Gemisch	Prüffläche [mm]	Prüfdatum	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Höchstkraft bei Bruch [N]	Graph
PKD	LG70K30W3.5T3	148,6 149,6	x 28.07.2022	1,71	38.200	
PKE	LG70K30W3.5T3	149,9 150,2	x 28.07.2022	1,88	42.400	-
Ø	LG70K30W3.5T3	-	-	<b>1,80</b>	<b>40.300</b>	-

Quelle: eigene Anfertigung 2022

Die Probekörper zeigten nach der Prüfung eine kegelförmige Ablösung (vgl. Abbildung 75).

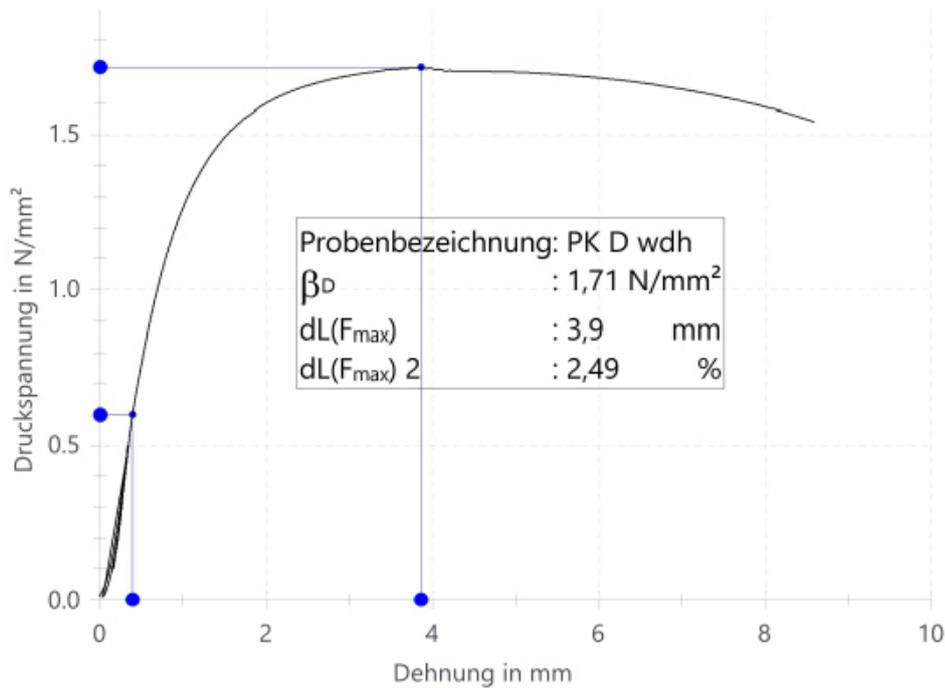
Abbildung 75: Probekörper D nach dem Druckversuch.



Foto: Plattner 2022

Die folgende Abbildung 76 zeigt exemplarisch das Spannungs-Dehnungsdiagramm des beschriebenen Probekörper D.

Abbildung 76: Spannungs-Dehnungsdiagramm kraftgeregelt.



Quelle: Prüfprotokoll W150 28.07.

### **Zusammenfassung Untersuchungsreihe 6**

Die sechste Untersuchungsreihe zeigt, dass es signifikante Unterschiede zwischen den beiden Versuchsdurchführungen gibt. Während die durchschnittliche Druckfestigkeit beim weggeregelten Versuch bei 1,55 N/mm<sup>2</sup> lag, lag diese beim kraftgeregelten Versuch bei 1,80 N/mm<sup>2</sup>. Die Diskrepanz entspricht etwa 16 %.

Auch das Schadensbild nach der Prüfung unterschied sich zwischen der kraft- und weggeregelten Untersuchung. Während bei der kraftgeregelten Untersuchung starke Schäden sichtbar waren, wirkten die Probekörper des weggeregelten Versuchs überwiegend intakt.

Bei allen Versuchen war eine deutliche Relaxation nach der Entlastung festzustellen, wodurch die Probekörper nach dem Endlasten annähernd wieder ihre Ausgangshöhe einnahmen.

Eine weitere Untersuchungsreihe soll diese Ergebnisse weiter bestätigen.

## Untersuchungsreihe 7

Die im Folgenden beschriebene Versuchsreihe soll die Diskrepanz der vorangegangenen weg- und kraftgeregelten Druckfestigkeitsprüfungen (vgl. Untersuchungsreihe 6, S. 107) untersuchen und möglicherweise aufzeigen, welches Verfahren für den Werkstoff Lehm verlässlichere Ergebnisse liefert.

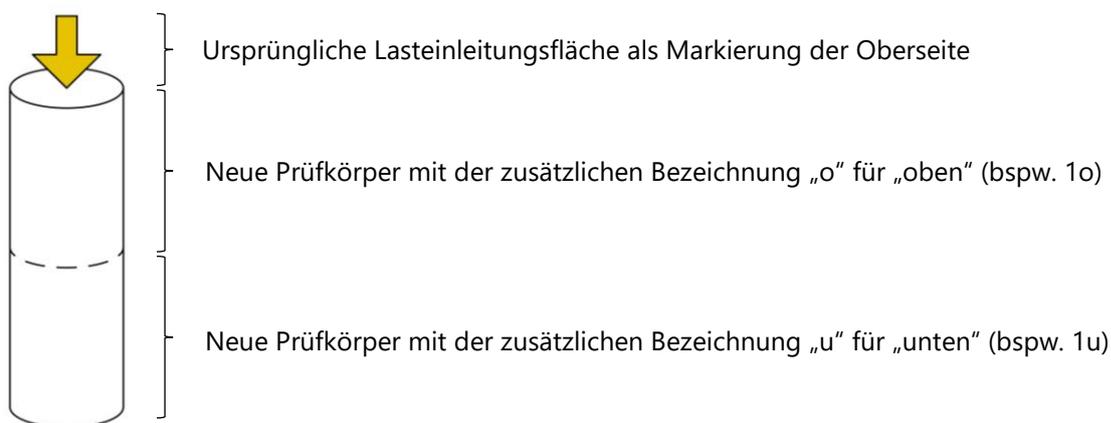
Die vorab durchgeführten, kraftgeregelten Druckversuche (vgl. Kapitel „Untersuchungsreihe 6 – kraftgeregelt“, S. 110) ergaben im Vergleich zu den weggeregelten Versuchen (vgl. Kapitel „Untersuchungsreihe 6 – weggeregelt“, S.107) eine deutlich gesteigerte Druckfestigkeit. Die Steigerung lag im Bereich von 15 – 20 %. Die beschriebenen Ergebnisse basieren allerdings lediglich auf fünf Prüfungen, weshalb die im Folgenden beschriebene, größer angelegte Versuchsreihe diese Tendenz genauer untersuchen soll.

In zwei Versuchsreihen werden dazu, abweichend zu den Vorgaben der Lehmbauregeln, 20 zylindrische Probekörper mit einem Durchmesser von 70 mm untersucht. Die Proben entstammen aus der bereits am 26.07.2022 durchgeführten E-Modulprüfung (vgl. Kapitel Elastizitätsmodul, ab Seite 197), wobei Zylinder mit einer Länge von 200 mm und einem Mischverhältnis von LG70 K30 W3,5 T0,03 ohne eingelegte Flachfasern geprüft wurden. Auf die Flachfasern wurde bei den beschriebenen Probekörpern aufgrund des zu geringen Querschnitts verzichtet. Da in jener Versuchsreihe nur zwei von zehn Proben bis zum Bruch belastet wurden, eignen sich die übrigen Prüfkörper für eine weitere Untersuchungsreihe.

Die beschriebenen Druckfestigkeitsversuche wurden am 30.11.2022 in der MFPA Weimar durchgeführt.

Für die geplante Versuchsreihe werden die ursprünglichen Probekörper zunächst mit Hilfe einer Steinsäge halbiert und anschließend mit Gips nivelliert. Dadurch wird sichergestellt, dass die Lasteinleitungsflächen parallel und fehlerfrei sind. Im nächsten Schritt werden die Prüfkörper durchnummeriert und zusätzlich mit einem „o“ für „oben“ oder einem „u“ für „unten“ versehen (vgl. Abbildung 77). Durch dieses Vorgehen kann jederzeit sichergestellt werden, dass sich alle Prüfkörper auch nach der Teilung noch ihrem Ursprünglichen Prüfkörper zuordnen lassen.

Abbildung 77: Bezeichnung der Probekörper



Quelle: eigene Anfertigung 2022

In den Untersuchungen wird eine Hälfte der Zylinder jeweils weggeregelt und die andere Hälfte lastgeregelt geprüft. Damit sollen prüfkörperabhängige Ungenauigkeiten minimiert werden,

beziehungsweise rechtzeitig identifiziert werden, sodass diese Prüfkörper aus den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen werden können.

Analog zur Betonnorm *Prüfung von Festbeton DIN EN 12390-3* werden die Versuche mit der Universalprüfmaschine Z 250 der Firma *Zwick/Roll* (250 kN) bis zum Bruch belastet. Die Ausrichtung der Prüflast hängt dabei von der Verdichtungsrichtung bei der Herstellung ab. Sie steht also senkrecht zu den horizontalen Schichten der Stampflehmkörper. Abbildung 78 zeigt exemplarisch den Probekörper 7o vor der Druckfestigkeitsprüfung.

Abbildung 78: Probekörper 7o vor der Druckfestigkeitsprüfung



Foto: Plattner 2022

### **Untersuchungsreihe 7 – weggeregelt**

Bei der ersten Untersuchungsreihe werden insgesamt 10 zylindrische Probekörper getestet (vgl. Tabelle 34). Um möglichst repräsentative Ergebnisse zu erhalten, werden sechs obere Probekörper „o“ und vier untere Probekörper „u“ verwendet. Durch dieses vorgehen wird vermieden, dass die Position im Ursprünglichen Probekörper einen Einfluss auf die Ergebnisse hat, beziehungsweise dieser mögliche Einfluss unerkant bleibt. Insgesamt müssen zwei Probekörper „1o“ und „3o“ aufgrund einer Vorschädigung nachträglich aussortiert werden.

Die Prüfung wird weggeregelt mit 0,75 mm/min gefahren. Als Abbruchkriterien werden eine maximale Stauchung von 6 mm beziehungsweise ein Lastabfall von 10 % der maximalen Druckkraft definiert.

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung liegen alle im Bereich von 1,52 N/mm<sup>2</sup> und 1,92 N/mm<sup>2</sup>. Somit lässt sich eine mittlere Druckfestigkeit, unter Ausschluss der vorgeschädigten Probekörper, von 1,72 N/mm<sup>2</sup> feststellen. Die Standardabweichung der Werte liegt folglich bei 0,15 N/mm<sup>2</sup>, was 8,72 % des Mittelwerts entspricht. Die maximale Abweichung der Werte vom Mittelwert liegt bei 11,63 %. Insgesamt liegt die Streuung somit in einem gerade noch annehmbaren Bereich.

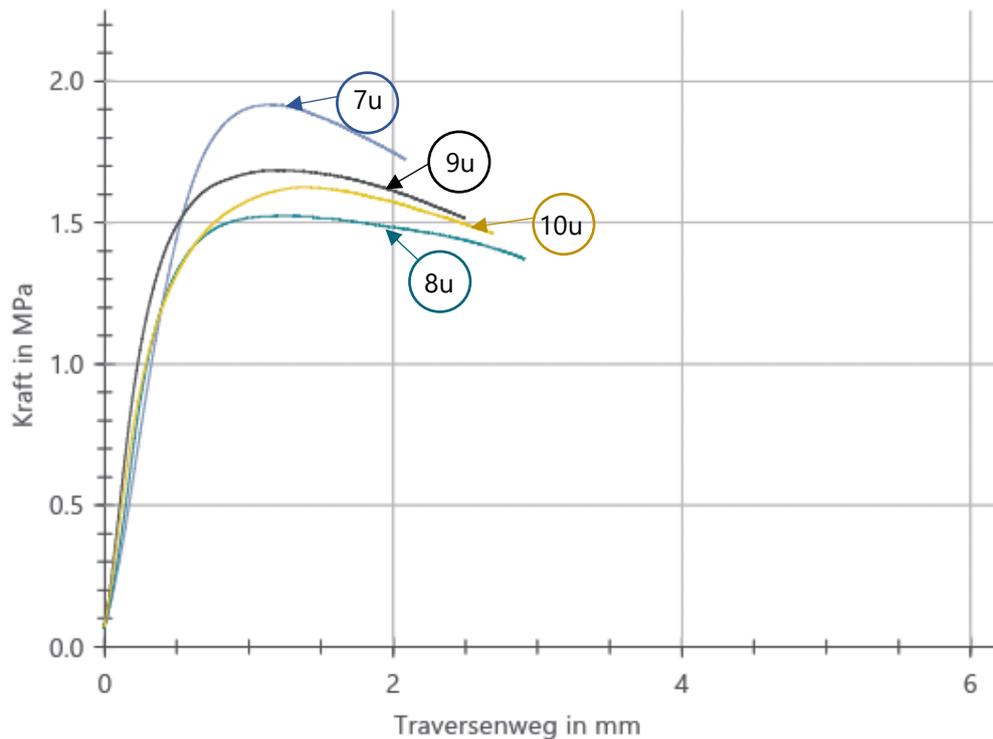
Tabelle 34: Ergebnisse der weggeregelten Druckfestigkeitsprüfungen

Probenbezeichnung	$L_0$	$F_{max}$	$\Delta L (F_{max})$	$\beta_{Dk}$
1o (vorgeschädigt)	97,9 mm	3750 N	2,6873 mm	0,98 N/mm <sup>2</sup>
2o (Abgleich leicht imperfekt)	99,7 mm	7370 N	1,0054 mm	1,91 N/mm <sup>2</sup>
3o (vorgeschädigt)	102,1 mm	6400 N	1,4549 mm	1,66 N/mm <sup>2</sup>
4o (Abgleich leicht imperfekt)	102,6 mm	5970 N	1,1395 mm	1,55 N/mm <sup>2</sup>
5o	95,7 mm	6910 N	1,2319 mm	1,80 N/mm <sup>2</sup>
6o (Abgleich leicht imperfekt)	105,8 mm	6760 N	1,5412 mm	1,76 N/mm <sup>2</sup>
7u	105,2 mm	7380 N	1,1366 mm	1,92 N/mm <sup>2</sup>
8u	107,2 mm	5870 N	1,2863 mm	1,52 N/mm <sup>2</sup>
9u	103,8 mm	6490 N	1,2205 mm	1,69 N/mm <sup>2</sup>
10u	101,8 mm	6260 N	1,3768 mm	1,63 N/mm <sup>2</sup>
<b>Mittlere Länge <math>L_0</math></b>	<b>102,7 mm</b>			
<b>Mittlere Kraft <math>F_{max}</math></b>		<b>6626 N</b>		
<b>Mittlere Längenänderung <math>\Delta L (F_{max})</math></b>			<b>1,2423 mm</b>	
<b>Mittlere Druckfestigkeit <math>\beta_D</math></b>				<b>1,72 N/mm<sup>2</sup></b>

Quelle: eigene Anfertigung 2022 auf Grundlage vom Prüfprotokoll vom 02.12.

Abbildung 79 zeigt die Ergebnisse von vier weggeregelten Druckfestigkeitsprüfungen der Prüfkörper 7u, 8u, 9u und 10u.

Abbildung 79: Wegeregelter Spannungs-/Verformungsverlauf



Quelle: eigene Anfertigung 2023 nach dem Prüfprotokoll vom 02.12.

### **Untersuchungsreihe 7 – kraftgeregelt**

Bei der zweiten Untersuchungsreihe werden ebenfalls 10 zylindrische Probekörper getestet (vgl. Tabelle 35). Als Pendant zu der ersten Untersuchungsreihe, werden diesmal sechs untere Probekörper „u“ und vier obere Probekörper „o“ verwendet. Wie bereits beschrieben, wird durch dieses Vorgehen vermieden, dass die Position im Ursprünglichen Probekörper einen Einfluss auf die Ergebnisse hat, beziehungsweise dieser mögliche Einfluss unerkannt bleibt. Insgesamt müssen erneut zwei Probekörper „1u“ und „3u“ aufgrund einer Vorschädigung nachträglich aussortiert werden.

Die zweite Untersuchungsreihe sieht sogenannte Kurzzeitprüfungen vor, bei denen die Höchstlast innerhalb einer Minute erreicht werden soll. Eine Vorkraft von 250 N und eine Prüfgeschwindigkeit von 400 N/s ( $0,04 \text{ ((N/mm}^2\text{)/s)}$ ) erwiesen sich dabei in den vorangegangenen Druckfestigkeitsprüfungen als praktikable Prüfparameter für Probekörper mit den Abmessungen  $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$ . Für eine maximale Druckfestigkeit von  $2,0 \text{ N/mm}^2$  wird demnach ein Bruch binnen 50 Sekunden erwartet.

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung liegen alle im Bereich von  $1,65 \text{ N/mm}^2$  und  $2,05 \text{ N/mm}^2$ . Somit lässt sich eine mittlere Druckfestigkeit, unter Ausschluss der vorgeschädigten Probekörper, von  $1,83 \text{ N/mm}^2$  feststellen. Die Standardabweichung der Werte liegt folglich bei  $0,14 \text{ N/mm}^2$ , was  $7,65 \%$  des Mittelwerts entspricht. Die maximale Abweichung der Werte vom Mittelwert liegt bei  $12,02 \%$ . Insgesamt liegt die Streuung somit in einem gerade noch annehmbaren Bereich.

Tabelle 35  
Ergebnisse der kraftgeregelten Druckfestigkeitsprüfungen

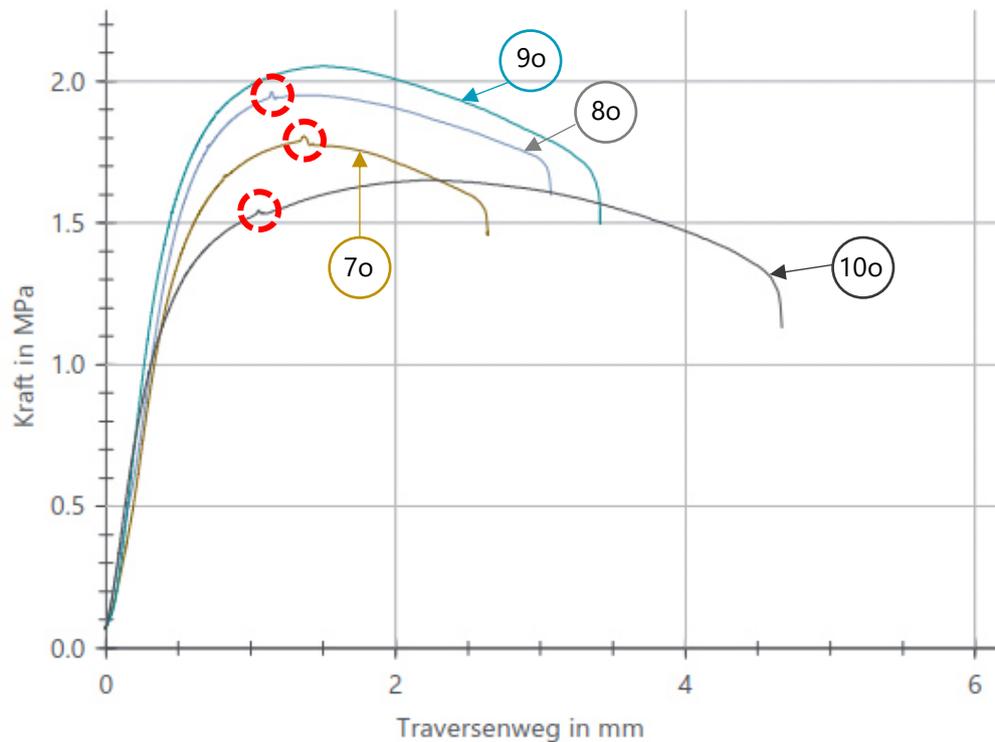
Probenbezeichnung	$L_0$	$F_{\max}$	$\Delta L (F_{\max})$	$\beta_{Dw}$
1u (vorgeschädigt, optisch intakt)	105,1 mm	6960 N	2,1846 mm	1,81 N/mm <sup>2</sup>
2u	102,1 mm	7360 N	1,5798 mm	1,91 N/mm <sup>2</sup>
3u (vorgeschädigt, Abgleich imperfekt)	103,4 mm	5180 N	2,7761 mm	1,35 N/mm <sup>2</sup>
4u	104,3 mm	7120 N	1,4596 mm	1,85 N/mm <sup>2</sup>
5u	103,5 mm	6700 N	1,8821 mm	1,74 N/mm <sup>2</sup>
6u	100,7 mm	6510 N	1,2732 mm	1,69 N/mm <sup>2</sup>
7o	98,2 mm	6950 N	1,3661 mm	1,81 N/mm <sup>2</sup>
8o (Abgleich leicht imperfekt)	98,0 mm	7550 N	1,1405 mm	1,96 N/mm <sup>2</sup>
9o	104,2 mm	7900 N	1,5023 mm	2,05 N/mm <sup>2</sup>
10o	97,5 mm	6350 N	2,2200 mm	1,65 N/mm <sup>2</sup>
<b>Mittlere Länge <math>L_0</math></b>	<b>101,1 mm</b>			
<b>Mittlere Kraft <math>F_{\max}</math></b>		<b>7055 N</b>		
<b>Mittlere Längenänderung <math>\Delta L (F_{\max})</math></b>			<b>1,5530 mm</b>	
<b>Mittlere Druckfestigkeit <math>\beta_D</math></b>				<b>1,83 N/mm<sup>2</sup></b>

Quelle: eigene Anfertigung 2023 auf Grundlage vom Prüfprotokoll vom 02.12.

Abbildung 80 zeigt die Ergebnisse der kraftgeregelten Druckfestigkeitsprüfungen der Prüfkörper 7o, 8o, 9o und 10o. Somit werden in dieser Abbildung die zugehörigen oberen Prüfkörper, der in Abbildung 79 dargestellten Probekörper visualisiert.

Das Schaubild in Abbildung 80 zeigt die Ergebnisse der dazugehörigen Oberseiten nach der kraftgeregelten Druckfestigkeitsprüfung.

Abbildung 80: Kraftgeregelter Spannungs-/Verformungsverlauf



Quelle: eigene Anfertigung 2023 nach dem Prüfprotokoll vom 02.12.

Bei Betrachtung der Spannungs-/Verformungsverläufe der kraftgeregelten Versuche in Abbildung 80 fällt auf, dass beim Erreichen der maximalen Bruchlast ein kurzzeitiger Spannungsanstieg mit anschließendem Abfall zu verzeichnen ist. Dieses Phänomen zeigt sich in Form von kleinen Spitzen (in Abbildung 80 rot markiert), welche kurz vor Erreichen der maximalen Druckfestigkeit in dem sonst sehr gleichmäßig verlaufenden Graphen auftreten. Diese Spitzen weisen auf ein schlagartiges Versagen des Probekörpers hin, sodass im Moment des Bruchs die Kraft stetig erhöht wird, während das Material bereits seitlich ausweicht. Dies führt dazu, dass die Prüfmaschine kurzzeitig keine weiteren Spannungen aufzeichnen kann.

### **Zusammenfassung Untersuchungsreihe 7**

Das Bruchbild zeigt bei allen Versuchen schollenartige Abplatzungen am äußeren Rand der Probekörper, die vor allem auf Querspannungen zurückzuführen sind (vgl. Abbildung 81). Bei näheren Untersuchungen zeigen sich einige vertikale und diagonale Risse über den gesamten Querschnitt, während das Material der Druckbelastung seitlich ausweicht. Bei allen Versuchen ließ sich eine deutliche Relaxation nach dem Entlasten feststellen. So verformten sich die Würfel nach dem Abfallen der Prüflast nahezu in ihre Ausgangshöhe, was unter anderem durch die erhöhte Elastizität des Korks zu erklären ist.

Abbildung 81: Prüfkörper 1o nach dem Bruch



Foto: Plattner 2022

Die 15 – 20 % höheren Druckfestigkeiten bei kraftgeregelten Versuchen konnten im Rahmen dieser Prüfung allgemein nicht bestätigt werden (vgl. Tabelle 36). Insgesamt lag die Druckfestigkeit bei den kraftgeregelten Versuchen nur vier Mal über den Ergebnissen der weggeregelten Versuche. Bei Betrachtung der Mittelwerte bestätigt sich diese Beobachtung. Insgesamt weichen die Ergebnisse der weggeregelten Versuche um 7,22 % von jenen der kraftgeregelten Versuche ab.

Tabelle 36: Vergleich der Druckfestigkeiten von kraft- und weggeregelten Versuchen.

Probenbezeichnung (kraftregelt)	$\beta_{Dk}$	Probenbezeichnung (weggeregelt)	$\beta_{Dw}$	$\Delta\beta_{Dkw}$	Abweichung $\beta_{Dw}$ von $\beta_{Dk}$
1o (vorgeschädigt)	0,98 N/mm <sup>2</sup>	1u (vorgeschädigt)	1,81 N/mm <sup>2</sup>	0,83 N/mm <sup>2</sup>	84,69 %
2o (Abgleich leicht imperfekt)	1,91 N/mm <sup>2</sup>	2u	1,91 N/mm <sup>2</sup>	0,00 N/mm <sup>2</sup>	0,00 %
3o (vorgeschädigt)	1,66 N/mm <sup>2</sup>	3u (vorgeschädigt)	1,35 N/mm <sup>2</sup>	0,31 N/mm <sup>2</sup>	18,67 %
4o (Abgleich leicht imperfekt)	1,55 N/mm <sup>2</sup>	4u	1,85 N/mm <sup>2</sup>	0,30 N/mm <sup>2</sup>	19,35 %
5o	1,80 N/mm <sup>2</sup>	5u	1,74 N/mm <sup>2</sup>	0,06 N/mm <sup>2</sup>	3,33 %

Probenbezeichnung (kraftgeregelt)	$\beta_{Dk}$	Probenbezeichnung (weggeregelt)	$\beta_{Dw}$	$\Delta\beta_{Dkw}$	Abweichung $\beta_{Dw}$ von $\beta_{Dk}$
6o (Abgleich leicht imperfekt)	1,76 N/mm <sup>2</sup>	6u	1,69 N/mm <sup>2</sup>	0,07 N/mm <sup>2</sup>	3,98 %
7u	1,92 N/mm <sup>2</sup>	7o	1,81 N/mm <sup>2</sup>	0,11 N/mm <sup>2</sup>	5,73 %
8u	1,52 N/mm <sup>2</sup>	8o (Abgleich leicht imperfekt)	1,96 N/mm <sup>2</sup>	0,44 N/mm <sup>2</sup>	28,95 %
9u	1,69 N/mm <sup>2</sup>	9o	2,05 N/mm <sup>2</sup>	0,36 N/mm <sup>2</sup>	21,30 %
10u	1,63 N/mm <sup>2</sup>	10o	1,65 N/mm <sup>2</sup>	0,02 N/mm <sup>2</sup>	1,23 %
<b>Mittelwerte</b>	<b>1,72 N/mm<sup>2</sup></b>		<b>1,83 N/mm<sup>2</sup></b>	<b>0,11 N/mm<sup>2</sup></b>	<b>7,22 %</b>

Quelle: eigene Anfertigung 2023 auf Grundlage vom Prüfprotokoll vom 02.12. und Prüfprotokoll vom 02.12.

Darüber hinaus lässt sich beobachten, dass die Ergebnisse der zugehörigen oberen und unteren Probekörperhälften teilweise weit auseinanderliegen, was zeigt, dass selbst innerhalb eines Probekörpers deutliche Schwankungen der Materialhomogenität vorkommen können. Die Wahl der sehr schmalen und gleichzeitig hohen zylinderförmigen Geometrie mit 70 mm Durchmesser und einer Länge von 200 mm stellte sich retrospektiv als weniger geeignet für eine Stampflehmischung mit einem Größtkorn von 16 mm und einem möglichen Überkorn von 22 mm heraus. Hier sollten künftig größere Probekörper verwendet werden. Dennoch eignete sich der beschriebene Versuchsaufbau gut, um die beobachtete Diskrepanz der weg- und kraftgesteuerten Druckfestigkeitsprüfung zu untersuchen.

Des Weiteren ist die Messungenauigkeit, welche im Graphen der kraftgeregelten Druckfestigkeitsprüfung erkennbar ist, zu erwähnen (vgl. Abbildung 80). Bei der deutlich langsameren weggeregelten Prüfung bleibt diese Messungenauigkeit aus. Alle Versuche wurden aufgrund des Lastabfallkriteriums von 10 % gestoppt.

Die Wahl einer Kraft- bzw. Wegsteuerung hinsichtlich eines normiertes Prüfverfahrens mit samt aller Prüfparameter gilt es weiter zu untersuchen. Alle Ergebnisse, Seriengrafiken und Spannungs-/ Dehnungsdiagramme befinden sich in Anlage 7 und Anlage 8.

### Biegezugfestigkeitsprüfung

Im Rahmen der Forschung wurden auch Biegezugversuche durchgeführt. Untersucht wurde jeweils ein unbewehrter sowie ein bewehrter Querschnitt. Als Bewehrung wurde das powerRIBS Hochleistungs-Flachsgewebe der Firma Bcomp verwendet, welches ebenfalls in den Druckversuchen zum Einsatz kam. Die Versuche wurden als zwei-Punkt-Lastangriff nach den Vorgaben der (DIN EN 12390-5) - Prüfung von Festbeton durchgeführt<sup>103</sup>. Ziel dieser Untersuchung ist es, die Biegezugfestigkeit  $f_{ct}$  der verwendeten Lehm-Kork-Mischung und die Leistungsfähigkeit der Flachfasern als Biegezugbewehrung zu ermitteln.

Obgleich Stampflehmteile keiner planmäßigen Biegebelastung ausgesetzt werden sollten, lässt sich diese nicht gänzlich vermeiden. Horizontal wirkende Windlasten und Erdbebenlasten führen unweigerlich zu Biegung im Bauteil. Im Falle der Stampflehmfertigteile kann es zudem während des Verladevorgangs, des Transports zur Baustelle und auch während des Einbaus zu Biegebelastungen kommen.

Es soll in dieser und noch folgenden Untersuchungen geprüft werden, welche ökologisch unbedenklichen Materialien sich für die Bewehrung von Stampflehmfertigteilen eignen. Weiter soll geprüft werden, ob sich bestimmte Materialien auch zur Unterstützung von Rohrdurchführungen und möglicherweise sogar kleinerer Durchbrüche in nichttragenden Wänden eignen.

Bislang werden hauptsächlich grobmaschige Gewebe aus Polyamid ummantelten Glasfasern verwendet, wie sie auch im Erdbau eingesetzt werden. Laut Prof. Christof Ziegert stellen Naturfasern aufgrund ihrer geringen Festigkeit keine geeignete Alternative dar<sup>104</sup>. Die Druckversuche, die in diesem Projekt mit Flachsgewebe durchgeführt wurden (Untersuchungsreihe 1, Untersuchungsreihe 2 und Untersuchungsreihe 3), zeigten jedoch eine deutliche Steigerung der Druckfestigkeit. Bleibt zu klären, wie sich die Naturfasern bezüglich der Dauerhaftigkeit verhalten. Es ist zu überprüfen, ob die Fasern ausreichend durch den Lehm geschützt sind oder ob sie sich durch die ständige Feuchtigkeitsab- und zunahme beginnen sich zu zersetzen.

Die Biegezuguntersuchung eignet sich außerdem zur Überprüfung, ob sich Bemessungs- und Nachweiskonzepte des Stahlbetonbaus mit ideellen Querschnittswerten und bezogenen Geometrieparametern auf Stampflehmteile anwenden lassen. Dazu sollen Berechnungen mit Versuchsergebnissen verglichen werden.

---

<sup>103</sup> Vgl. DIN EN 12390-5.

<sup>104</sup> Vgl. Ziegert und Röhlen 2014, S. 191.

## Stand der Forschung

Lehm ist einer der ältesten Baustoffe der Welt. Entsprechend vielfältig sind die Publikationen zu diesem Thema. Insbesondere die Notwendigkeit der Verwendung nachhaltiger Baustoffe durch die Klimakrise, hat das Interesse am historischen und modernen Lehmbau aus seinem bisherigen Nischendasein befreit. Daraus resultierend liefert die folgende Auflistung von Publikationen nur einen kleinen Ausschnitt, der verdeutlichen soll, dass das Thema Biegung erst mit dem Aufkommen der Verwendung von vorgefertigten Stampflehmtafeln an Bedeutung gewinnt. In der älteren, aber auch neueren Literatur wird planmäßige Biegung, abgesehen von Wind- und Erdbebenbelastung, als zu vermeiden eingestuft.

François Cointeraux, Die Pisé- Baukunst (1803)<sup>105</sup>

*Fensterbänke „[...] können aus Stein gemacht werden [...]“<sup>106</sup>*

*„[...] und es wäre auch zu wünschen, daß auch die Querstücke oder Stürze [...] über den Fenstern aus Stein gemacht würden; man kann jedoch in den Ländern, wo er selten ist, sich mit hölzernen Pfählen begnügen, wie zu Lyon geschieht, wo sie oft ein ganzes Jahrhundert dauern.“<sup>107</sup>*

*„Was die Thüren betrifft, so muß man sie mit bretternen Einfassungen versehen, wenn man sie nicht aus Stein oder beworfenen Ziegeln machen kann; doch man kann zur Ersparnis die Seiten von Pisé lassen, mit der Vorsicht, daß die Ecken abgerundet werden; aber hierzu wird erfordert, daß solche Thüren keinen harten und anhaltenden Erschütterungen ausgesetzt werden.“<sup>108</sup>*

Richard Niemeyer, Der Lehmbau (1946)<sup>109</sup>

*„Scheitrechte Stürze und flache Stichbögen aus Lehm sind beim Lehmbau bedenklich, bei Balkenlasten unzulässig“<sup>110</sup>*

Stattdessen werden insbesondere für die Stampflehmbauweise Holzstürze empfohlen, da sich diese auch in über 100 Jahre alten Bestandsgebäuden bewährt haben. Alternativ sollten Stahl- oder Stahlbetonstürze verwendet werden.

Gernot Minke, Low-cost-housing, Entwicklung und Realisation erdbebensicherer Wohnhäuser aus lokalen Materialien für Guatemala, (1978)

In Zusammenarbeit mit der Universidad Francisco Marroquin und dem Zentrum für angepasste Technologie (CEMAT) aus Guatemala wird eine elementierte Stampflehmbauweise mit Bambusarmierung entwickelt und getestet. Die Elemente haben einen T-Förmigen Querschnitt, die Armierung wurde vertikal in die vorgefertigten Lehmtafeln eingearbeitet.<sup>111</sup>

---

<sup>105</sup> Vgl. Cointeraux 2002, S. 169–170.

<sup>106</sup> Cointeraux 2002, S. 169–170.

<sup>107</sup> Cointeraux 2002, S. 169–170.

<sup>108</sup> Cointeraux 2002, S. 169–170.

<sup>109</sup> Vgl. Niemeyer 1982, S. 76.

<sup>110</sup> Niemeyer 1982, S. 76.

<sup>111</sup> Vgl. Minke 1995, S. 281–282.

Der 1978 erbaute Prototyp mit 52 m<sup>2</sup> Wohnfläche verursachte Materialkosten von lediglich 800 €. <sup>112</sup> Es gilt jedoch noch zu bewerten, welchen tatsächlichen Wert die beschriebenen 800 € zu dieser Zeit in Guatemala hatten. Guatemala liegt auf dem pazifischen Feuerring und zählt zu den ärmsten Ländern der beiden Amerikas. Wie viele Guatemalteken bis heute von der Entwicklung dieser erdbebensicheren low-cost Häuser profitieren konnten lässt sich leider nicht belegen.

Klaus Dierks und Robert Stein, Der moderne Lehm- und Ziegelbau (2002) <sup>113</sup>

Dierks und Stein veröffentlichen einen Vorschlag für ein Bemessungskonzept von Stampflehmwänden, welches stark an den Massivbau angelehnt ist. Für die Bemessung orientieren sie sich am Bemessungskonzept für unbewehrte Betonwände, da „[...] Lehm- und Ziegelbaustoffe eine deutlich[e] Affinität zu Beton“ <sup>114</sup> aufweisen. Für die Berücksichtigung des Kriechens und der Theorie II. Ordnung betrachten sie den Mauerwerksbau. Da für den Lehm- und Ziegelbau durch die aktuellen Lehm- und Ziegelbau-Regeln <sup>115</sup> sehr enge Grenzen gelten, empfehlen sie eine weitere Ausarbeitung von ingenieurwissenschaftlichen Grundlagen, nach dem Vorbild des Massiv- und Stahlbetonbaus.

Horst Schroeder, Lehm- und Ziegelbau (2010) <sup>116</sup>

*„[...] typische Belastungssituationen für das Auftreten von Biegezug stellen Lehmputze dar, aber auch eine dynamische Beanspruchung von Bauteilen, z.B. Erdbeben, sowie von nicht tragenden Bauteilen ohne wesentliche Auflast [...]“* <sup>117</sup>

---

<sup>112</sup> Vgl. Baubiologie Magazin 16.06.2020.

<sup>113</sup> Vgl. Dierks und Stein 2002, S. 37.

<sup>114</sup> Dierks und Stein 2002, S. 37.

<sup>115</sup> Vgl. Volhard und Röhlen 2009.

<sup>116</sup> Vgl. Schroeder 2019, S. 159–160.

<sup>117</sup> Schroeder 2019, S. 159–160.

## Untersuchungsreihe 1

Um die Biegezugfestigkeit zu bestimmen, wird laut DIN EN 12390-5 ein „[p]rismatische[r] Probekörper [...] einem Biegemoment durch die Lasteintragung über obere und untere Rollen ausgesetzt. Die aufgenommene Höchstlast wird aufgezeichnet und die Biegezugfestigkeit wird berechnet.“<sup>118</sup>

### Methodik

In Anlehnung an den Betonbau soll die DIN EN 12390-5 herangezogen werden. Für die Versuchsdurchführung werden insgesamt drei Probekörper (l x b x h 400 mm x 100 mm x 100 mm) hergestellt (vgl. Abbildung 82).

Abbildung 82: Probekörper Biegezugfestigkeit.



Foto: Daube 2022

Die Probekörper werden in Richtung des Krafteintrags, also liegend, gestampft. Während die Lastaufbringung auf den Probekörper identisch zum Betonbau und somit zur DIN EN 12390-5 angeordnet sein kann, müssen einige Prüfparameter wie die Spannungszunahme oder die Belastungsgeschwindigkeit für den Lehm- oder Ziegelbau hinsichtlich ihrer Eignung überprüft und entsprechend angepasst werden.

Laut DIN EN 12390-5 ist bei der Prüfung „[e]ine konstante Spannungszunahme innerhalb des Bereichs von 0,04 MPa/s ( $\text{N/mm}^2 \cdot \text{s}$ ) bis 0,06 MPa/s ( $\text{N/mm}^2 \cdot \text{s}$ ) [...] zu wählen.“<sup>119</sup> Beton mit der Druckfestigkeitsklasse C20/25 (Referenzkörper) hat eine Biegezugfestigkeit von etwa  $4,40 \text{ N/mm}^2$ .<sup>120</sup> Bis zum Bruch vergehen bei diesem Beton demnach etwa 73 Sekunden. Im Zuge der Forschung sollen die Zeitspannen bis zum Bruch des Referenz-Probekörpers mit in die Anpassung der Versuchsaufbauten einbezogen werden. Damit soll ein zu schneller Lasteintrag und somit eine Verfälschung der Ergebnisse

<sup>118</sup> DIN EN 12390-5, S. 5.

<sup>119</sup> DIN EN 12390-5, S. 7.

<sup>120</sup> Vgl. IBU 2018.

vermieden werden. Für reinen Stampflehm ist eine Biegezugfestigkeit von  $0,52 \text{ N/mm}^2$  zu erwarten.<sup>121</sup> Bei der in DIN 12390-5 angegebenen Prüfgeschwindigkeit würde der Probekörper nach spätestens 14 Sekunden brechen. Deshalb soll abweichend von DIN 12390-5 mit einer Spannungszunahme von  $0,02 \text{ MPa/s}$  geprüft werden. „Nach Aufbringen der Ausgangsbelastung, die etwa 20 % der Bruchlast nicht übersteigen darf, wird die Belastung stoßfrei auf den Probekörper aufgebracht und stetig mit der eingestellten Geschwindigkeit  $\pm 10 \%$  bis zum Erreichen der Höchstlast erhöht.“<sup>122</sup> Die Ausgangsbelastung sollte somit bei maximal  $0,1 \text{ N/mm}^2$  liegen.

„In der Schlussphase der Prüfung kann die Belastungsgeschwindigkeit durch den Versagensmodus des Probekörpers beeinflusst werden.“<sup>123</sup> Laut DIN EN 12390-5 lässt sich die erforderliche Belastungsgeschwindigkeit  $R \text{ [N/s]}$  nach der Folgenden Gleichung berechnen:<sup>124</sup>

$$R = \frac{s \cdot d_1 \cdot d_2^2}{l} \quad [\text{N/s}] \quad (14)$$

Bei der genannten Formel (16) ist „s“ die Spannungszunahme in  $\text{MPa/s}$ , „d<sub>1</sub>“ und „d<sub>2</sub>“ sind die Seitenmaße des Probekörpers in mm und „l“ der Abstand zwischen den unteren Rollen in mm. Gibt man die Parameter in die Formel ein, so erhält man eine gerundete Belastungsgeschwindigkeit von  $65 \text{ N/s}$ .

$$66,67 = \frac{0,02 \text{ MPa/s} \cdot 100 \text{ mm} \cdot 10.000 \text{ mm}^2}{300 \text{ mm}} \quad [\text{N/s}] \quad (15)$$

Tabelle 37 gibt eine Übersicht über die verwendeten Prüfparameter.

Tabelle 37: Kenngrößen Biegezugfestigkeit.

Kenngröße	Einheit	Wert
Belastungsgeschwindigkeit R	N/s	65
Ausgangsbelastung	$\text{N/mm}^2$	0,1
Erwartete Bruchlast $f_c$	$\text{MPa}$ oder $\text{N/mm}^2$	0,52
Spannungszunahme s	$\text{MPa/s}$	0,02
Abstand zwischen den unteren Rollen l	mm	30

Quelle: eigene Anfertigung 2022

<sup>121</sup> Vgl. Lehm Ton Erde 2023.

<sup>122</sup> DIN EN 12390-5, S. 7.

<sup>123</sup> DIN EN 12390-5, S. 7.

<sup>124</sup> Vgl. DIN EN 12390-5, S. 7.

### Untersuchungsreihe 1 – LG70K30W5T3

Für die Untersuchung der Biegezugfestigkeit wurden drei Probekörper mit dem Mischverhältnis der Tragschicht (LG70K30W5T3) hergestellt und untersucht. Einer der drei Probekörper wird dabei mit zwei Flachsgittern, zur Erhöhung der Biegezugfestigkeit, versehen. Auch hier wurde darauf geachtet, dass das Flachsgewebe mit einer Lehmdeckung von ca. 20 mm im Probekörper liegt. Dadurch entsteht ein innerer Hebelarm von etwa 60 mm. Insgesamt wird durch die Beigabe von 30 % Kork ein elastischeres Materialverhalten als bei reinem Stampflehm erwartet. Wie sich dieses im Einzelfall äußert, soll im Zuge dieser Untersuchungsreihe erforscht werden.

Abbildung 83: Probekörper kurz nach dem Ausschalen.

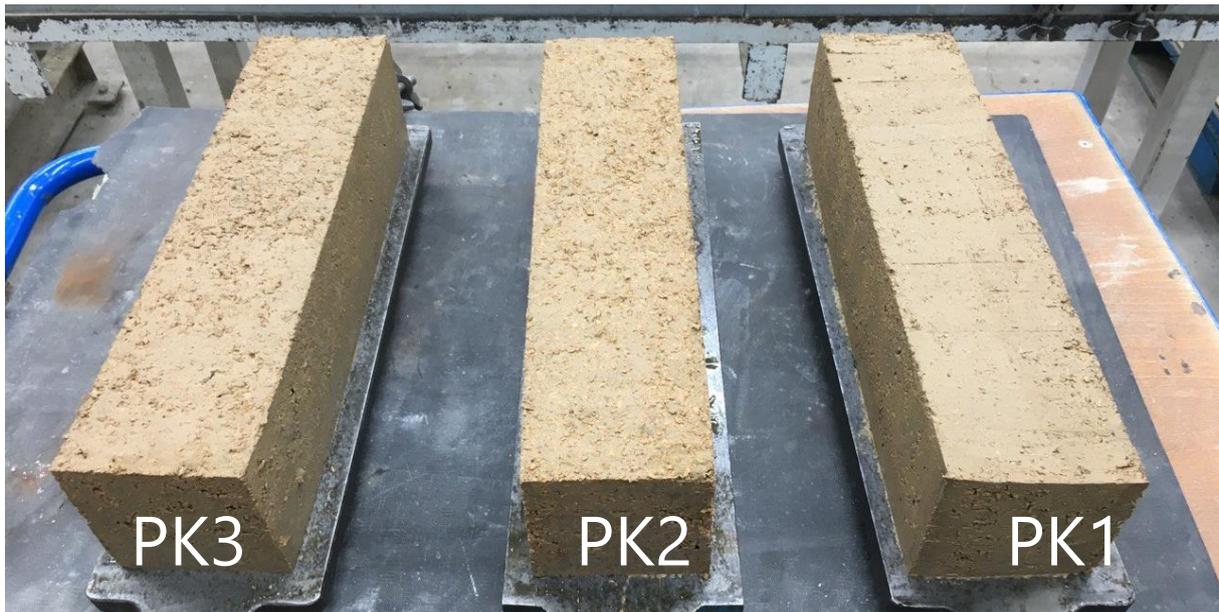


Foto: Plattner 2022

Die Mischung für den ersten Probekörper geriet etwas zu feucht (vgl. Abbildung 83), weshalb sie beim Einstampfen in die Schalung etwas wich und stark am Stampfer haftete. Auch das Schwindmaß dieses Probekörpers war deutlich höher als bei den anderen beiden Probekörpern. Der Probekörper „PK1“ ist daher als Vorversuch zu bewerten, anhand dessen die gewählten Randbedingungen (vgl. Tabelle 37) validiert werden können.

Tabelle 38: Übersicht Probekörper Biegezug.

Nr.	Gemisch	Probekörper [mm]	Trocknungszeit	Mischung	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
PK1	LG70K30W5T3	400 x 100 x 100	3 Wochen	Zu feucht	1.831
PK2	LG70K30W5T3			Homogen,	1.721
PK3	LG70K30W5ST3			gut verarbeitbar,	1.746
<b>Ø</b>	<b>LG70K30W5T3</b>			kein Weichen, gute Bindekraft	<b>1.766</b>

Quelle: eigene Anfertigung 2022

Nach einer Trocknungsdauer von 3 Wochen wurden auch diese Probekörper hinsichtlich ihrer Druckfestigkeit geprüft. Die Prüfungen fanden mit einer Druck- und Biegezugprüfmaschine EDBu 400 (4000kN) mit einer Prüfgeschwindigkeit von 65 N/s statt (vgl. Tabelle 37, S. 125). Die Prüfung ergab erneut eine maximale Biegezugfestigkeit von 0,81 N/mm<sup>2</sup>. Die maximale Höchstkraft beim Bruch lag bei knapp 2.296 N. Damit lagen die Ergebnisse deutlich über der erwarteten Bruchlast von 0,5 N/mm<sup>2</sup>. Gegebenenfalls lässt sich diese Erhöhung auf die größere Elastizität des Lehm-Kork-Gemischs im Vergleich zu reinem Stampflehm zurückführen. Gleichzeitig fällt auf, dass der zu feucht angemischt PK1 die beste Druckfestigkeit erzielte, während der zusätzlich stabilisierte PK3 kaum eine Verbesserung der Biegezugfestigkeit gegenüber PK2 aufwies.

Tabelle 39: Ergebnisse Druckfestigkeitsprüfung Untersuchungsreihe 2 - 30 % Korkanteil.

Nr.	Gemisch	Prüffläche [mm]	Prüfdatum	Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Höchstkraft bei Bruch [N]
PK1	LG70K30W5T3	99,6 x 91,5	21.04.2022	0,81	2.247
PK2	LG70K30W5T3	100,2 x 98,3	21.04.2022	0,70	2.255
PK3	LG70K30W5ST3	98,6 x 98,9	21.04.2022	0,72	2.296
<b>Ø</b>	<b>LG70K30W5T3</b>	-	-	<b>0,74</b>	<b>2.266</b>

Quelle: eigene Anfertigung 2022

Bei der Analyse des Bruchs spielen Faktoren wie die spezifische Verdichtungsqualität und die Verteilung des Größtkorns eine bedeutende Rolle. Wenn sich das Größtkorn ungünstig in der Mitte des Probekörpers befindet, kann es sein, dass das Gestein nach der Verdichtung nicht ausreichend vom Werkstoff ummantelt wird und somit kein ausreichender Verbund entsteht. Dies kann dazu führen, dass der Probekörper an dieser Stelle versagt. Ähnlich könnte es sich bei PK3 verhalten haben, was die im Vergleich zu PK2 geringe Biegezugfestigkeit erklären würde. Abbildung 84 zeigt den bewehrten Probekörper Nummer drei vor der Belastung.

Abbildung 84: PK3 vor der Belastung.



Foto: Daube 2022

Abbildung 85 zeigt den Probekörper nach der Belastung. Bei der Biegezugprüfung des stabilisierten PK3 konnte beobachtet werden, dass die unsere Lage des integrierten Geogitters mit zunehmender Durchbiegung allmählich aus dem Werkstoff gezogen wurde. Am oberen Rand des Probekörpers entstanden Abplatzungen durch die dort auftretenden Druckbelastungen. Obwohl die Flachsfaser auch nach dem Bruch des Probekörpers nicht riss, konnte nicht bestätigt werden, dass sie einen ausreichenden Verbund mit dem Werkstoff herstellte.

Abbildung 85: PK3 nach der Belastung.



Foto: Daube 2022

**Zusammenfassung Untersuchungsreihe 1**

Die Untersuchungsreihe hat gezeigt, dass das gewählte Lehm-Kork-Gemisch, im Vergleich zu reinem Stampflehm, sehr gute Biegezugfestigkeiten aufweist (Durchschnittlich  $0,74\text{N/mm}^2$ ). Gleichzeitig konnte eine Steigerung der Biegezugfestigkeit, durch das Einlegen eines Flachs-Gewebes, nicht bestätigt werden. Weitere Analysen sollen daher untersuchen, ob ein anderes Material eine Steigerung der Biegezugfestigkeit verursachen kann. Grundsätzlich lässt sich die verwendete Mischung LG70K30W5T3 weiterhin als geeignetes Material für die Lehmtafelbauweise einstufen.

## Numerische Herleitung innerer Kräfte von Verbundquerschnitten aus Stahlbeton

Die Annahme der Affinität weiterverfolgend (vgl. Kapitel „Stand der Forschung ab Seite 122“) soll an dieser Stelle zunächst überprüft werden, ob sich die Eignung verschiedener Materialien als Bewehrung biegebeanspruchter Lehmkörper anhand der Berechnung der inneren Kräfte von Stahlbetonquerschnitten voraussagen lässt. Untersucht wird das Vorgehen zur Berechnung der inneren Kräfte von Stahlbetonquerschnitten mit ideellen Querschnittswerten. Im Falle guter Übereinstimmungen der Ergebnisse, können im Vorfeld von zukünftigen Versuchen bereits geeignete Materialien von ungeeigneten abgegrenzt werden. Zu diesem Zweck wird im Folgenden zunächst die Berechnung von Stahlbetonquerschnitten mit ideellen Querschnittswerten, wie sie an der Bauhaus-Universität Weimar gelehrt wird erläutert.

Voraussetzung für die Funktionalität von Verbundquerschnitten ist die Einhaltung des Verbundgesetzes. Dieses besagt, dass die Dehnungen im Beton und im Stahl im ungerissenen Zustand gleich groß sind. Durch die annähernd gleichgroßen Wärmeausdehnungskoeffizienten von  $\alpha_T = 10^{-5} \left[ \frac{1}{K} \right]$  werden Eigenspannungen aufgrund von Temperaturänderungen vernachlässigbar klein. Anderenfalls würde der Verbund durch große Relativverschiebungen zwischen Beton und Bewehrungsmaterial schnell zerstört werden.

$$\epsilon_c = \epsilon_s \text{ (starrer Verbund)} \quad (16)$$

Die hier beschriebenen ideellen Querschnittswerte dienen der Vereinfachung der Berechnungen. Der Querschnitt der Bewehrung wird rechnerisch überführt in einen Betonquerschnitt mit denselben Eigenschaften. Dies geschieht über das Verhältnis der Elastizitätsmodule E:

$$\alpha_s = \frac{E_c}{E_s} \quad (17)$$

Soll ein Betonquerschnitt dieselben Eigenschaften aufweisen, wie der Bewehrungsstahl  $A_s$ , muss dieser über eine größere Fläche verfügen. Folglich ist der ideelle Querschnitt  $A_i$  größer als der eigentliche Vollquerschnitt  $A_0$ .

$$A_i = A_0 + (\alpha_s - 1) * A_s \quad [mm^2] \quad (18)$$

Da der Ersatzbetonquerschnitt eine größere Fläche als sein Pendant aus Bewehrungsstahl besitzt, verschiebt sich auch der Schwerpunkt  $z_i$  (Abbildung 86).

$$z_i = \frac{A_0 * z_0 + (\alpha_s - 1) * A_s * z_s}{A_i} = z_{i,oben} \quad [mm] \quad (19)$$

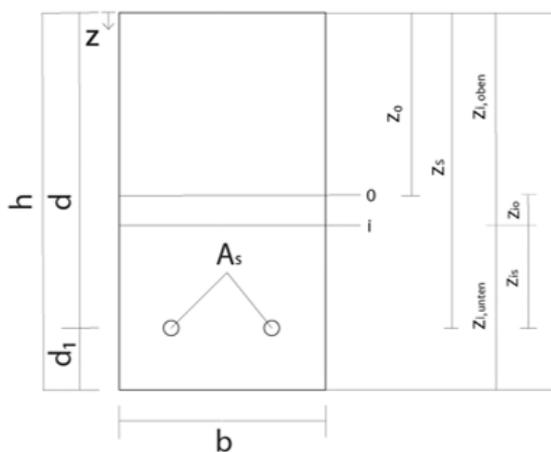
Mit dem Schwerpunkt des Vollquerschnitts:

$$z_0 = \frac{h}{2} \quad [mm] \quad (20)$$

und dem Schwerpunkt der Bewehrung:

$$z_s = \frac{h}{2} - d_1 \quad [mm] \quad (21)$$

Abbildung 86: Schwerpunktlagen des Vollquerschnitts und des ideellen Querschnitts, sowie deren innere Hebelarme.



$$z_{i,unten} = h - z_{i,oben} [mm]$$

$$z_{i0} = z_i - z_0 [mm]$$

$$z_{is} = z_{i,unten} - d_1 [mm]$$

$$d_1 = \text{Schwerpunktlage der Bewehrung} [mm]$$

$$d = \text{statische Nutzhöhe} [mm]$$

Quelle: eigene Darstellung 2022

Durch die veränderte Lage des Schwerpunktes  $z_i$  ergibt sich das ideale Flächenträgheitsmoment  $I_i$  zu:

$$I_i = I_0 + A_0 * (z_{i0})^2 + (\alpha_s - 1) * (I_s + A_s * z_{is}^2) \quad [mm^4] \quad (22)$$

Mit dem Flächenträgheitsmoment des Vollquerschnitts:

$$I_0 = \frac{b * h^3}{12} \quad [mm^4] \quad (23)$$

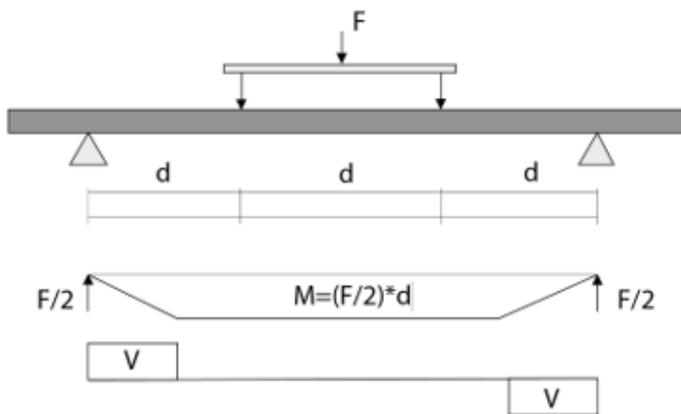
Und dem Flächenträgheitsmoment der Bewehrung:

$$I_s = \frac{\pi * \varnothing^4}{64} \quad [mm^4] \quad (24)$$

Wird ein rechteckiger Balkenquerschnitt im 2-Punkt-Lastangriff nach DIN EN 12390-5– Prüfung von Festbeton<sup>125</sup> wie in Abbildung 87 dargestellt belastet, wirkt auf den Querschnitt ein Moment  $M$  der Größe:

$$M = \frac{F}{2} * d \quad [Nmm] \quad (25)$$

Abbildung 87: statisches System, 2-Punkt-Lastangriff



Quelle: eigene Darstellung 2022

Daraus resultieren die in Abbildung 88 dargestellten Spannungs- und Dehnungsverläufe über die Querschnittshöhe. Aufgrund des Verbundgesetzes [Formel (16)] sind die Dehnungen des Betons auf Höhe der Bewehrung ebenso groß wie die der Bewehrung selbst. Das Moment zum Zeitpunkt der Rissbildung  $M_{Riss}$  ergibt sich zu:

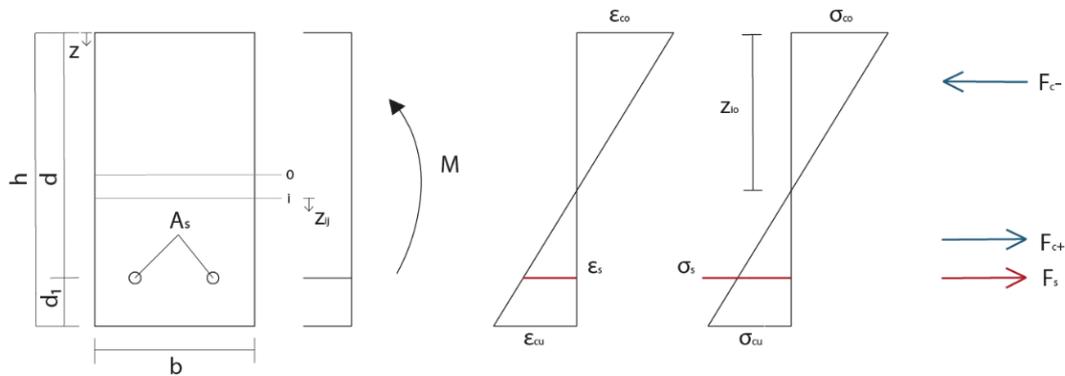
$$M_{Riss} = f_{ct} * \frac{I_i}{z_{iu}} \quad [Nmm] \quad (26)$$

mit

$$f_{ct} = \text{Biegezugfestigkeit des Betons} \quad \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$$

<sup>125</sup> Vgl. DIN EN 12390-5.

Abbildung 88: Spannungs- und Dehnungsverteilung im Querschnitt vor der Rissbildung.



Quelle: eigene Darstellung 2022

Mit Kenntnis der ideellen Querschnittswerte, der Biegezugfestigkeit  $f_{ct}$  und des Momentes zum Zeitpunkt der Rissbildung  $M_{Riss}$  lassen sich nun die im inneren des Querschnitts wirkenden Kräfte  $F_c^-$  in der Betondruckzone,  $F_c^+$  in der Betonzugzone und  $F_s$  im Bewehrungsstahl sowie die Spannungen und Dehnungen berechnen. Von Interesse sind hierbei die Spannungen an der obersten  $\sigma_{co}$  und untersten  $\sigma_{cu}$  Faser des Querschnitts und auf Höhe der Bewehrungslage:

$$\sigma_{co} = \frac{M_{Riss}}{I_i} * |z_{io}| \quad \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \quad (27)$$

$$\sigma_{cu} = f_{ct} = \frac{M_{Riss}}{I_i} * z_{iu} \quad \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \quad (28)$$

(Da der Zeitpunkt der Erstrissbildung betrachtet wird, sind die Spannungen an der untersten Faser des Querschnitts und die Biegezugfestigkeit identisch)

$$\sigma_s = \alpha_s * \sigma_{c(s)} = \alpha_s * \frac{M_{Riss}}{I_i} * z_{is} \quad \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \quad (29)$$

mit

$$\sigma_{c(s)} = \sigma_{cu} * \frac{z_{is}}{z_{iu}} \quad \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \quad (30)$$

(Betonspannungen auf Höhe der Bewehrung)

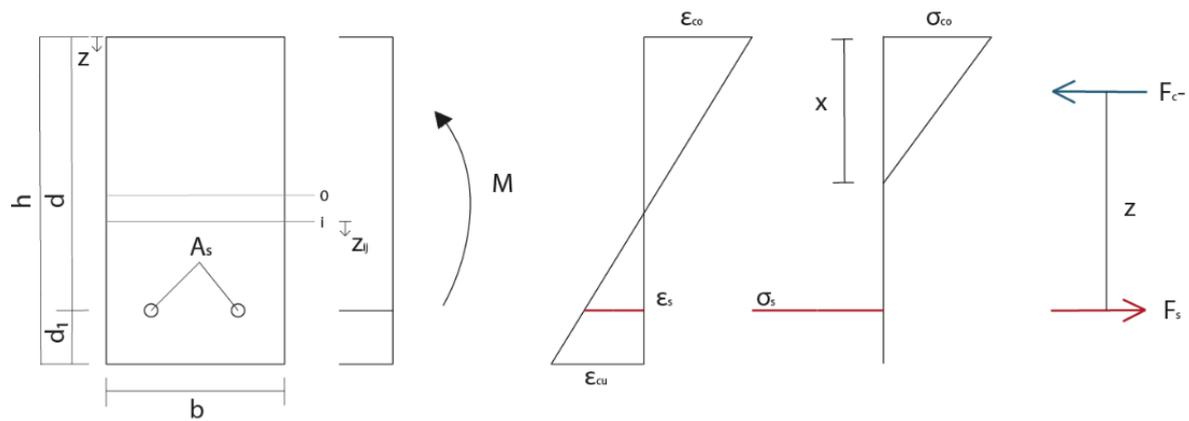
$$F_c^- = |\sigma_{co}| * b * \frac{z_{io}}{2} = F_c^+ + F_s \quad [N] \quad (31)$$

$$F_c^+ = \sigma_{cu} * b * \frac{z_{iu}}{2} - \sigma_{c(s)} * A_s \quad [N] \quad (32)$$

$$F_s = \sigma_s * A_s \quad [N] \quad (33)$$

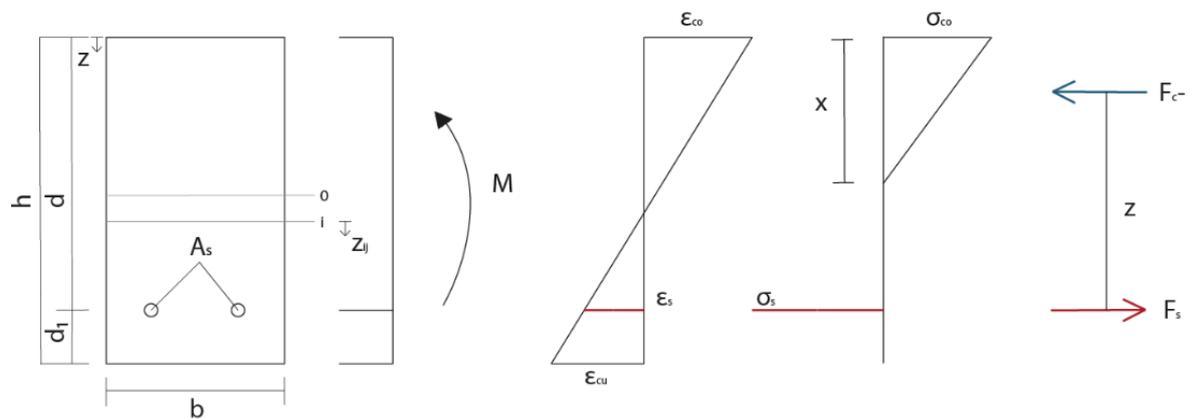
Nachdem der Beton in der Zugzone gerissen ist, hat er in diesem Bereich keine Tragwirkung mehr. Der Querschnitt befindet sich nun im Zustand II. Die Zugspannungen werden allein von der Bewehrung aufgenommen, der Beton wird nur noch innerhalb der Druckzone  $x$  belastet. Die inneren Kräfte reduzieren sich auf die Betondruckkraft  $F_c^-$  und die Stahlzugkraft  $F_s$  mit dem Hebelarm  $z$  (Abbildung 89).

Abbildung 89: Spannungs- und Dehnungsverteilung im Querschnitt nach der Rissbildung



Quelle: eigene Darstellung 2022

Abbildung 89: Spannungs- und Dehnungsverteilung im Querschnitt nach der Rissbildung



Quelle: eigene Darstellung 2022

Zur Berechnung der nun herrschenden inneren Kräfte werden der mechanische Bewehrungsgrad  $\rho$ , die bezogene Höhe der Betondruckzone  $\xi$ , die Höhe der Betondruckzone  $x$  sowie der Hebelarm der inneren Kräfte  $z$  benötigt.

$$\rho = \frac{A_s}{b * d} \quad [-] \quad (34)$$

$$\xi = -\alpha_s * \rho + \sqrt{(\alpha_s * \rho)^2 + 2 * \alpha_s * \rho} \quad [-] \quad (35)$$

$$x = \xi * d \quad [mm] \quad (36)$$

$$z = d - \frac{x}{3} \quad [mm] \quad (37)$$

Aus den Gleichgewichtsbedingungen

$$|\sigma_{co}| * b * \frac{x}{2} = \sigma_s * A_s \quad (38)$$

$$|\varepsilon_{co}| * E_c * b * \frac{x}{2} = \varepsilon_s * E_s * A_s \quad (39)$$

und dem Kräfte- und Momentengleichgewicht

$$F_c = F_s \quad (40)$$

$$M = F_c * z \quad (41)$$

ergeben sich die Betonspannungen an der Randfaser  $|\sigma_{co}|$ , die Stahlspannungen  $\sigma_s$ , die inneren Kräfte  $F_c$  und  $F_s$  die einwirkende Kraft  $F_{ct}$  zu:

$$|\sigma_{co}| = \frac{2 * M_{Riss}}{b * d^2 * \left(\xi - \frac{\xi^2}{3}\right)} \quad \left[\frac{N}{mm^2}\right] \quad (42)$$

$$\sigma_s = \frac{M_{Riss}}{z * A_s} \quad \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \quad (43)$$

$$F_c^- = |\sigma_{co}| * b * \frac{x}{2} \quad [N] \quad (44)$$

$$F_s = \sigma_s * A_s \quad [N] \quad (45)$$

$$F = \frac{2 * M_{Riss}}{l_1} \quad [N] \quad (46)$$

## Auswertung

Der oben beschriebene Formelapparat wurde in ein Excel-Tool implementiert. Auf diese Weise lassen sich die immer gleichen Berechnungen schnell auf unterschiedliche Querschnitte und Bewehrungsmaterialien anpassen. Es müssen lediglich die Material- und Geometrieparameter angepasst werden, die restlichen Rechenschritte laufen automatisiert ab. Lässt sich die Berechnung in weiteren Versuchen verifizieren, ist es möglich die aufwendige Herstellung von Probekörpern in gewissem Maß zu reduzieren. Die vorherige Berechnung kann ungeeignete Bewehrungsmaterialien schon im Vorfeld der Untersuchung ausschließen. Weiterhin wäre damit ein weiterer Schritt in Richtung eines normierten Bemessungskonzeptes für Lehmbauteile getan.

Tabelle 40: Ergebnisse der im Labor ermittelten Bruchkraft in [kN] und der Biegezugfestigkeit in [N/mm<sup>2</sup>].

	Maße [mm]			Bruchkraft [kN]	Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
	L	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>		
ohne Bewehrung	397,6	100,2	98,3	2,255	0,699
mit Bewehrung	398,1	98,6	98,9	2,296	0,715

Quelle: eigene Darstellung 2022

Es wurden verschiedene Wege zur Berechnung der inneren Kräfte, die im Stampflehmprobekörper und insbesondere auf die Bewehrung wirken durchgeführt. Die Ergebnisse weichen nur geringfügig voneinander ab. Es ist jedoch zu beachten, dass die Biegezugfestigkeit, die im Labor ermittelt wurde als Eingangswert für die anderen Berechnungen verwendet wurde. Anderenfalls hätte die Biegezugfestigkeit mittels der gemessenen Risslast und dem daraus errechneten Rissmoment bestimmt werden können. Die Berechnungen des Vollquerschnitts und mit ideellen Querschnittswerten stehen in jedem Fall immer im Bezug zu den Laborergebnissen. Die im Laborversuch ermittelten Biegezugfestigkeiten sind in Tabelle

40 mit den Abmessungen des zugehörigen Probekörpers und der gemessenen Bruchlast zusammengestellt. Die Berechnungen wurden mit der am bewehrten Probekörper ermittelten Biegezugfestigkeit durchgeführt, da beide annähernd gleich sind. Die Ergebnisse der unterschiedlichen Berechnungsmethoden für die Biegezugfestigkeit, das Rissmoment, die Risslast und die Spannung innerhalb der Bewehrung sind in Tabelle 41 zusammengefasst.

Tabelle 41: Vergleich der Berechnungen mit ideellen Querschnittswerten, Querschnittswerten des Vollquerschnitts und den Ergebnissen der Laboruntersuchung.

Berechnung mit ideellen Querschnittswerten	Berechnung mit Querschnittswerten des Vollquerschnitts	Berechnungen nach (DIN EN 12390-5)
$f_{ct} = \sigma_{cu} = \frac{M_{Riss}}{I_i} * z_{iu}$	$f_{ct} = \sigma_{cu} = \frac{M_{Riss}}{I_{i0}} * z_0$	$f_{ct} = \frac{F_{ct} * L}{d_1 * d_2^2}$
0,715 N/mm <sup>2</sup>	0,714 N/mm <sup>2</sup>	0,715 N/mm <sup>2</sup>
$M_{Riss} = f_{ct} * \frac{I_i}{z_{iu}}$	$M_{Riss} = f_{ct} * \frac{I_0}{z_0}$	$M_{Riss} = \frac{F_{ct}}{2} * l_1$
116115,58 Nmm	114927,59 Nmm	114800 Nmm
$F_{ct} = \frac{2 * M_{Riss}}{l_1}$	$F_{ct} = \frac{2 * M_{Riss}}{l_1}$	<i>gemessen</i>
2322 N	2296 N	2296 N
$\sigma_s = \frac{M_{Riss}}{z * A_s}$	$\sigma_s = \frac{M_{Riss}}{0,9 * d * A_s}$ <sup>1)</sup>	
<b>72,67 N/mm<sup>2</sup></b>	<b>76,23 N/mm<sup>2</sup></b>	

<sup>1)</sup> **0,9\*d = geschätzter Hebelarm der inneren Kräfte (z)**

Quelle: eigene Darstellung 2022

Im Probekörper verlaufen drei Schnüre der Bewehrung in Belastungsrichtung. Bei einem Durchmesser von etwa 3,00 mm pro Schnur ergibt sich eine Bewehrungsfläche von 21,21 mm<sup>2</sup>. Mit der Bewehrungsfläche, der berechneten Spannung in der Bewehrung nach der Rissbildung und der Zugfestigkeit der Flachfasern

(Tabelle 42) ergibt sich:

$$\sigma_{max} = 118,89 \frac{N}{mm^2} > \sigma_{vorh.} = 72,67 \frac{N}{mm^2} \quad (47)$$

$$\sigma_{max} * A_{Flachs} = F_{max} = 118,89 \frac{N}{mm^2} * 21,21 mm^2 = 2521,66 N \quad (48)$$

$$F_{vorh.} = 1541,07 N \quad (49)$$

$$F_{max} = 2521,66 N > F_{vorh.} = 1541,07 N \quad (50)$$

Tabelle 42: Ergebnisse aus dem Zugversuch der Flachsfasern.

	Laboruntersuchung	Berechnung
max. Zugkraft [N]	584	1541,07
max. Zugspannung [N/mm <sup>2</sup> ]	118,89	72,67

Quelle: eigene Darstellung 2022

Rechnerisch bringt die Flachsbewehrung dem Stampflehmprobekörper demnach einen Mehrwert. Eine Laststeigerung von 65 % bis zum Versagen der Bewehrung scheint möglich. Dies konnte im Versuch jedoch nicht bestätigt werden.

Eine Laststeigerung bis zum endgültigen Versagen des Probekörpers zeigt, dass entweder der Verbund zwischen der Lehm-Kork-Mischung und den Flachsfasern unzureichend ist oder die Schnüre mit einem Durchhang eingestampft wurden. Auch eine Endverankerung der Bewehrung, wie im Stahlbetonbau üblich, liegt hier nicht vor, wie in Abbildung 92 schematisch dargestellt. Möglicherweise zeigt sich auch ein Zusammenspiel aus mehreren Faktoren. Es ist deutlich zu erkennen, wie sich die Flachsschnüre aus der Probe herausziehen. Die Schnüre scheinen auf ganzer Länge unversehrt, damit lässt sich ausschließen, dass sie sich durch Dehnung verlängert haben (Abbildung 90). Um das zu überprüfen wurde der Probekörper nach Abschluss des Belastungsversuchs aufgesägt und die Bewehrung vorsichtig freigelegt, siehe Abbildung 91.

Abbildung 90: Seitenansicht der Lehmprobe nach dem Versuch; rechts: Ansicht derselben Probe von unten.



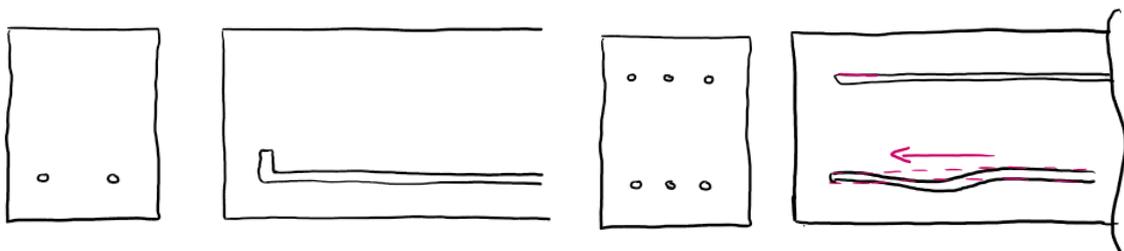
Foto: Daube 2022

Abbildung 91: Blick in Innere eines Prüfkörpers nach erfolgter Belastung.



Foto: Daube 2022

Abbildung 92: links: Schematische Darstellung der Endverankerung eines Bewehrungsstabes; rechts: Schematische Darstellung eines Durchhanges im Geogitter.



Quelle: eigene Darstellung 2022

## Rezyklierbarkeit

Ein wesentliches Ziel der Forschung ist die Entwicklung eines kompromisslos nachhaltigen Baustoffs. Aus diesem Grund soll bereits zu einem sehr frühen Forschungszeitpunkt eine problemlose Rezyklierbarkeit sichergestellt werden.

Im Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (KrWG), wurde eine Abfallhierarchie als Grundsatz für den Umgang mit Abfällen verankert.<sup>126</sup> Dieses 2012 in Kraft getretene Kreislaufwirtschaftsgesetz sieht neben der Vermeidung von Abfall im Allgemeinen, die Wiederverwendung und das Recycling von Abfällen als wichtiges Instrument.<sup>127</sup> Eine energetische Verwertung oder die Beseitigung von abfallenden Abfällen sind dabei in der Hierarchie ganz unten angeordnet.<sup>128</sup> Ziel des Gesetzes ist der verantwortungsvolle und nachhaltige Umgang mit Abfällen, wobei Recycling ein bedeutendes Werkzeug ist.

*„Recycling im Sinne dieses Gesetzes ist jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden; es schließt die Aufbereitung organischer Materialien ein, nicht aber die energetische Verwertung und die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind.“<sup>129</sup>*

Wird Lehm rezykliert entsteht Recyclinglehm, welcher in den Lehmbau Regeln als ein „aus Abbruchbauteilen wiederverwendeter, trocken zerkleinerter Lehmbaustoff“<sup>130</sup> definiert ist.

Grundsätzlich lässt sich Recycling in zwei Abstufungen, echtes Recycling (Wieder- und Weiterverwertung, Wiederverwertung) und Downcycling (Weiterverwertung), unterteilen.<sup>131</sup>

Die Wiederverwendung stellt eine bevorzugte Methode des Recyclings dar, da das Material für denselben Zweck erneut genutzt wird und seine ursprüngliche Form und Qualität beibehält.<sup>132</sup> In Bezug auf die Lehmtafelbauweise würde dies bedeuten, eine Lehmtafel an Ort 1 auszubauen und anschließend an Ort 2 wieder einzubauen.

Im Gegensatz dazu wird bei der Weiterverwertung das recycelte Material für einen anderen Zweck eingesetzt, was ebenfalls eine nachhaltige Nutzung darstellt, jedoch mit einem gewissen Verlust an Materialqualität verbunden sein kann.<sup>133</sup> In Bezug auf die Lehmtafelbauweise könnte dies bedeuten, dass eine Lehmtafel, nach Ende des Lebenszyklus, aus einem Gebäude ausgebaut wird und anschließend in leicht abgewandeltem Zustand, beispielsweise als Kamin, Weiterverwendung findet.

Wiederverwertung beschreibt das erneute Durchlaufen desselben Produktionsprozesses, den das Material bereits vor seiner letzten Verwendung durchlaufen hat, um es in denselben Zustand wie bei seiner Erstverwendung zurückzuführen.<sup>134</sup> Dafür müsste eine Lehmtafel, beispielsweise durch die Zugabe

---

<sup>126</sup> Vgl. Bundesministerium der Justiz; Bundesamt für Justiz 24.02.2012.

<sup>127</sup> Vgl. Bundesministerium der Justiz; Bundesamt für Justiz 24.02.2012.

<sup>128</sup> Vgl. Bundesministerium der Justiz; Bundesamt für Justiz 24.02.2012.

<sup>129</sup> Bundesministerium der Justiz; Bundesamt für Justiz 24.02.2012, §3 (25).

<sup>130</sup> Volhard und Röhlen 2009, S. 5.

<sup>131</sup> Vgl. Schroeder 2019, S. 558.

<sup>132</sup> Vgl. Schroeder 2019, S. 558.

<sup>133</sup> Vgl. Schroeder 2019, S. 559.

<sup>134</sup> Vgl. Schroeder 2019, S. 559.

von Wasser, wieder Formbar gemacht werden und anschließend das Erdfeuchte Gemisch erneut zu einer Lehmtafel gestampft werden.

Im Unterschied dazu führt die Weiterverwertung, die dem Downcycling zugeordnet ist, zu einem sekundären Material mit unterschiedlichen Eigenschaften, das für andere Zwecke genutzt werden kann, jedoch in der Regel einen niedrigeren Wert aufweist als das ursprüngliche Material.<sup>135</sup> In diesem Szenario könnte die Lehmtafel aufgelöst werden und anschließend als Füllstoff in einem anderen Bauprodukt genutzt werden.

Aus ökologischer Sicht stellt die Wiederverwendung daher die bevorzugte Methode des Recyclings dar, gefolgt von der Weiterverwertung und der Wiederverwertung, während die Downcycling-Option als am wenigsten erstrebenswert angesehen wird.

## Rezyklierbarkeit von Lehm

Die Rezyklierbarkeit von abzubrechendem Lehm variiert in ihrer Ausprägung. Dabei können unterschiedliche Faktoren die Eigenschaften beeinflussen und gegebenenfalls die Verwendung als Recyclinglehm erschweren oder verhindern. Dazu zählen sowohl die Umweltverträglichkeit des ursprünglich verbauten Lehms als auch die Bauweise des abzubrechenden Gebäudes sowie die angewandte Rückbaumethode.

### Herausforderungen

Die Rezyklierbarkeit von Lehm kann durch das Vorhandensein von bestimmten Stoffen erheblich beeinträchtigt werden, und eine umweltverträgliche Entsorgung ist unter Umständen nicht möglich. Im Verlauf der Nutzung können sich im Lehm Salze, Schadstoffe, Pilz- und Hausschwammsporen sowie Gerüche oder Keime ansammeln, die das Recycling oder die Deponierung erheblich erschweren.<sup>136</sup>

So können sich beispielsweise Salze (bspw. Sulfate, Chloride oder Nitrate) bereits während der Gebäudenutzungsphase in den Bauteilen ablagern und so die Bindekraft des Lehms und die Qualität des Recyclinglehms stark negativ beeinflussen.<sup>137</sup>

Zusätzlich können Schadstoffbelastungen aus der Luft in den Lehm übergehen. Dabei sollte sowohl die Exposition als auch die Toxizität der aufgenommenen Stoffe betrachtet werden. Neben Schwermetallen und Pestiziden können auch Adsorbable Organic Halogen Compounds (AOX) das Bauteil belasten.<sup>138</sup> Aber auch Total Volatile Organic Compounds (TVOC) können einen Lehmstoff stark belasten. TVOCs sind flüchtige organische Verbindungen, welche beispielsweise aus Reinigungsmitteln, Farben, Lacken, Klebern oder Massivholzmöbeln ausdünsten können und sich anschließend in Lehmprodukten absetzen können. Die Organisation natureplus e.V. (2021) hat eine Richtlinie über Emissionsarme Bauprodukte<sup>139</sup> veröffentlicht, worin Grenzwerte für sogenannte Total Volatile Organic Compounds (TVOC) definiert sind. Rezyklierter Lehm sollte die in der Richtlinie 5010 formulierten Grenzwerte nicht übersteigen.

---

<sup>135</sup> Vgl. Schroeder 2019, S. 559.

<sup>136</sup> Vgl. Schroeder 2019, S. 551.

<sup>137</sup> Vgl. Schroeder 2019, S. 79.

<sup>138</sup> Vgl. Schroeder 2019, S. 552.

<sup>139</sup> Vgl. Köhler 2021.

Auch Pilz- und Hausschwammsporen können einen Einfluss auf die Rezyklierbarkeit haben. Während Schimmelpilzsporen kein Hindernis beim Recycling darstellen – nach vollständiger Trocknung des Lehms haben diese keine Überlebensgrundlage mehr und sterben ab<sup>140</sup> – ist eine Kontamination mit Hausschwammsporen ein Ausschlusskriterium für Lehmrecycling. Die Sporen können über mehrere Jahre im Recycling-Baustoff überleben und schlussendlich die Tragfähigkeit drastisch mindern.<sup>141</sup>

Die Organisation natureplus e.V. (2015) bietet Richtlinien für die Grenzwerte von Inhaltstoffen in Lehmputzmörtel, -anstrichen und -platten an, welche für das Qualitätszeichen relevant sind. Innerhalb dieser Vorgaben sind auch Höchstgrenzen für sogenannte Total Volatile Organic Compounds (TVOC) festgelegt. TVOCs sind flüchtige organische Verbindungen, welche aus Reinigungsmitteln, Farben, Lacken, Klebern oder Massivholzmöbeln in Wohnräumen auftreten können. Aufgrund ihrer niedrigen Siedepunkte lösen sie sich leicht aus den Bauteilen und können bei den Nutzern Kopfschmerzen verursachen (Schroeder, 2019, S. 555).

An dieser Stelle soll auch eine stoffliche Verunreinigung als Herausforderung beim Recycling genannt werden. So stellen Mischwerkstoffe mit Kalk, Gips oder Anstrichen eine wesentliche Hürde beim sortenreinen Auftrennen und somit beim Recycling dar.<sup>142</sup>

Da Verunreinigungen des Lehms sowohl während der Nutzungsphase als auch während des Abbruchs und der anschließenden Lagerung auftreten können, sollten geeignete Maßnahmen ergriffen werden, um dies zu verhindern.

## Recyclingtechniken

Die Wahl der geeigneten Recyclingtechnik nach dem Rückbau hängt maßgeblich von der Zusammensetzung des vorliegenden Lehms ab. Unter der Voraussetzung, dass der Lehm monolithisch (ohne aufgebrachte Dämmschicht) verwendet wurde, keine Zusatzstoffe enthält und frei von Verunreinigungen ist, kann eine direkte Wiederverwendung unter Zugabe von Wasser erfolgen.

Zur Sortierung von Bauschutt stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung, welche anhand der zu trennenden Materialien und enthaltenen Störstoffen ausgewählt werden. Hierbei erfolgt eine Differenzierung anhand physikalischer Eigenschaften, welche eine Trennung der Materialien ermöglichen. Die Verfahren lassen sich grob in Nass- und Trockenaufbereitungen unterteilen.<sup>143</sup>

Die Nassaufbereitung basiert auf der unterschiedlichen Dichte der zu trennenden Materialien und erfordert einen aufwändigen Wasserkreislauf, welche ggf. Auch umwelttechnisch zu bewerten ist.

Die Trockenaufbereitung hingegen nutzt entweder die Dichte oder magnetische, optische oder mechanische Eigenschaften zur Trennung der Materialien.<sup>144</sup> Auch eine selektive Zerkleinerung mit anschließender Klassierung zählt zu den trockenen Sortierverfahren.<sup>145</sup>

Im Zusammenhang mit der Lehmtafelbauweise unter Verwendung von Korkgranulat als Dämmmaterial muss vor einer möglichen Weiterverarbeitung der neue Verwendungszweck des Recycling-Baustoffs ermittelt werden. Sofern das Mischungsverhältnis zwischen Lehm und Korkgranulat gleichbleiben soll (es wird also eine neue Lehm- und Korktafel hergestellt), ist eine Sortierung nicht erforderlich. Andernfalls kann

---

<sup>140</sup> Vgl. Schroeder 2019, S. 556.

<sup>141</sup> Vgl. Schroeder 2019, S. 480.

<sup>142</sup> Vgl. Schroeder 2019, S. 550.

<sup>143</sup> Vgl. Weimann et al. 2013, S. 72.

<sup>144</sup> Vgl. Weimann et al. 2013, 73f.

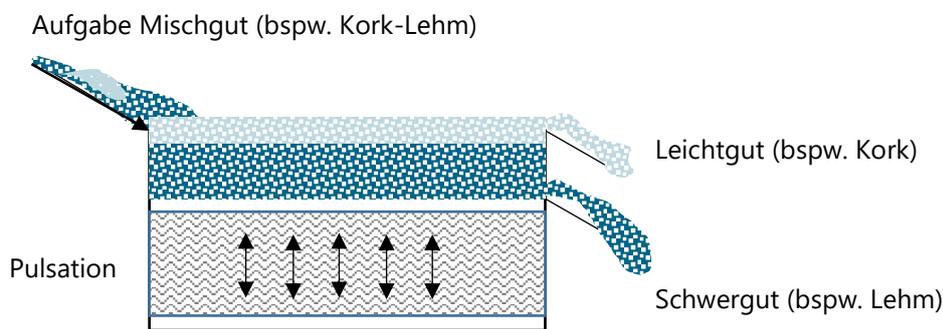
<sup>145</sup> Vgl. Weimann et al. 2013, S. 73.

eine Trennung durch Nassaufbereitungsverfahren erfolgen, bei welchem das Korkgranulat durch seine geringere Dichte aufgeschwemmt werden kann.

### Setzsartierung

Die Setzsartierung ist eine Art der Nassaufbereitung, welche sich die unterschiedlichen Sinkgeschwindigkeiten von Stoffen mit unterschiedlichen Rohdichten zu Nutze macht. Zur Separation von Stoffen wird eine Technik verwendet, bei der ein pulsierender Aufstrom eingesetzt wird.<sup>146</sup> Diese Methode beschleunigt das leichtere Material in Fließrichtung, während das schwerere Material entgegen der Fließrichtung absinkt.<sup>147</sup> Das Material wird somit basierend auf seiner Dichte in Schichten angeordnet und kann anschließend, wie in Abbildung 93 dargestellt, voneinander getrennt werden.

Abbildung 93: Schematische Zeichnung des Setzvorgangs.



Quelle: eigene Anfertigung 2023 in Anlehnung an Müller 2018, S. 116

Für das beschriebene Verfahren müssen bestimmte Dichteunterschiede der zu trennenden Materialien nachgewiesen werden.<sup>148</sup> Der Sortierquotient  $q$  kann wie folgt berechnet werden:<sup>149</sup>

$$q = \frac{p_S - p_{Fl}}{p_L - p_{Fl}} [-] \quad (51)$$

Dabei ist  $p_S$  die Dichte der spezifisch schweren Komponente und  $p_L$  die Dichte der spezifisch leichteren Komponente.  $p_{Fl}$  ist die Dichte des Fluids (hier: Wasser). Die Rohdichte für den Lehm wurde Tabelle 5 (S. 34) entnommen, die Rohdichte für Korkgranulat Tabelle 6 (S. 35).

Eine Trennung von Korngrößen ab etwa 1,5 mm ist unter Zuhilfenahme des Setzverfahrens nur dann erfolgversprechend, wenn der Sortierquotient  $q$  größer als 1,5 ist. Bei einem Sortierquotient kleiner 1,25 ist keine Trennung möglich.<sup>150</sup> Es gilt, dass mit steigendem Quotienten die Trennschärfe zunimmt und auch feineren Körnungen voneinander getrennt werden können.<sup>151</sup>

<sup>146</sup> Vgl. Müller 2018, S. 116.

<sup>147</sup> Vgl. Müller 2018, S. 116.

<sup>148</sup> Vgl. Müller 2018, S. 117.

<sup>149</sup> Vgl. Müller 2018, S. 117.

<sup>150</sup> Vgl. Müller 2018, S. 117.

<sup>151</sup> Vgl. Müller 2018, S. 117.

$$q = - \frac{2,3 \frac{t}{m^3} - 0,997 \frac{t}{m^3}}{0,13 \frac{t}{m^3} - 0,997 \frac{t}{m^3}} = 1,50$$

Der Sortierquotient von Lehm und Kork liegt bei 1,50 und damit genau auf der Schwelle zur Eignung. Grundsätzlich müssen für das Recycling der beschriebenen Kork-Lehm-Mischung Korngrößen von 0 – 16 mm (Stampflehm) bzw. 1 – 2 mm (Kork) voneinander getrennt werden. Die Korngrößen sind bei dem berechneten Quotienten von 1,50 als zu klein einzustufen, wodurch das Verfahren ungeeignet ist.

### **Schwimm-Sink-Sortierung**

Um ein Gemisch mittels Schwimm-Sink-Sortierung zu trennen, welches Partikel mit unterschiedlichen Rohdichten enthält, wird eine Trennflüssigkeit mit einer Dichte zwischen der Dichte des leichteren Gemischs und der des schwereren Gemischs verwendet.<sup>152</sup> In der Bauabfallaufbereitung wird meist Wasser als Trennflüssigkeit eingesetzt,<sup>153</sup> was sich auch bei der Trennung eines Lehm-Kork-Gemischs anbieten würde.

Die Sortierung beruht auf dem Prinzip, dass leichtere Partikel aufschwimmen, während schwerere absinken.<sup>154</sup> Korngröße und -form haben dabei kaum Einfluss auf die Umsetzbarkeit.<sup>155</sup> „Durch die mit dem Aufgabematerial eingetragenen Feinanteile entsteht eine Autogentrübe, die Dichten von 1200 bis 1400 kg/m<sup>3</sup> aufweist“<sup>156</sup>

Die Schwimm-Sink-Sortierung erfolgt mittels Schrägradscheider (vgl. Abbildung 94) oder Leichtstoffabscheider (vgl. Abbildung 95) unterschiedlicher Bauart.<sup>157</sup> Die technische Umsetzung variiert je nach Verfahren, aber das Ziel ist immer, das leichtere Material vom schwereren zu trennen. Dabei entsteht eine Teilentwässerung des Materials, aber es muss kein Wasserkreislauf aufrechterhalten werden und es entstehen keine Brauchwasserreste.<sup>158</sup>

---

<sup>152</sup> Vgl. Müller 2018, S. 111.

<sup>153</sup> Vgl. Müller 2018, S. 111.

<sup>154</sup> Vgl. Müller 2018, S. 111.

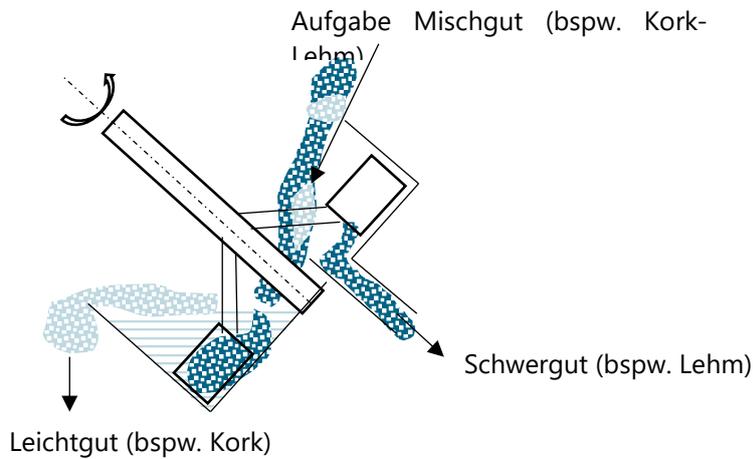
<sup>155</sup> Vgl. Müller 2018, S. 111.

<sup>156</sup> Müller 2018, S. 111.

<sup>157</sup> Vgl. Müller 2018, S. 111.

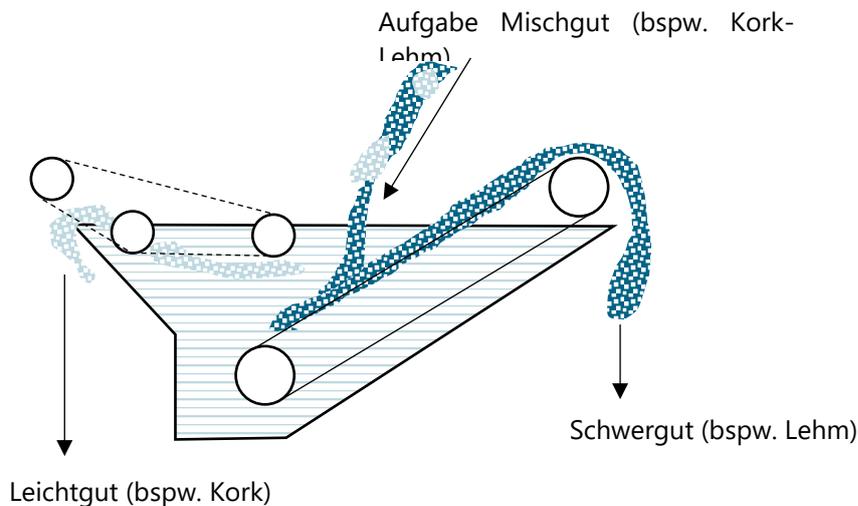
<sup>158</sup> Vgl. Müller 2018, S. 113.

Abbildung 94: Schematische Zeichnung eines Schrägradscheiders.



Quelle: eigene Anfertigung 2023 in Anlehnung an Müller 2018, S. 112

Abbildung 95: Schematische Zeichnung eines Leichtstoffabscheiders.



Quelle: eigene Anfertigung 2023 in Anlehnung an Müller 2018, S. 112

Die Eignung der Schwimm-Sink-Sortierung für ein Lehm-Kork-Gemisch ist fraglich, da die Mischung vor einer möglichen Sortierung eine Einwirkzeit im Wasser benötigt. Während der Einwirkzeit lösen sich die Bindungen und der Kork kann sich herauslösen. Diese Einwirkzeit ist in den Scheidern normalerweise nicht gegeben.

Zudem stellen Tonpartikel im Lehm eine zusätzliche Herausforderung dar, da sie während des Prozesses aufgewirbelt werden und im Wasser schweben, was zu einem Verlust dieser Partikel führt. Das kann sich negativ auf die Stabilität des Recycling-Lehms auswirken.

## Untersuchungsreihe 1

Die durch die Druckfestigkeitsprüfungen zerstörten Probekörper sollen in diesem Schritt für eine Untersuchung der Rezyklierbarkeit genutzt werden. Um eine möglichst große Bandbreite darstellen zu können, wurde zunächst ein Würfel mit 30 % und einer mit 60 % Korkgehalt rezykliert (Würfel mit einer Kantenlänge von 10 cm).

Dafür wurden die Würfel zunächst in ein Wasserbad gelegt (Würfel mit 10 cm Kantenlänge in 5 Liter Wasser). Durch das Einweichen sollen die Tonminerale ihre Bindung lösen, sodass die Würfel ihre Formstabilität verlieren. Mit steigendem Korkanteil setzte dieser Prozess früher ein. Einen wesentlichen Einfluss auf diesen Prozess hat neben dem Kork-Anteil auch die Bauteilstärke. Für Probekörper mit 20 cm Kantenlänge, wird demnach mehr Zeit benötigt, bis das Wasser in den Kern des Würfels eingedrungen ist. Der Einweichprozess ist besonders wichtig und sollte daher gewissenhaft durchgeführt werden. Eine vorzeitige Weiterverarbeitung macht an dieser Stelle wenig Sinn. Nach etwa 10 Minuten waren die Würfel mit 10 cm Kantenlänge gleichmäßig durchfeuchtet. Schon in diesem Schritt begann das Korkgranulat an der Oberfläche zu aufzuschwimmen (vgl. Abbildung 96).

Abbildung 96: Rezyklierprozess Einsumpfen.



Fotos: Schlegel 2021

Im nächsten Schritt wird der Prozess der Trennung von Kork und Lehm mechanisch unterstützt. Durch Umrühren und Stampfen können weitere Korkbrösel aus dem Gemisch gelöst werden. Diese schwimmen ebenfalls an der Oberfläche auf. Erst wenn die Menge an aufgeschwommenen Kork trotz weiterem Rühren und Stampfen konstant bleibt, ist dieser Schritt abgeschlossen.

Nun muss das Gemisch ruhen, sodass sich der Lehm auf dem Boden absetzen kann. Je länger das Gemisch ruhen kann, desto klarer setzt sich der Kork an der Oberfläche und der Lehm auf dem Boden des Behältnisses ab. Zu langes Ruhen (> 24 h) sollte aufgrund der organischen Bestandteile (Kork) unbedingt vermieden werden.

Anschließend kann der aufgeschwommene Kork mit Hilfe eines Siebs abgeschöpft werden. Das Sieb sollte dabei feiner als die minimale Abmessung des Korkgranulats sein (hier kleiner als 1 mm). Damit der Lehm nicht aufgewirbelt wird, kann das Sieb nur langsam und nur an der Oberfläche benutzt werden. Das abgeseibte Granulat sollte in einem weiteren Schritt gewaschen werden, sodass keine Erde mehr anhaftet.

Nach vollständiger Trocknung (vorzugsweise unter mehrfacher Durchmischung), kann das Granulat einfach wiederverwendet werden (vgl. Abbildung 97).

Abbildung 97: Rezykliertes Korkgranulat.



Foto: Schlegel 2021

Der Lehm hingegen ist durch die Zugabe des Wassers stark durchnässt und kann – damit nicht zu viele Tonminerale verloren gehen – nicht einfach abgeschüttet und getrocknet werden. Mit einer Pipette kann das saubere Oberflächenwasser entnommen werden. Zurück bleibt ein stark durchnässter Lehm, welcher in diesem Zustand noch immer nicht verwendet werden kann.

Um den Lehm nutzbar zu machen, könnte dieser auf einen sehr feinen Filter gegossen werden, sodass reines Wasser abfließen kann. Dieses Wasser kann problemlos zum Waschen des Korks verwendet werden. Durch die Optimierung von Prozessen kann der Wasserfußabdruck minimal gehalten werden. Selbst lehmiges Wasser kann beispielsweise problemlos zum Bewässern von Pflanzen genutzt werden, da es der Umwelt nicht schadet.

## Brandschutz

Nach DIN 4102 werden Baustoffe und Bauteile in verschiedene Baustoffklassen und Feuerwiderstandsklassen eingeteilt. Den Baustoffklassen A (nichtbrennbar) und B (brennbare Baustoffe) werden in der DIN 4102-4<sup>159</sup> bereits einige Baustoffe zugewiesen. So sind mineralische Baustoffe wie Sand, Lehm oder Beton in die Baustoffklasse A (nichtbrennbar) einzuordnen.<sup>160</sup> Die Baustoffklasse B unterteilt sich in B1 (schwerentflammbar) wie beispielsweise Gussasphaltestrich<sup>161</sup>, B2 (normalentflammbar) wie zum Beispiel Holz<sup>162</sup> und B3 (leicht entflammbar). Eine Übersicht zu den Baustoffklassen nach DIN 4102-1 findet sich in Tabelle 43. Für Baustoffe oder Baustoffmischungen, die nicht in der DIN 4102-4 klassifiziert werden sind Prüfungen nach DIN 4102-1 durchzuführen.

Tabelle 43: Baustoffklassen nach DIN 4102-1.<sup>163</sup>

Baustoffklasse	Bauaufsichtliche Benennung
<b>A</b>	<b>nichtbrennbare Baustoffe</b>
A1	
A2	
<b>B</b>	<b>brennbare Baustoffe</b>
B1	schwerentflammbare Baustoffe
B2	normalentflammbare Baustoffe
B3	leichtentflammbare Baustoffe

Quelle: eigene Darstellung 2023

Für einige Lehmbaustoffe liegen bereits Untersuchungen vor. So dürfen Lehmbaustoffe mit mineralischen Zuschlagstoffen ohne Anforderungen an die Rohdichte der Baustoffklasse A zugeordnet werden.<sup>164</sup> „Lehmbaugerechte Beimischungen“ pflanzlicher Faserstoffe dürfen nach DIN 18951 bei einer Rohdichte  $\geq 1700 \text{ kg/m}^3$  als nicht brennbar angesehen werden.<sup>165</sup> Die DIN 18951 ist nicht mehr gültig, gilt jedoch weiterhin „[...] bauaufsichtlich als ‘Stand der Technik’ [...]“<sup>166</sup>. Durch Untersuchungen an der MFPA Leipzig können auch Stroh, Holzhackschnitzel und Sägespäne je nach Rohdichte als schwerentflammbar bis nichtbrennbar klassifiziert werden.<sup>167</sup> Eine Zusammenstellung der Klassifizierten Zuschläge für Lehmbaustoffe und der Anforderungen an die Rohdichte des Lehmbaustoffs sind in Tabelle 44 zu finden. Aus der Tabelle geht ebenfalls hervor, dass Kork als Zuschlagstoff noch nicht untersucht wurde.

Für die Einordnung in eine Baustoffklasse sind Prüfungen zum Brandverhalten notwendig.

<sup>159</sup> Vgl. DIN 4102-1.

<sup>160</sup> Vgl. DIN 4102-4, S. 16.

<sup>161</sup> Vgl. DIN 4102-4, S. 17.

<sup>162</sup> Vgl. DIN 4102-4, S. 17.

<sup>163</sup> Vgl. DIN 4102-1, S. 3.

<sup>164</sup> Vgl. DIN 4102-4, S. 16.

<sup>165</sup> Vgl. Volhard und Röhlen 2009, S. 97.

<sup>166</sup> Volhard und Röhlen 2009, S. 8.

<sup>167</sup> Vgl. Volhard und Röhlen 2009, S. 97.

Tabelle 44: Zusammenstellung des Brandverhaltens verschiedener Lehmbaustoffe nach DIN und Forschungsergebnissen.

Zuschlag	Erforderliche Rohdichte des Lehmbaustoffs [kg/m <sup>3</sup> ]	Klassifizierung
Mineralische <sup>1)</sup>	Keine Anforderung	nichtbrennbar
„Lehmbugerechte Beimischungen“ pflanzlicher Faserstoffe <sup>2)</sup>	≥ 1700	nichtbrennbar
Stroh <sup>3)</sup>	> 1200	nichtbrennbar
Stroh <sup>3)</sup>	> 600	schwerentflammbar
Holzhackschnitzel <sup>3)</sup>	> 1400	nichtbrennbar
Holzhackschnitzel <sup>3)</sup>	> 800	schwerentflammbar
Sägespäne <sup>3)</sup>	> 1600	nichtbrennbar
Sägemehl <sup>3)</sup>	> 2000	nichtbrennbar
Hanf, Flachsschäben <sup>3)</sup>	> 600	schwerentflammbar

<sup>1)</sup> vgl. (DIN 4102-4, S. 16)

<sup>2)</sup> vgl. DIN 18951 Bl.1: 1954-01 (diese Norm ist nicht mehr aktuell, wird jedoch laut dem Dachverbandlehm noch für Baugenehmigungen herangezogen)

<sup>3)</sup> Nach im Rahmen von Diplomarbeiten an der MFPA Leipzig nach (DIN 4102-1) durchgeführten Untersuchungen zur Abschätzung des Brandverhaltens von Lehmbaustoffen

Quelle: eigene Darstellung 2022 nach Volhard und Röhlen 2009, S. 97

Die Feuerwiderstandsklasse gibt die Feuerwiderstandsdauer in Minuten an.<sup>168</sup> Ein Bauteil der Feuerwiderstandsklasse F90 ist also in der Lage einem Feuer 90 Minuten zu widerstehen, bevor es versagt (siehe Tabelle 45). Eine Einordnung von Bauteilen in eine Feuerwiderstandsklasse kann ohne Brandversuche nach DIN 4102-4 oder mit Brandversuche nach DIN 4102-2 erfolgen.<sup>169</sup>

Tabelle 45: Feuerwiderstandsklassen nach DIN 4102-2.<sup>170</sup>

Feuerwiderstandsklasse	Feuerwiderstandsdauer in Minuten
F 30	≥ 30
F60	≥ 60
F 90	≥ 90
F120	≥ 120
F180	≥ 180

Quelle: eigene Darstellung 2023

<sup>168</sup> Vgl. DIN 4102-2, S. 3.

<sup>169</sup> Vgl. DIN 4102-2, S. 3.

<sup>170</sup> Vgl. DIN 4102-2, S. 3.

Für massiv gemauerte oder gestampfte Lehmwände und Fachwerkwände mit ausgefüllten Gefachen liegen nach den Lehmbau-Regeln bereits Einstufungen vor. Massive Wände werden der Feuerwiderstandsklasse F90A nach DIN 18954 zugeordnet, Fachwerkwände nach DIN 4102-4 der Klasse F30B. Eine Beschreibung der Klassifizierten Bauteile findet sich in Tabelle 46. (Dachverband Lehm e.V. 2008, S. 98)

Tabelle 46: Übersicht zu Feuerwiderstandsklassen von Wänden aus Lehmbaustoffen.

Bauteil	Klassifizierung
<b>Massive Wände</b> Massiv gemauerte oder gestampfte Lehmwände (der Baustoffklasse A) einer Dicke von 24 cm <sup>1)</sup>	F 90 A
<b>Fachwerkwände mit ausgefüllten Gefachen</b> Bedingungen: Holzquerschnitte mind. 100 * 100 mm bei einseitiger, mind. 120 * 120 mm bei zweiseitiger Brandbeanspruchung, Ausfüllung mit Lehmschlag (Strohlehmausfachung), mindestens einseitige Bekleidung, z.B. mit 15 m Putz <sup>2)</sup>	F 30 B

<sup>1)</sup> nach DIN V 18954: 1956 (diese Norm ist nicht mehr aktuell, wird jedoch laut dem Dachverbandlehm noch für Baugenehmigungen herangezogen)

<sup>2)</sup> vgl. (DIN 4102-4, S. 136)

Quelle: eigene Darstellung 2022 nach Volhard und Röhlen 2009, S. 98

Im Rahmen einer Masterarbeit werden vereinfachte Brandversuche nach Franz Volhard durchgeführt.<sup>171</sup> Diese sollen eine erste Einschätzung der Baustoffklasse, der Feuerwiderstandsklasse sowie des Materialverhaltens nach einer Brandeinwirkung darstellen. Eine normgerechte Untersuchung nach DIN 4102 wird durch die hier durchgeführten Experimente nicht ersetzt. Die Versuche werden aus Brandschutzgründen im freien durchgeführt. Außentemperatur und Wind haben zwar einen Einfluss auf die Messungen, für die hier angestrebten Erkenntnisse sind diese Einflüsse jedoch vernachlässigbar.

## Protokoll Lehmwürfelherstellung

Da der Lehm für die Herstellung der Probewürfel im Außenbereich gelagert wird, wurde zunächst am 14.12.2022 die benötigte Menge aus dem Bigpack entnommen und im Klimaraum des Betonlabors der Bauhaus-Universität Weimar eingelagert. Durch die Lagerung bei konstanter Temperatur (20°C) und Luftfeuchtigkeit hat der erdfeucht abgefüllte Lehm Feuchtigkeit verloren.

Am 19.12.2022 konnten die Probewürfel schließlich hergestellt werden. Als Grundrezept diente die in Tabelle 47 dargestellte Rezeptur, welche im Rahmen dieses Projekts entwickelt und untersucht wurde.

Die Rezeptur für die Mischung der Tragschicht konnte mit einem Wasseranteil von 5 % gut verarbeitet werden. Die Mischung für die Dämmschicht wurde zunächst nach Rezeptur mit einem Wasseranteil von 10 % angemischt. Das Ergebnis hatte eine sehr krümelige Konsistenz und ließ sich nicht verdichten. Es wurden sukzessive 2,5 kg Lehm, 50 g Tonmehl sowie 200 ml Wasser hinzugefügt, bis sich eine gut verarbeitbare Mischung eingestellt hat.

Beide Mischungen wurden mit einem Zwangsmischer hergestellt. Die verwendeten Formen haben eine Größe von 20 x 20 x 20 cm. Nachdem diese mit Schalöl ausgestrichen waren, wurde der Lehm in ca.

<sup>171</sup> Vgl. Volhard 2012, 212ff.

6 cm hohen Schichten eingefüllt und mit Handstampfern maximal verdichtet. In die zweite Lehmschicht wurde ein Geogitter der Größe 15 x 15 cm eingearbeitet. Da nur drei Böden für die Formen verfügbar waren, wurden die drei Probewürfel mit der Tragschichtmischung vorsichtig auf ein geöltes Brett umgesetzt.

Nach Abschluss der Arbeiten wurden die Proben im klimatisierten Probenlager des Betonlabors der Bauhaus-Universität Weimar bei 20° C Raumtemperatur und 65 % Luftfeuchtigkeit zum Trocknen eingelagert.

Tabelle 47: Rezeptur der verwendeten Mischungen für die Probekörper.

Korkanteil	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Masse Stampflehm [kg]	Masse Korkgranulat [kg]	Tonmehl [kg]	Masse gesamt [ kg]			
	inkl. 65% Puffer	1500	130					
0,3	0,0396	<b>41,580</b>	<b>1,544</b>	1,29	44,42			
0,6	0,0396	<b>23,760 + 2,5</b>	<b>3,089</b>	0,81 +0,05	27,65			
Wasser							Wasser im StL	
3,5%	4%	5%	7,5%	10%	12,50%	15%	von 8%	bis 12%
1,555	1,777	2,221	3,331	4,442	5,552	6,663	0,124	0,185
0,968	1,106	1,383	2,074	2,765	3,457	4,148	0,247	0,371

Quelle: eigene Darstellung 2023

## Baustoffklasse

Wie im Kapitel „Ökologische Zuschlagstoffe“, ab Seite 34 dargestellt, ist Kork als Wärmedämmzusatz für Stampflehmwände aus ökologischer und ökonomischer Sicht sehr gut geeignet. Auch die Druck- und Biegezugversuche lieferten vielversprechende Ergebnisse. Die Hypothese, dass Lehm-Kork-Gemisch in die Baustoffklasse B1: schwer entflammbare Baustoffe eingestuft werden kann, soll nun validiert werden.<sup>172</sup> Getrennt betrachtet ist Lehm als mineralischer Baustoff der Baustoffklasse A1 (nicht brennbar)<sup>173</sup> und Korkschat der Baustoffklasse B2 (normal entflammbar)<sup>174</sup> zuzuordnen. Der Versuchsaufbau orientiert sich an der vereinfachten Prüfung nach Volhard aus dem Jahr 1983. Der Aufbau zur Bestimmung der Baustoffklasse wird nahezu unverändert übernommen, während die Prüfung der Feuerwiderstandsklasse an die heute gültigen Normen angepasst werden muss. Während Volhard für die Feuerwiderstandsklasse eine Beflammungsdauer von 45 Minuten vorsah, werden bei den hier durchgeführten Versuchen 60 Minuten für die erste Probe und bei positivem Verlauf im Sinne des Feuerwiderstandes 90 Minuten für die weiteren Proben angesetzt. Auf welcher Grundlage Volhard seine Beflammungsdauer wählte, geht aus der Versuchsbeschreibung nicht hervor. Eine Feuerwiderstandsklasse F45 ist in den Normen der BRD unbekannt, sie findet sich nur in den heute nicht mehr gültigen Normen der DDR.<sup>175</sup>

## Versuchsaufbau

Zur Einstufung der Baustoffklasse werden drei Tragschicht- und drei Dämmschichtprobenwürfel jeweils 10 Minuten mit einem handelsüblichen Flachdachbrenner beflammt. Die Proben werden wie im Abschnitt „Protokoll Lehmwürfelherstellung“ beschrieben hergestellt.

Die Tragschichtmischung LG70K30W5ST3 hat einen Lehmanteil von 70 % und einen Korkanteil von 30 %. Dem Gemisch wurden 5 % Wasser und 3 % Tonmehl hinzugefügt. Außerdem wurde eine Lage des Hochleistungsflachsgewebes im unteren Drittel des Würfels eingestampft. Im Folgenden werden die Tragschichtproben mit P1, P2 und P3 bezeichnet.

Die Dämmschichtmischung LG40K60W12.5ST1.5 wurde mit einem Lehmanteil von 40 % und einem Korkanteil von 60 % angemischt. Die Wasserzugabe liegt bei 12,5 %, der Tonmehlanteil bei 1,5 %. Auch in die Dämmschichtwürfel wurde das Hochleistungsflachsgewebe eingestampft. Die Dämmschichtproben werden im Folgenden als P4, P5 und P6 bezeichnet.

Die Würfel haben eine Kantenlänge von ca. 20 x 20 x 20 cm und ein Gewicht von knapp 14,00 kg (Tragschichtgemisch) bzw. 9,00 - 10,00 kg (Dämmschichtgemisch). Daraus ergibt sich für die Tragschichtmischung ein mittleres Raumgewicht von 1770 kg/m<sup>3</sup> und für die Dämmschichtmischung ein mittleres Raumgewicht von 1194 kg/m<sup>3</sup>. Da die Mischungen für die Probewürfel der jeweiligen Kategorie in einem Arbeitsgang hergestellt wurden, sind die Gewichtsschwankungen ausschließlich auf den Verdichtungsgrad zurückzuführen. Es ist möglich, dass die drei schwersten Proben von einer Person und die drei leichteren Proben von einer anderen Person hergestellt wurden. Eine Auflistung der einzelnen Proben, mit ihrem jeweiligen Gewicht, den Abmessungen sowie dem daraus errechneten Raumgewicht findet sich in Tabelle 48.

---

<sup>172</sup> Vgl. DIN 4102-1, S. 9–10.

<sup>173</sup> Vgl. DIN 4102-4, S. 16.

<sup>174</sup> Vgl. Nierobis 2002.

<sup>175</sup> Vgl. Volhard 2012, 223ff.

Tabelle 48: Übersicht zu den Eigenschaften der untersuchten Probekörper.

Bezeichnung	Gewicht [kg]	Raumgewicht [kg/m <sup>3</sup> ]	Abmessungen		
			<b>b</b> [mm]	<b>h</b> [mm]	<b>d</b> [mm]
P1	13,57	1739,74	200	195	200
P2	13,93	1785,90	200	195	200
P3	13,93	1785,90	200	195	200
Durchschnitt		<b>1770,00</b>			
P4	9,00	1136,37	200	198	200
P5	10,04	1267,68	200	198	200
P6	9,42	1177,50	200	200	200
Durchschnitt		<b>1194,00</b>			

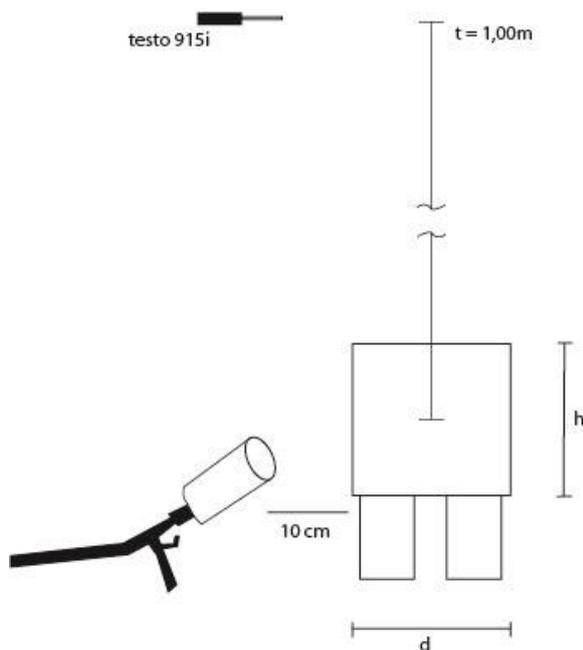
Quelle: eigene Darstellung 2023

Während der Versuchsdauer werden alle 30 Sekunden die Flammenhöhe und die Abgastemperatur in 1 m Höhe gemessen. Für die Messung der Flammenhöhe wird ein einfacher Gliedermaßstab verwendet. Zur Messung der Abgastemperatur wird die Sonde testo 915i mit einem Messbereich von - 50 bis + 400 °C verwendet. Die Messpunkte werden, wie bereits erwähnt, alle 30 Sekunden gesetzt.

Die Oberflächentemperatur wird mit dem Infrarot-Thermometer testo 805i gemessen. Der Messbereich beträgt -30 bis +250 °C. Die Datenaufzeichnung erfolgt teilweise mit dem Datenlogger testo 440 und teilweise mit der Smartphone-App testo smart.

Um die Flamme auf die Mitte des Probenwürfels zu richten, werden die Würfel mit Ziegelsteinen unterlegt. Der geplante Versuchsaufbau ist in Abbildung 98 dargestellt.

Abbildung 98: geplanter Versuchsaufbau zur Einordnung der Baustoffklasse.



Quelle: eigene Darstellung 2023

## Versuchsdurchführung

Die Brandversuche zur Klassifizierung der Baustoffklasse sowie der erste Versuch zur Klassifizierung der Feuerwiderstandsklasse werden am 08.03.2023 auf der Kiesfläche des Demonstrators auf dem Gelände der Bauhaus-Universität Weimar durchgeführt. Der nicht brennbare Untergrund, der ausreichende Abstand zu den umliegenden Gebäuden sowie die Bereitstellung eines Feuerlöschers sollen die sichere Durchführung der Versuche gewährleisten.

Aufgrund des anhaltenden Schneefalls muss der geplante Versuchsaufbau den vorherrschenden Witterungsverhältnissen angepasst werden. Es wird eine Dachkonstruktion aus Ständerwerk und OSB-Platten errichtet (vgl. Abbildung 99). Da unterhalb dieser Konstruktion eine Messung der Abgastemperatur in einem Meter Höhe ab Mitte des Prüfkörpers nicht möglich ist, wird zwischen den OSB-Platten ein Spalt gelassen, damit die Abwärme entweichen kann. Der Temperaturfühler testo 915i wird mit Hölzern unterfüttert, bis die gewünschte Höhe erreicht ist. Zusätzlich wird eine Holzplatte über den Fühler gelegt, um ihn vor Niederschlag zu schützen (siehe Abbildung 99, 1).

Zur Dokumentation und Auswertung werden die Versuche mit der in Abbildung 99 (2) dargestellten Kamera aufgezeichnet. Die Flammenhöhe sollte eigentlich mit einem Gliedermaßstab gemessen werden, der sich neben der Probe befand. Dieser ging jedoch bei Probe 1 in Flammen auf, so dass die Flammhöhe aus den Aufzeichnungen der Kamera ermittelt wird. Die Proben werden mit Steinen so erhöht, dass die Brennerflamme in der Mitte auftritt (Abbildung 99, 3).

Ab Probe 2 wird die Datenerfassung um die Oberflächentemperatur auf der Probenrückseite während der Beflammung und auf der Probenvorderseite während der Abkühlung erweitert. Die Messwerte werden teilweise mit der testo smart Handy App und teilweise mit dem Datenlogger testo 440 (Abbildung 99, 4) erfasst. Die Messtechnik erwies sich, ähnlich wie bei vorangegangenen Untersuchungen, als vergleichsweise unzuverlässig, was zu teilweise unvollständigen Datensätzen führte. Für den Zweck der Ersteinschätzung des Brandverhaltens sind die generierten Daten jedoch ausreichend.

Nach den erforderlichen Anpassungen des Aufbaus und den beschriebenen Erweiterungen werden die Versuche wie im Versuchsaufbau geplant durchgeführt. Die Umgebungstemperatur beträgt im Mittel 5 °C.

Abbildung 99: Versuchsaufbau der Brandversuche vom 08.03.2023.

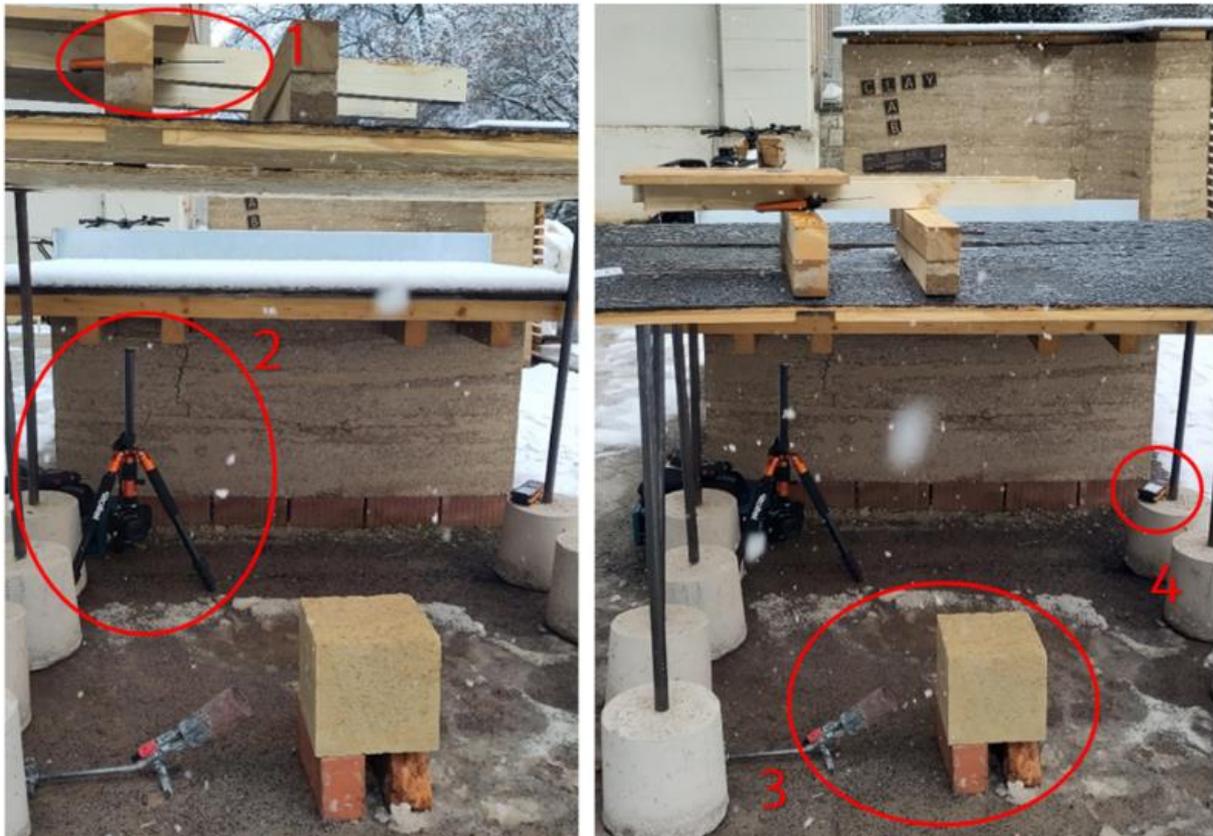


Foto: Zauke 2023

## Untersuchungsreihe 1

### Probe 1: LG70K30W5ST3

Der Brenner wird so auf den Probekörper gerichtet, dass die Flamme mittig auftrifft und der Abstand der Brenndüse ca. 10,00 cm beträgt. Die Beflammungsdauer beträgt 10 Minuten, wobei alle 30 Sekunden die Abgastemperatur in 1 m Höhe gemessen wird.

Die Probe wird an der Oberfläche schnell schwarz, die Kreidemarkierung bleibt während der gesamten Versuchsdauer unbeschädigt. Wie in Abbildung 100 links zu sehen ist, beginnt die Probe zunächst sehr leicht zu glühen (Minute 1:30). Die Fläche wird mit zunehmender Beflammungsdauer größer, das Ausmaß des Glühens ist jedoch immer noch als leicht zu bezeichnen (vgl. Abbildung 100, rechts).

Rauchentwicklung, abfallende Teile oder Selbstentzündung der Probe sind nicht zu beobachten. Der neben der Probe angebrachte Gliedermaßstab fängt während des Versuchs Feuer und wird deshalb entfernt. Die Bestimmung der Flammenhöhe erfolgt daher nachträglich mit Hilfe eines Gitters, das über die Kameraaufnahmen gelegt wird. Nach Beendigung der Beflammung kann die Rückseite der Probe sofort mit der bloßen Hand berührt werden. Die Oberseite ist unangenehm warm, aber nicht schmerzhaft heiß, während die Vorderseite bereits in fünf Zentimeter Entfernung zu heiß für die Hand ist.

Nach etwa 15 Minuten ist die Probe so weit abgekühlt, dass sie aus dem Prüfstand genommen werden kann.

Abbildung 100: Probekörper 1 (1-LG70K30W5ST3) während der Beflammung.



Foto: Zauke 2023

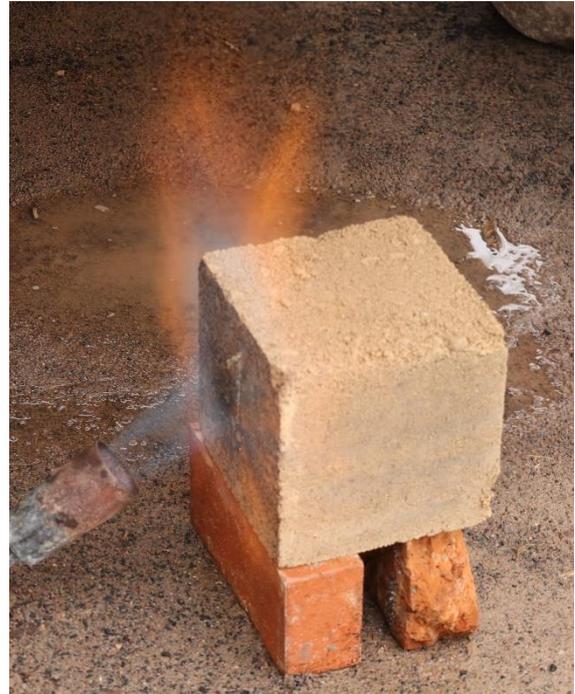
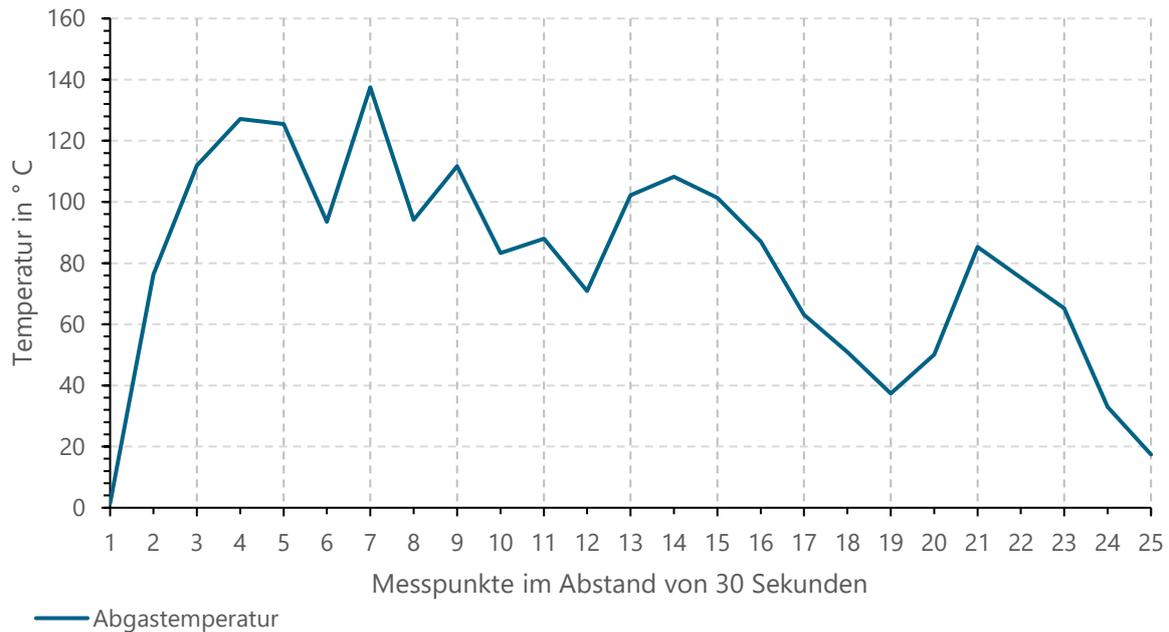


Foto: Munnes 2023

Der Verlauf der Abgastemperatur wird über die Versuchsdauer mit dem Temperaturfühler testo 915i aufgezeichnet. Da der Versuch aus Brandschutzgründen im Freien durchgeführt wird schwanken die gemessenen Temperaturen je nach Windvorkommen teilweise stark.

Der Verlauf der Abgastemperatur ist in Abbildung 101 grafisch dargestellt. Auf der Abszisse sind die Messpunkte mit einem Abstand von 30 Sekunden aufgetragen, auf der Ordinate die Temperatur in °C. Die maximal gemessene Temperatur liegt bei 137,5 °C.

Abbildung 101: Verlauf der Abgastemperatur in °C, gemessen auf einer Höhe  $t = 1,00$  m ( $t = 0$  = Probekörpermitte), PK1.

Quelle: eigene Darstellung 2023

### Probe 2: LG70K30W5ST3

Der Brenner wird so auf den Probekörper gerichtet, dass die Flamme mittig auftrifft und der Abstand der Brenndüse ca. 10,00 cm beträgt. Die Brenndauer beträgt 10 Minuten, während dieser Zeit wird alle 30 Sekunden die Abgastemperatur in 1 m Höhe gemessen. Die Probe wird an der Oberfläche schnell schwarz, die Kreidemarkierung bleibt während der gesamten Versuchsdauer unbeschädigt.

Wie in Abbildung 102, links zu sehen ist, beginnt die Probe zunächst sehr leicht zu glühen (Minute 1:25). Die Fläche wird mit zunehmender Beflammungsdauer größer, das Ausmaß des Glühens ist aber immer noch als leicht zu bezeichnen. Ein Nachglühen wird nicht beobachtet. Rauchentwicklung, abfallende Teile oder Selbstentzündung der Probe sind nicht zu beobachten. Da der Temperaturunterschied zwischen Vorder- und Rückseite der Probe 1 so groß ist, wird bei dieser Probe zusätzlich zur Abgastemperatur auch die Oberflächentemperatur gemessen. Während der Beflammung erfolgt die Messung auf der Rückseite des Prüfkörpers. Anschließend wird der Temperaturverlauf während der Abkühlung auf der Probenvorderseite gemessen. Die Messpunkte haben einen Abstand von 30 s. Die Bestimmung der Flammenhöhe erfolgt nachträglich mit Hilfe eines Gitters, das über die Kamerabilder gelegt wird. Nach ca. 15 Minuten ist die Probe so weit abgekühlt, dass sie aus dem Prüfstand entnommen werden kann. Aufgrund der hohen Gasentnahmerate und der niedrigen Außentemperatur beginnt die Propangasflasche zu vereisen, was zunächst kein Problem darstellt.

Abbildung 102: Probekörper 2 (2-LG70K30W5ST3) vor und während der Beflammung



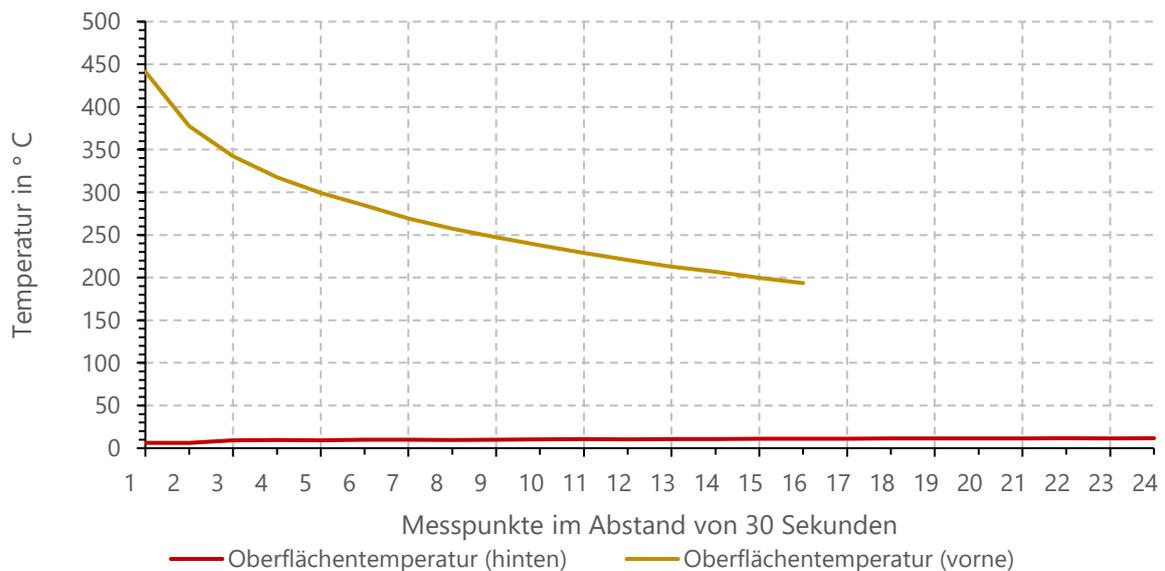
Foto: Zauke 2023



Foto: Daube 2023

Aufgrund eines Speicherfehlers liegen keine Daten für die Abgastemperatur vor. Der Verlauf der Oberflächentemperatur auf der Vorder- und Rückseite des Probekörpers sind in Abbildung 103 grafisch dargestellt. Auf der Abszisse sind die Messpunkte im Abstand von 30 Sekunden aufgetragen, auf der Ordinate die Temperatur in °C. Die gemessene Temperatur auf der dem feuerabgewandten Seite (rot) ist nahezu konstant. Auf der Vorderseite beträgt die Oberflächentemperatur (gold) zu Beginn der Abkühlphase 441,4 °C. Während der ersten fünf Minuten sinkt die Temperatur um fast die Hälfte. Danach flacht die Kurve zunehmend ab.

Abbildung 103: Vergleich der Erwärmung auf der Rückseite mit dem Abkühlverhalten auf der Vorderseite, PK2.



Quelle: eigene Darstellung 2023

### Probe 3: LG70K30W5ST3

Der Brenner wird so auf den Probekörper gerichtet, dass die Flamme mittig auftrifft und der Abstand der Brenndüse ca. 10,00 cm beträgt. Die Brenndauer beträgt 10 Minuten, während dieser Zeit wird alle 30 Sekunden die Abgastemperatur in 1 m Höhe gemessen. Die Probe wird an der Oberfläche schnell schwarz, die Kreidemarkierung bleibt während der gesamten Versuchsdauer unbeschädigt. Die Probe beginnt zunächst sehr leicht zu glühen (Minute 1:33). Die Fläche wird mit zunehmender Beflammungsdauer größer, das Ausmaß des Glühens ist aber immer noch als leicht zu bezeichnen. Ein Nachglühen wird nicht beobachtet. Rauchentwicklung, abfallende Teile oder Selbstentzündung der Probe sind nicht zu beobachten.

Abbildung 104 zeigt die Oberfläche von Probe 3 nach dem Versuch. Sie ist deutlich verkohlt, aber intakt.

Abbildung 104: Probekörper 3 (LG70K30W5ST3) nach der Beflammung.



Foto: Daube 2023



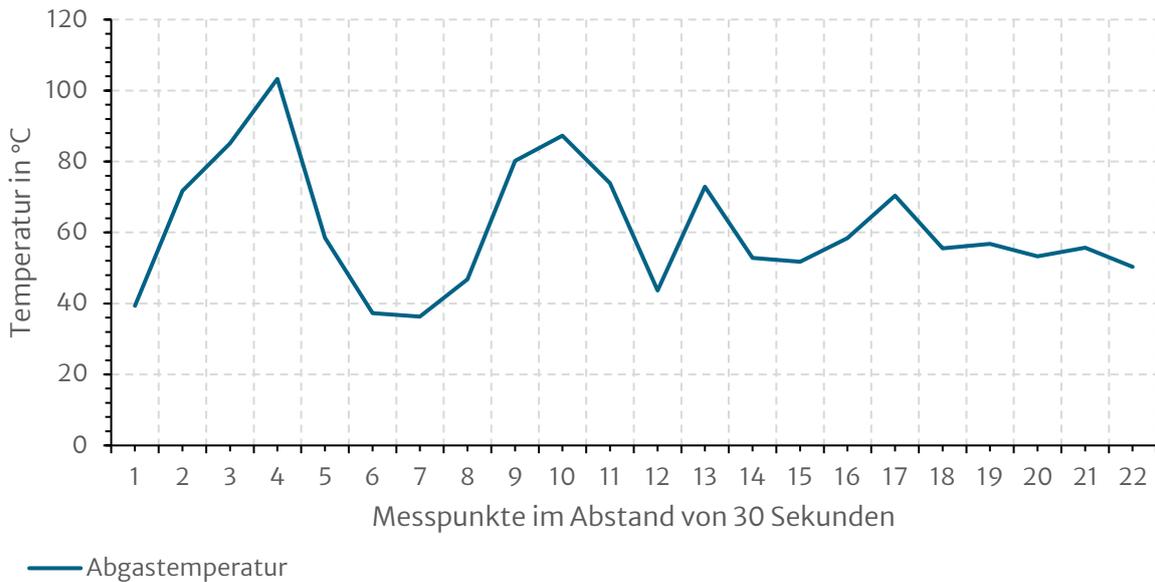
Foto: Daube 2023

Neben der Abgastemperatur wird auch die Oberflächentemperatur der Probe gemessen. Während der Beflammung erfolgt die Messung auf der Rückseite der Probe. Anschließend wird der Temperaturverlauf während der Abkühlung auf der Probenvorderseite gemessen. Die Messpunkte haben einen Abstand von 30 s. Die Bestimmung der Flammenhöhe erfolgt nachträglich über ein Raster, das über die Kamerabilder gelegt wird.

Nach Beendigung der Beflammung kann die Rückseite der Probe sofort mit der bloßen Hand berührt werden. Nach ca. 15 Minuten ist die Probe so weit abgekühlt, dass sie aus dem Versuchsstand entnommen werden kann.

Aufgrund eines Speicherfehlers liegen für Probe 3 keine Aufzeichnungen der Temperaturverläufe der Oberflächentemperatur vor. Der Temperaturverlauf der Abgastemperatur ist in Abbildung 105 grafisch dargestellt. Auf der Abszisse sind die Messpunkte im Abstand von 30 Sekunden aufgetragen, auf der Ordinate die Temperatur in °C. Die maximale gemessene Abgastemperatur liegt bei 103,3 °C.

Da der Versuch aus Brandschutzgründen im Freien durchgeführt wird schwanken die gemessenen Temperaturen je nach Windvorkommen teilweise stark.

Abbildung 105: Verlauf der Abgastemperatur in °C, gemessen auf einer Höhe  $t = 1,00$  m ( $t = 0$  = Probekörpermitte) PK3.

Quelle: eigene Darstellung 2023

#### **Probe 4: LG40K60W12.5ST1.5**

Der Brenner wird so auf den Probekörper gerichtet, dass die Flamme mittig auftrifft und der Abstand der Brenndüse ca. 10,00 cm beträgt. Die Brenndauer beträgt 10 Minuten, während der alle 30 Sekunden die Abgastemperatur in 1 m Höhe gemessen wird. Zusätzlich zur Abgastemperatur wird bei dieser Probe auch die Oberflächentemperatur gemessen. Während der Beflammung erfolgt die Messung auf der Rückseite des Probekörpers. Anschließend wird der Temperaturverlauf während der Abkühlung auf der Vorderseite der Probe gemessen. Die Messpunkte haben einen Abstand von 30 s. Die Bestimmung der Flammenhöhe erfolgt im Nachhinein mit Hilfe eines Gitters, das über die Kamerabilder gelegt wird.

Die Probe wird sofort schwarz, auch die Kreidemarkierung ist nach einigen Sekunden nicht mehr zu erkennen. Die Probe glüht stark und auch großflächiger als die Tragschichtproben (vgl. Abbildung 106). Nach knapp zwei Minuten ist eine deutliche Rauchentwicklung zu beobachten, die auch nach Ende der Beflammung noch fast drei Minuten anhält. Ein Nachglühen ist nicht zu beobachten. Nach ca. 15 Minuten ist die Probe so weit abgekühlt, dass sie aus dem Prüfstand entnommen werden kann.

Abbildung 106: Probekörper 4 (LG40K60W12.5ST1.5) während der Beflammung.



Foto: Zauke 2023



Foto: Munnes 2023

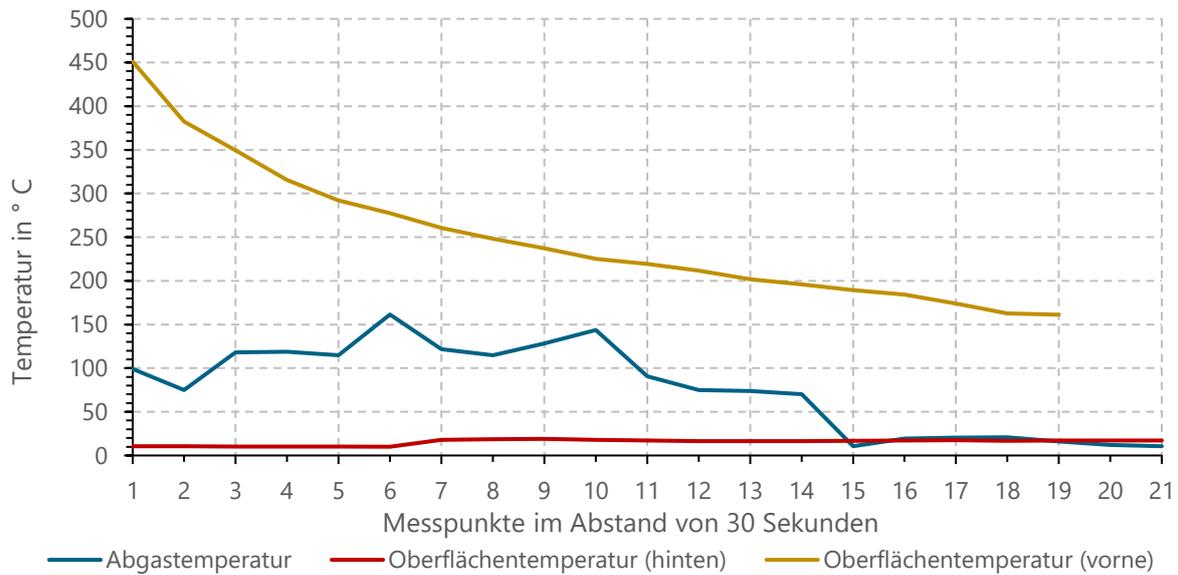
In Abbildung 107 sind die aufgezeichneten Temperaturverläufe grafisch dargestellt. Auf der Abszisse sind die Messpunkte im Anstand von 30 Sekunden aufgetragen, auf der Ordinate die Temperatur in °C. Die Abgastemperatur wird in blau dargestellt, die Oberflächentemperatur (hinten) in rot und die Oberflächentemperatur (vorne) in gold.

Da der Versuch aus Brandschutzgründen im Freien durchgeführt wird schwanken die gemessenen Temperaturen je nach Windvorkommen teilweise stark. Die maximale gemessene Temperatur liegt bei 161,4 °C.

Der Temperaturverlauf auf der Rückseite ist 3 Minuten konstant bei 10 °C. Nach einem leichten Anstieg bleibt die Temperatur konstant bis zum Ende der Beflammung.

Die Oberflächentemperatur (vorne) beträgt zu Beginn der Abkühlphase 451 °C. Nach etwa 4,5 Minuten ist die Probe bereits um die Hälfte abgekühlt. Anschließend flacht die Kurve deutlich ab.

Abbildung 107: Vergleich gemessener Temperaturverläufe von PK4.



Quelle: eigene Darstellung 2023

### Probe 5: LG40K60W12.5ST1.5

Der Brenner wird so auf den Probekörper gerichtet, dass die Flamme mittig auftritt und der Abstand der Brenndüse ca. 10,00 cm beträgt. Die Brenndauer beträgt 10 Minuten, während der alle 30 Sekunden die Abgastemperatur in 1 m Höhe gemessen wird. Zusätzlich zur Abgastemperatur wird bei dieser Probe auch die Oberflächentemperatur gemessen. Während der Beflammung erfolgt die Messung auf der Rückseite des Probekörpers. Anschließend wird der Temperaturverlauf während der Abkühlung auf der Vorderseite der Probe gemessen. Die Messpunkte haben einen Abstand von 30 Sekunden. Die Bestimmung der Flammenhöhe erfolgt im Nachhinein über ein Raster, das über die Kameraaufnahmen gelegt wird.

Probekörper fünf ist der schwerste der drei Dämmstoffproben. Zu Beginn der Beflammung verfärbt er sich etwas langsamer schwarz, die Kreidemarkierung bleibt bis zum Versuchsende erhalten. Die Probe glüht stark und auch großflächiger als die Tragschichtproben (vgl. Abbildung 108).

Nach knapp zwei Minuten ist eine deutliche Rauchentwicklung zu beobachten, die auch nach Ende der Beflammung noch fast drei Minuten anhält. Ein Nachglühen ist nicht zu beobachten. Nach ca. 15 Minuten ist die Probe so weit abgekühlt, dass sie aus dem Versuchsstand entnommen werden kann.

Abbildung 108: Probekörper 5 (LG40K60W12.5ST1.5) während der Beflammung.



Foto: Munnes 2023

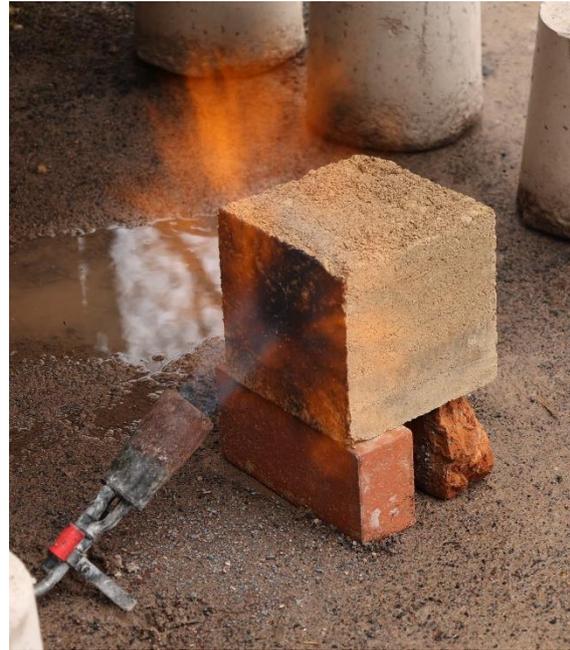


Foto: Munnes 2023

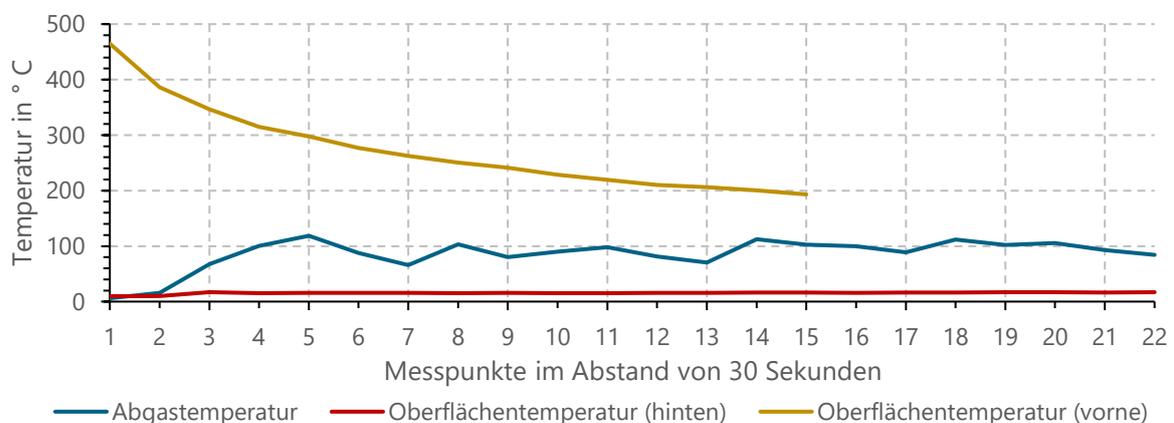
In Abbildung 109 sind die aufgezeichneten Temperaturverläufe grafisch dargestellt. Auf der Abszisse sind die Messpunkte im Abstand von 30 Sekunden aufgetragen, auf der Ordinate die Temperatur in °C. Die Abgastemperatur wird in blau dargestellt, die Oberflächentemperatur (hinten) in rot und die Oberflächentemperatur (vorne) in gold.

Da der Versuch aus Brandschutzgründen im Freien durchgeführt wird schwanken die gemessenen Temperaturen je nach Windvorkommen teilweise stark. Die maximale gemessene Temperatur liegt bei 118,6 °C.

Der Temperaturverlauf auf der Rückseite liegt konstant bei 10 °C.

Die Oberflächentemperatur (vorne) beträgt zu Beginn der Abkühlphase 4651 °C. Nach etwa 4,5 Minuten ist die Probe bereits um die Hälfte abgekühlt. Anschließend flacht die Kurve deutlich ab.

Abbildung 109: Vergleich gemessener Temperaturverläufe PK5.



Quelle: eigene Darstellung 2023

### Probe 6: LG40K60W12.5ST1.5

Der Brenner wird so auf den Probekörper gerichtet, dass die Flamme mittig auftrifft und der Abstand der Brenndüse ca. 10,00 cm beträgt. Die Brenndauer beträgt 10 Minuten, während der alle 30 Sekunden die Abgastemperatur in 1 m Höhe gemessen wird. Zusätzlich zur Abgastemperatur wird bei dieser Probe auch die Oberflächentemperatur gemessen. Die Messung wird während der Befuerung auf der Rückseite der Probe durchgeführt. Anschließend wird der Temperaturverlauf während der Abkühlung auf der Vorderseite der Probe gemessen. Die Messpunkte haben einen Abstand von 30 s. Die Bestimmung der Flammenhöhe erfolgt im Nachhinein mit Hilfe eines Gitters, das über die Kamerabilder gelegt wird.

Die Probe wird sofort schwarz, auch die Kreidemarkierung ist nach einigen Sekunden nicht mehr zu erkennen. Die Probe glüht stark und auch großflächiger als die Tragschichtproben (vgl. Abbildung 110). Nach knapp zwei Minuten ist eine deutliche Rauchentwicklung zu beobachten, die auch nach Ende der Beflammung noch fast drei Minuten anhält. Ein Nachglimmen ist nicht zu beobachten. Nach ca. 15 Minuten ist die Probe so weit abgekühlt, dass sie aus dem Versuchsstand entnommen werden kann.

Abbildung 110: Probekörper 6 (LG40K60W12.5ST1.5) während der Beflammung.



Foto: Daube 2021

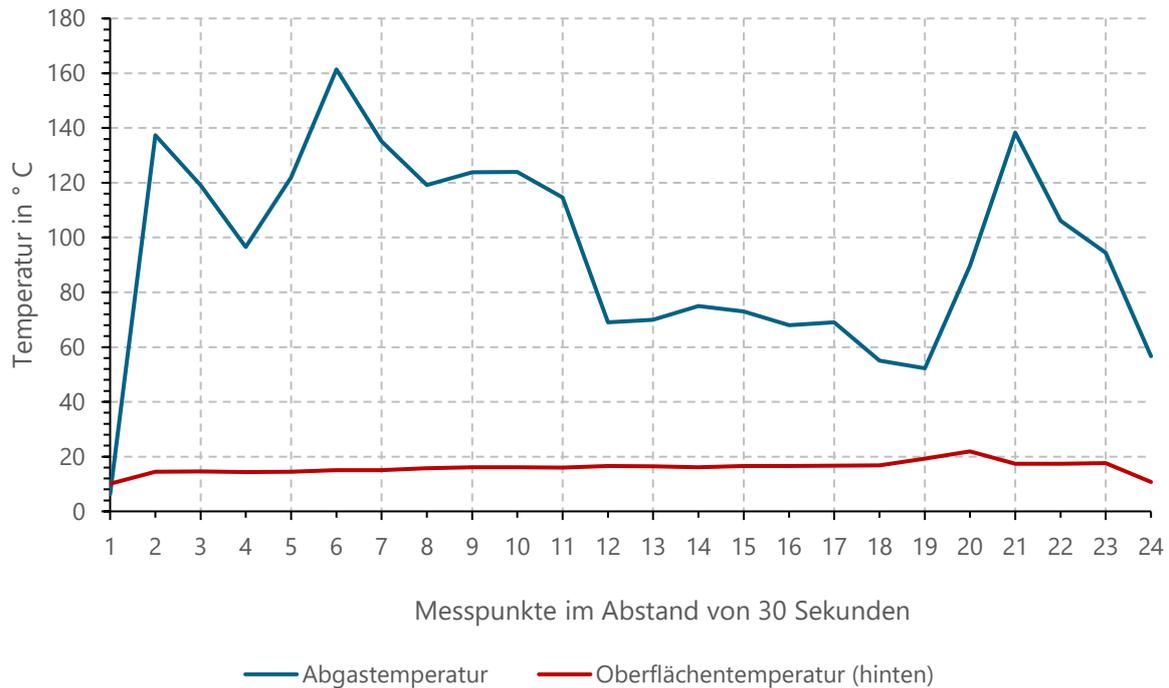


Foto: Munnes 2023

In Abbildung 111 sind die gemessenen Temperaturverläufe grafisch dargestellt. Auf der Abszisse sind die Messpunkte mit einem Abstand von 30 Sekunden aufgetragen, auf der Ordinate die Temperatur in °C. Die blaue Kurve repräsentiert den Verlauf der Abgastemperatur, die rote Kurve die Oberflächentemperatur auf der Rückseite des Probekörpers.

Da der Versuch aus Brandschutzgründen im Freien durchgeführt wird schwanken die gemessenen Temperaturen je nach Windvorkommen teilweise stark. Die maximale gemessene Temperatur liegt bei 161,4 °C. Die Oberflächentemperatur steigt zu Beginn leicht an und bleibt dann über die Versuchsdauer konstant. Erst zum Ende der Beflammungszeit steigt die Temperatur noch einmal leicht an. Der maximal gemessene Wert beträgt 21,9 °C.

Abbildung 111: Vergleich gemessener Temperaturverläufe PK6.



Quelle: eigene Darstellung 2023

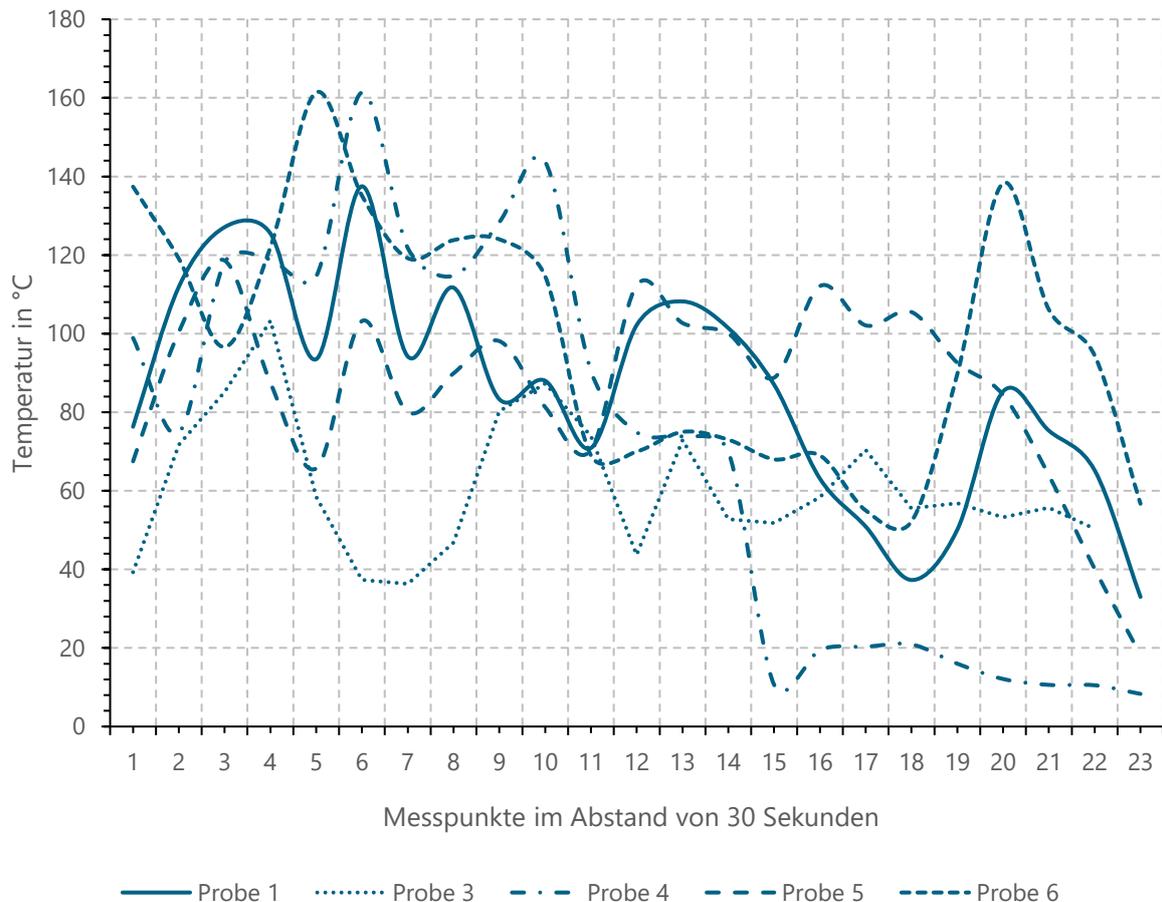
### Auswertung Untersuchungsreihe 1

Die aufgezeichneten Verläufe der Abgastemperatur zeigen, dass diese nicht über 200°C ansteigt. Dieser Wert ist bei der Verbrennung von Propangas zu erwarten. Etwas reduziert wird die Temperatur durch die Dachkonstruktion, die zum Schutz vor Niederschlag installiert werden musste. Die starken Schwankungen sind auf gelegentlich auftretenden Wind und Ausfälle der Messeinrichtung zurückzuführen. Sobald die Flamme erlischt, sinkt auch die Abgastemperatur sofort auf Umgebungstemperatur ab.

Die Abgastemperaturverläufe der Probe 1 und der Proben 3 bis 6 zeigt Abbildung 112. Auf der Abszisse sind die Messpunkte im Abstand von 30 Sekunden aufgetragen, auf der Ordinate die Temperatur in °C. Die Daten der Probe 2 gingen aufgrund eines Speicherfehlers verloren. Die Temperatur wurde jedoch in unregelmäßigen Abständen von den Ausführenden abgelesen. Der Temperaturverlauf der Probe 2 kann als affin zu den aufgezeichneten rekonstruiert werden.

Aus den relativ konstanten Temperaturen kann geschlossen werden, dass aus den Proben keine Gase austreten, die heißer als Propangas verbrennen.

Abbildung 112: Verlauf der Abgastemperatur der Probe 1 und der Proben 3 bis 6 in °C.

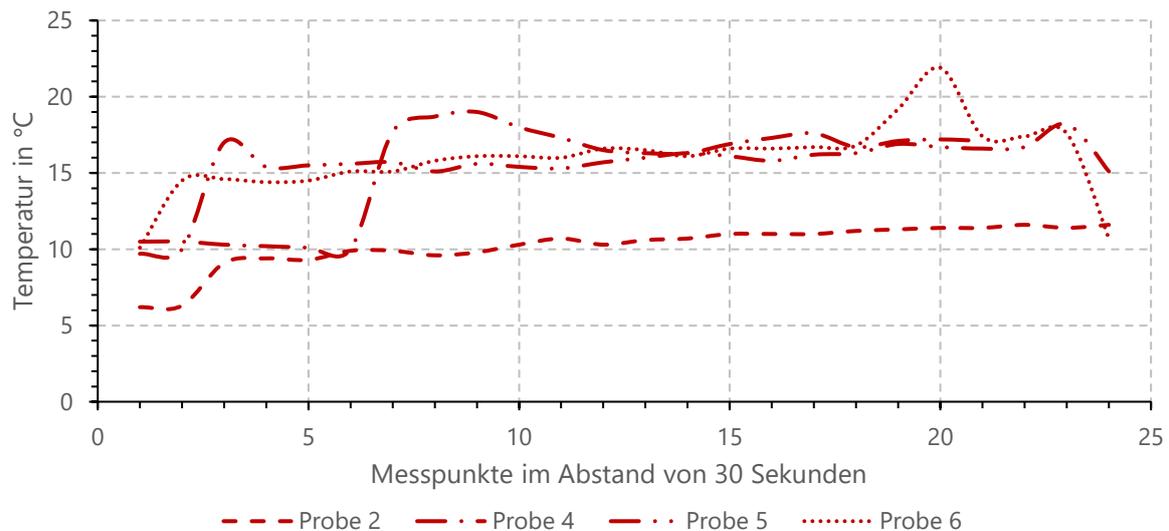


Quelle: eigene Darstellung 2023

Während der Beflammung wird die Oberflächentemperatur der Proben auf der Rückseite gemessen. Die Temperaturverläufe der Probe 2 und der Proben 4 bis 6 sind in Abbildung 113 dargestellt. Auf der Abszisse sind die Messpunkte im Abstand von 30 Sekunden aufgetragen, auf der Ordinate die Temperatur in °C. Für Probe 1 liegen keine Daten vor, da die Aufzeichnung der Oberflächentemperatur erst mit Probe 2 begonnen wurde. Die Daten der Probe 3 gingen durch einen Speicherfehler verloren.

Die Temperatur steigt bei allen Proben schnell an und bleibt dann nahezu konstant. Ein deutlicher Unterschied ist zwischen der Tragschichtprobe 2 und den Dämmschichtproben 4 bis 6 zu erkennen. Die Temperaturdifferenz beträgt im Mittel 5 K. Ob dieser Unterschied auf die höhere Umgebungstemperatur während der Versuchsdurchführung oder auf die unterschiedliche Dichte der Probekörper zurückzuführen ist, sollte in weiteren Untersuchungen geklärt werden. Es ist zu erkennen, dass die Temperatur auf der Rückseite der Dämmschichtproben mit 5 K bis 8 K stärker ansteigt als die der Tragschichtprobe mit 4 K. Nach Beendigung der Beflammung wird der Temperaturfühler auf der Vorderseite der Proben positioniert, um die Abkühlphase zu dokumentieren. Die Temperatur auf der Rückseite wird jedoch weiterhin von Hand kontrolliert, mit dem Ergebnis, dass die Temperatur über einen längeren Zeitraum gehalten wird.

Abbildung 113: Verlauf der Oberflächentemperatur (hinten) der Probe 2 und der Proben 4 bis 6 in °C.

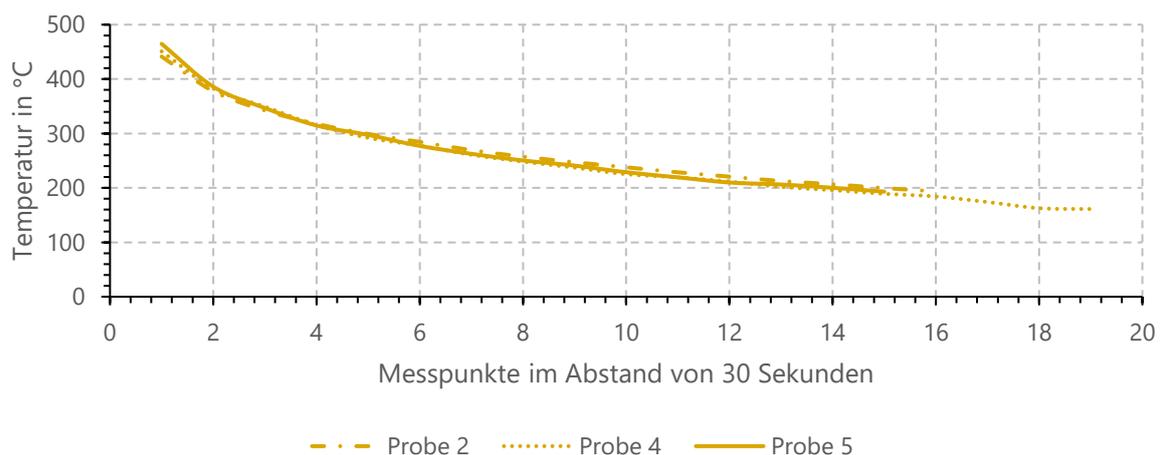


Quelle: eigene Darstellung 2023

Die Abkühlungsphase wird durch Messung der Temperaturen an der Vorderseite der Prüfkörper 2, 4 und 5 dokumentiert. Probekörper 2 besteht aus dem Tragschichtgemisch, die Probekörper 4 und 5 wurden aus dem Dämmschichtgemisch hergestellt. Die Temperaturverläufe während der Abkühlphase sind in Abbildung 114 zusammengefasst.

Auf der Abszisse sind die Messpunkte im Abstand von 30 Sekunden aufgetragen, auf der Ordinate die Temperatur in °C. Für Probe 1 liegen keine Daten vor, da die Aufzeichnung der Oberflächentemperatur erst mit Probe 2 begonnen wurde. Für Probe 3 und Probe 6 wurden keine Daten aufgezeichnet. Alle Proben haben zu Beginn der Messung eine Temperatur von ca. 450 °C. Bereits nach 20 Minuten hat sich die Oberflächentemperatur auf 225 °C halbiert. Die Kurve flacht jedoch mit der Zeit ab. Der prozentuale Korkanteil scheint die Abkühlgeschwindigkeit nicht zu beeinflussen.

Abbildung 114: Verlauf der Oberflächentemperatur (vorne) während der Abkühlphase in °C.



Quelle: eigene Darstellung 2023

Zwei der drei Proben pro Mischung werden nach der Brandprüfung im Betonlabor der Bauhaus-Universität Weimar einer Druckfestigkeitsprüfung unterzogen. Es soll geprüft werden, ob sich die Druckfestigkeit nach der Brandbeanspruchung im Vergleich zu den vorhergehenden Untersuchungen ändert.

Die verbleibenden zwei Proben werden in der MFPA Weimar aufgeschnitten, um die Verkohlungstiefe besser erkennen zu können. Zusätzlich wird von jeweils einer Probenhälfte die verkohlte Schicht mit einem Löffel abgekratzt und gewogen. Dabei repräsentiert Probe 3 die Tragschichtmischung und Probe 6 die Dämmschichtmischung.

Die Oberfläche der Probe 3 ist stabil, es fallen nur wenige Teile ab, wenn die Probe bewegt wird. Eine kleine Materialmenge von 4 g kann mit einem Löffel abgeschabt werden (Abbildung 115, rechts oben). Die Oberfläche erscheint auch danach noch nahezu intakt, wie in Abbildung 115, links oben gut zu erkennen ist. Die Verkohlungstiefe beträgt 10 mm, Abbildung 115, links. Anders verhält es sich bei Probe 6. Beim Bewegen der Probe fallen bereits erste Teile ab. Es können 40 g Material abgekratzt werden, was auch deutlich an der Oberflächenstruktur zu erkennen ist (Abbildung 115, unten). Die Verkohlungstiefe beträgt 15 mm, Abbildung 115, rechts unten.

Abbildung 115: Vergleich der verkohlten Oberflächen von einem Tragschicht- und einem Dämmschichtwürfel.

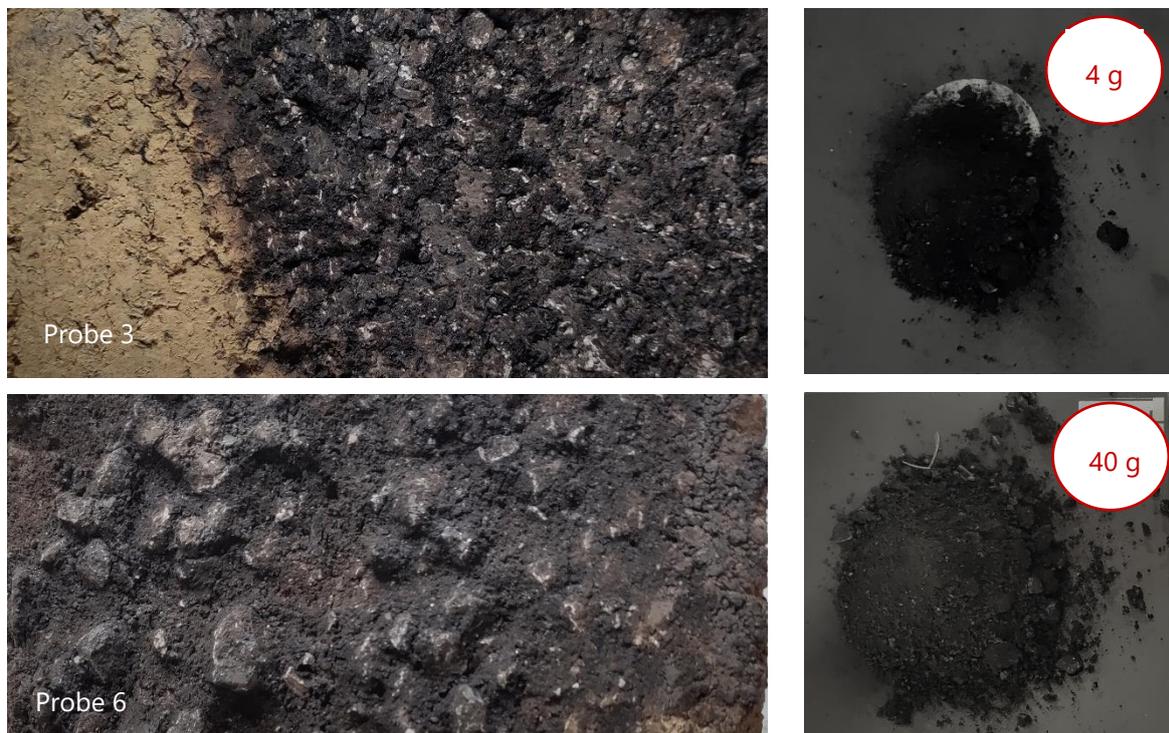


Foto: Zauke 2023

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich keine der untersuchten Proben entzündet hat. Die Abgastemperatur und die Flammenhöhe können als konstant angesehen werden. Die Dämmschichtproben zeigen eine leichte Rauchentwicklung und glühen nach Entfernen der Flamme ca. 4 Minuten nach.

Alle Proben glühen während der Beflammung im Flammkern, jedoch nur schwach. Die Oberflächentemperatur (Rückseite) steigt leicht an, während die Oberflächentemperatur (Vorderseite) stark abfällt. Es fallen keine Teile von den Proben ab. Die Tiefe der Verkohlung ist mit max. 20 mm eher gering.

Es gibt keine Hinweise darauf, dass das untersuchte Lehm-Kork-Gemisch zur Brandausbreitung beiträgt. Alle Ergebnisse und Beobachtungen sind in Tabelle 49 noch einmal übersichtlich zusammengefasst.

Tabelle 49: Zusammenfassung der Messungen und Beobachtungen.

Probe	1	2	3	4	5	6
Entflammung	nein	nein	nein	nein	nein	nein
Abgastemperatur	konstant	konstant	konstant	konstant	konstant	konstant
Flammhöhe	konstant	konstant	konstant	konstant	konstant	konstant
Glühen im Flammkern	nach ca. 1,5 Minuten	nach ca. 1,5 Minuten	nach ca. 1,5 Minuten	nach ca. 1,0 Minuten	nach ca. 1,0 Minuten	nach ca. 1,0 Minuten
Qualmentwicklung	nein	nein	nein	leicht	leicht	leicht
Verkohlung	10 mm	10 mm	-	15 mm	20 mm	-
Nachglühen ohne Flammenbildung	nein	nein	nein	etwa 4 Minuten	etwa 4 Minuten	etwa 4 Minuten
Oberflächentemperatur (hinten)	leicht steigend					
Oberflächentemperatur (vorne)	stark fallend					

Quelle: eigene Darstellung 2023

Abbildung 116 zeigt das Innere der beiden Probekörper 3 und 6. Es fällt auf, dass die durch den Brandversuch verursachten Verruungen nur oberflächlich sind.

Abbildung 116: Blick in das Innere der Proben 3 und 6.



Foto: Zauke 2023

## Feuerwiderstandsklasse

### Versuchsaufbau

Für die Einordnung der Feuerwiderstandsklasse werden drei Probekörper untersucht. Die kleinmaßstäblichen Lehmtafeln haben die Abmessungen 55 x 39 x 15 cm, wozu das Original um den Faktor 0,26 verkleinert, gebaut wurde. Lehmtafel 2 wurde während der "Langen Nacht der Wissenschaften 2022" von verschiedenen Teilnehmer:innen hergestellt, weshalb dieser Probekörper auch insgesamt inhomogener ist. Auch ein konstantes Mischverhältnis kann für diesen Probekörper nicht sichergestellt werden. Vermutlich wurde ein zu geringer Korkanteil in diese Tafel eingebracht. Die Lehmtafeln 1 und 3 wurden im Mischverhältnis LG70K30W5ST3 hergestellt. Die Eigenschaften der Lehmtafeln sind in Tabelle 50 zusammengefasst.

Tabelle 50: Übersicht zu den Eigenschaften der untersuchten Lehmtafeln.

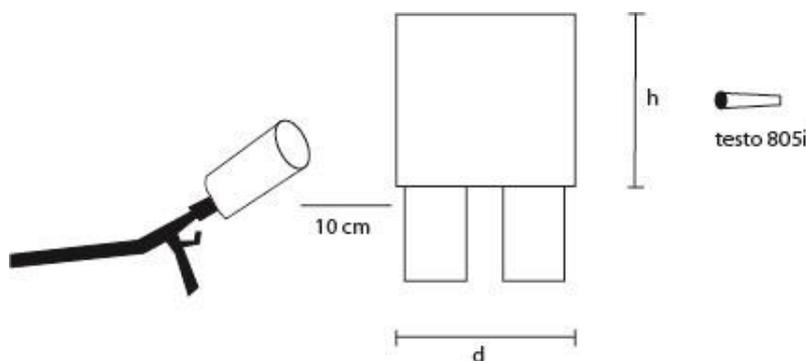
Bezeichnung	Gewicht [kg]	Raumgewicht [kg/m <sup>3</sup> ]	Abmessungen		
			b [mm]	h [mm]	d [mm]
Lehmtafel 1	53,58	1754	54,7	38	14,8
Lehmtafel 2 (LNdW)	63,61	1958	54,8	39	15,2
Lehmtafel 3	54,26	1754	54,7	39	14,8
Durchschnitt		<b>1822,00</b>			

Quelle: eigene Darstellung 2023

Der Versuchsaufbau ist unverändert zur Baustoffklasse. Die Lehmtafel wird so vor dem Propangasbrenner platziert, dass der Flammenmittelpunkt mit dem Mittelpunkt der Lehmtafel übereinstimmt (vgl. Abbildung 117). Die Beflammungsdauer wird mit 60 Minuten angesetzt. Dieser Zeitrahmen ermöglicht die Einstufung in die Feuerwiderstandsklasse F60 zu nach DIN 4102-2<sup>176</sup>.

Während der Beflammung wird mit dem Infrarot-Thermometer testo 805i die Oberflächentemperatur auf der dem Feuer abgewandten Seite gemessen. Eine Aufnahme der Abgastemperatur kann optional hinzugefügt werden.

Abbildung 117: Geplanter Versuchsaufbau zur Einordnung der Feuerwiderstandsklasse.



Quelle: eigene Darstellung 2023

<sup>176</sup> Vgl. DIN 4102-2.

## Versuchsdurchführung

Die Untersuchung von Lehmtafel 1 findet am 08.03.2023 im selben Versuchsstand wie die Versuche zur Klassifizierung der Baustoffklasse statt (vgl. Abschnitt Baustoffklasse, S. 152).

Die Brandversuche der Lehmtafeln 2 und 3 zur Klassifizierung der Feuerwiderstandsklasse finden am 22.03.2023 auf der Kiesfläche des ClayLab auf dem Gelände der Bauhaus-Universität Weimar statt. Das milde und trockene Wetter erlaubt den ursprünglich geplanten Versuchsaufbau ohne zusätzliche Dachkonstruktion. Die Umgebungstemperatur beträgt durchschnittlich 15 °C.

Die Lehmtafeln werden so vor dem Brenner aufgestellt, dass sich der Flammenmittelpunkt in der Mitte des Prüfkörpers befindet. In einem Meter Höhe wird der Temperaturfühler testo 915i zur Messung der Abgastemperatur angebracht. Die Messdaten werden mit dem Datenlogger testo 444 aufgezeichnet. Die Oberflächentemperatur wird mit dem Infrarot-Thermometer testo 805i gemessen und mit dem Datenlogger testo 444 aufgezeichnet. Lehmtafel 2 wird 60 Minuten, Lehmtafel 3 90 Minuten beflammt. Der Abstand zwischen den Messpunkten beträgt zwei Minuten. Die Messungen werden auch während der Abkühlphase aufgezeichnet. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 118 dargestellt.

Abbildung 118: Versuchsaufbau der Brandversuche am 22.03.2023.



Foto: Zauke 2023

## Untersuchungsreihe 2

### Probe 1: LG70K30W5ST3

Die **Lehmtafel 1** wird wie im Abschnitt „Versuchsaufbau“ beschrieben in den Versuchsstand gestellt. Während der Beflammung wird die Oberflächentemperatur auf der Rückseite der Lehmtafel gemessen. Der Versuch muss nach 33 Minuten abgebrochen werden, da das Propangas nicht ausreichte.

Bei der Versuchsdurchführung fiel auf, dass die auf das Bauteil auftreffende Flamme deutlich größer erscheint als bei den vorab untersuchten Probekörpern. Grund dafür könnte die größere Fläche der Lehmtafeln sein (vgl. Abbildung 119, rechts). Auch die Höhe der Flamme ist deutlich besser zu beobachten. Im Zentrum der Flamme glüht die Lehmtafel leicht, eine Rauchentwicklung ist nicht erkennbar. Im Gegensatz zu den Würfeln wird die Oberfläche der Lehmtafel nicht gleichmäßig schwarz, wie in Abbildung 119, links zu erkennen ist.

Dieser Versuch ist der letzte des Tages, beim Abbau des Daches fällt auf, dass sich auf der Unterseite der OSB-Platten keine Rußablagerungen befinden. Da Propan relativ sauber verbrennt, lässt sich daraus schließen, dass die Lehmproben nicht zur Rußbildung neigen.

Abbildung 119: Lehmtafel 1 nach 30 Minuten Beflammung (links) und während der Beflammung (rechts).



Foto: Zauke 2023

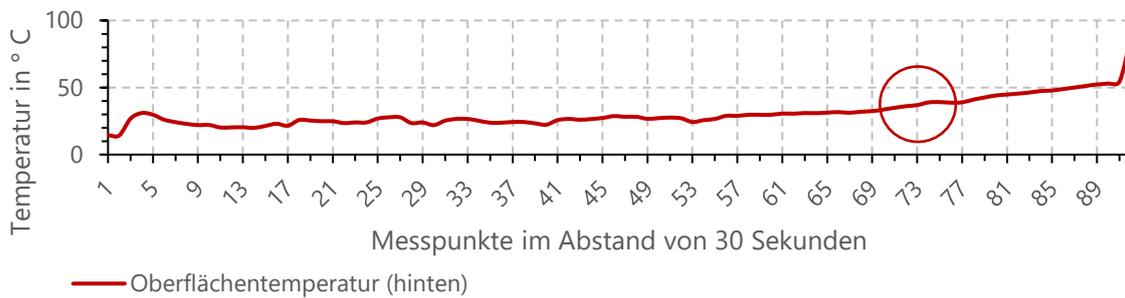


Foto: Daube 2023

Abbildung 120 zeigt den Temperaturverlauf in °C, der auf der Rückseite der Lehmtafel gemessen wird. Der rote Kreis markiert das Ende der Beflammung, nach 30 Minuten. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Temperatur danach weiter ansteigt.

Für die Druckfestigkeitsprüfung werden Würfel aus der Lehmtafel geschnitten, anhand derer sich auch die Verkohlungstiefe genauer bestimmen lässt.

Abbildung 120: Temperaturverlauf in °C bei Vorderseitiger Beflammung der Probe 1, gemessen auf der Rückseite des Probekörpers.



Quelle: eigene Darstellung 2023

### Probe 2: LG70K30W5T3 (LNdW)

**Lehmtafel 2** wurde während der "Langen Nacht der Wissenschaften" im Betonlabor der Bauhaus-Universität Weimar von verschiedenen Teilnehmer:innen hergestellt. Sie weist deutliche Unterschiede in der Oberflächenstruktur und Festigkeit zu den Lehmtafeln 1 und 3 auf. Bereits beim Transport zum Versuchsstand lösen sich größere Stücke an den Ecken.

Die Lehmtafel wird wie im Abschnitt Versuchsaufbau (S. 170) beschrieben aufgestellt. Zum Schutz vor leichtem Wind wird in der Hauptwindrichtung eine Abschirmung aus OSB-Platten angebracht. Die körnige Oberfläche beginnt einige Sekunden nach Beginn der Beflammung zu glühen, was sich nach ca. 25 Minuten wieder einstellt. Abbildung 121 zeigt den Probekörper während der Beflammung (links) und während der Abkühlphase (rechts).

Abbildung 121: Wandelement 2 während der Beflammung (links) und während der Abkühlphase (rechts).



Foto: Zauke 2023



Foto: Zauke 2023

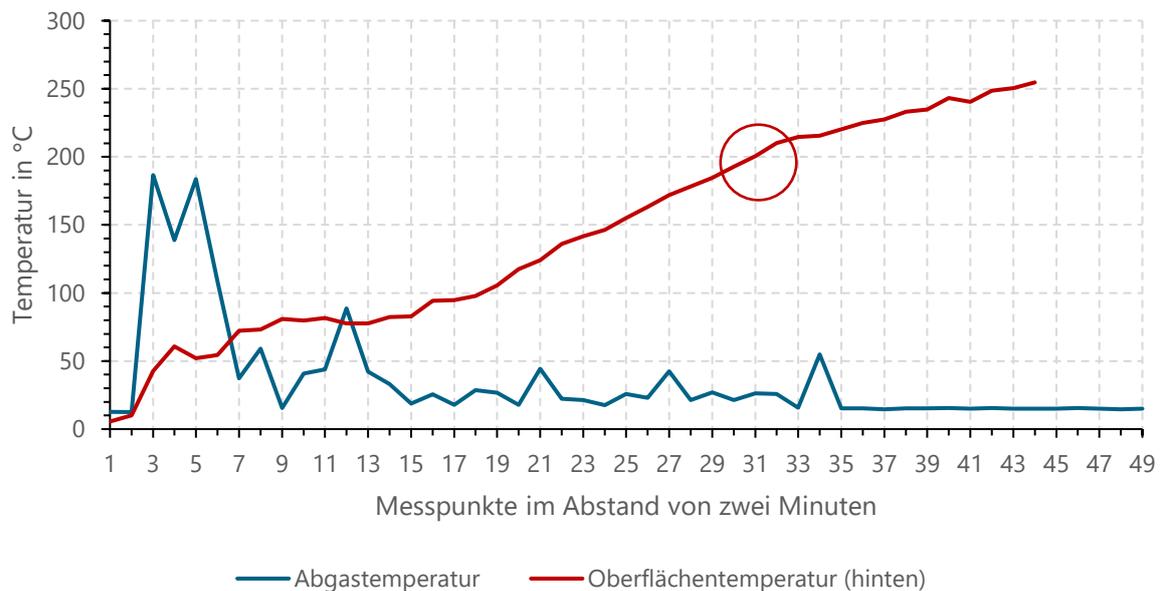
Die Rückseite der Probe erwärmt sich so stark, dass sie nicht mehr mit der bloßen Hand berührt werden kann. Aufgrund eines Kalibrierfehlers des Infrarot-Thermometers testo 805i sind die gemessenen Werte leider nicht verwertbar. Nach Ablauf der Versuchsdauer von 60 Minuten ist deutlich zu erkennen, dass die Oberfläche der Lehmtafel wie erwartet gebrannt ist. Dies scheint bis zu einer Tiefe von ca. zwei Zentimetern der Fall zu sein. Für die Druckfestigkeitsprüfung werden Würfel aus der Lehmtafel geschnitten, anhand derer sich auch die Verkohlungstiefe genauer bestimmen lässt.

Während der gesamten Versuchsdauer ist keine Rauchentwicklung oder Flammenbildung festzustellen. Ein Nachglühen kann nicht beobachtet werden. Es fallen kleinere Lehmbrocken an den Ecken ab, dies ist jedoch eher auf die unzureichende Verdichtung als auf die Beflammung zurückzuführen.

Abbildung 122 zeigt die Abgastemperatur (blau) und den Oberflächentemperaturverlauf (rot), gemessen auf der Rückseite der Lehmtafel. Die Oberflächentemperatur verläuft in den ersten 30 Minuten nahezu konstant und steigt dann deutlich an. Auch nach entfernen der Flamme bei Messpunkt 31 (roter Kreis) steigt die Temperatur weiter.

Auch nach drei Stunden ist die Lehmtafel noch nicht merklich abgekühlt. Das Berühren mit der bloßen Hand ist nur kurz möglich.

Abbildung 122: Verlauf der Abgastemperatur sowie der Oberflächentemperatur von Probe 2 in °C.



Quelle: eigene Darstellung 2023

### Probe 3: LG70K30W5ST3

**Lehmtafel 3** ähnelt in der Oberflächenstruktur und der Haptik der Lehmtafel 1 und wird wie bereits erläutert in den Versuchsstand eingebracht und ausgerichtet. Da Lehmtafel 2 nach der Prüfung der Feuerwiderstandsklasse F60 keine erkennbaren Schäden aufweist, wird die Prüfdauer für Lehmtafel 3 auf 90 Minuten erhöht.

Im Zentrum der Flamme beginnt die Lehmtafel bereits nach wenigen Minuten leicht zu glimmen, was nach ca. 30 Minuten wieder nachlässt (Abbildung 123, links). Die Temperatur auf der Rückseite steigt langsam an, bis sie sich bei ca. 60 °C einpendelt. Dieser Anstieg setzt sich auch nach Beendigung der Beflammung fort. Der Temperaturverlauf wird mit dem Infrarot-Thermometer testo 805i und dem Datenlogger testo 444 aufgezeichnet. Aufgrund eines Speicherfehlers können diese Daten jedoch nicht mehr abgerufen werden. Die regelmäßige Kontrolle der Messungen aufgrund früherer Ausfälle der Messtechnik ermöglicht zumindest eine rudimentäre Rekonstruktion der Erwärmung. Die Rückseite der Lehmtafel wird in unregelmäßigen Abständen von den Ausführenden mit der Hand berührt, um die angezeigte Temperatur zu überprüfen. Eine Aufzeichnung der Abgastemperatur liegt für 31 Messpunkte im Abstand von zwei Minuten vor.

Während der Beflammung konnte keine Rauchentwicklung oder Entzündung festgestellt werden. Ein Nachglimmen konnte nicht beobachtet werden. Es sind keine Teile der Probe abgefallen. Die Oberfläche erscheint wie bei Lehmtafel 2 gebrannt (Abbildung 123, rechts).

Abbildung 123: Lehmtafel 3 während der Beflammung (links) und während der Abkühlphase (rechts).



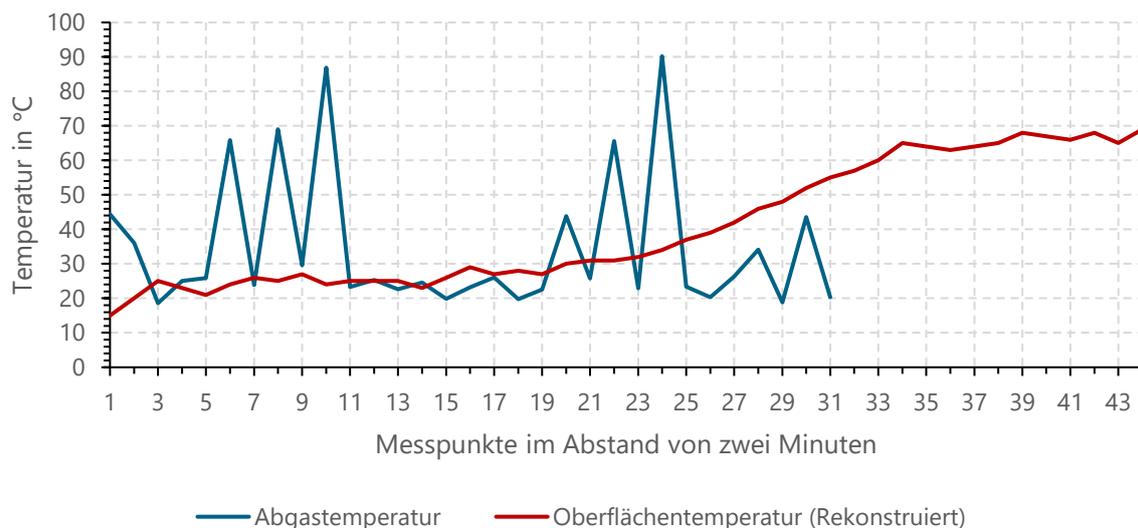
Foto: Zauke 2023



Foto: Zauke 2023

Nach dem Erlöschen der Flamme steigt die Temperatur auf der Rückseite der Lehmtafel noch einige Minuten an und bleibt dann für mindestens 30 Minuten konstant, siehe Abbildung 124. Nach etwa 60 Minuten wird die Probe aus dem Prüfstand genommen. Zu diesem Zeitpunkt ist sie noch sehr warm, aber nicht mehr heiß. Für die Druckfestigkeitsprüfung werden Würfel aus dem Lehmtafel geschnitten, anhand derer sich auch die Verkohlungstiefe genauer bestimmen lässt.

Abbildung 124: Verlauf der Abgastemperatur sowie der Oberflächentemperatur in °C von Probe 3.



Quelle: eigene Darstellung 2023

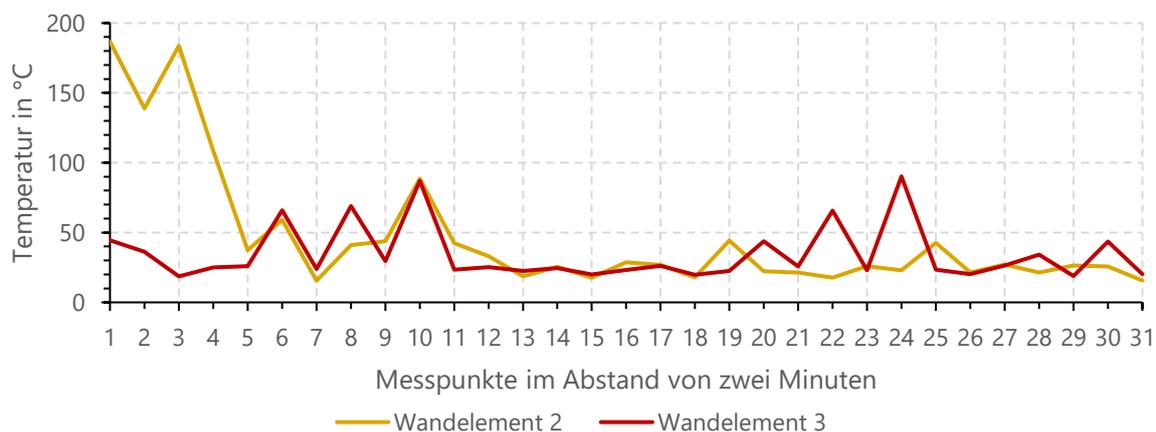
## Auswertung Untersuchungsreihe 2

Es kann festgestellt werden, dass keine der drei Proben Feuer gefangen hat. Es wird keine Rauchentwicklung beobachtet. Lediglich bei Probe 2 lösen sich Teile vom Probekörper, was jedoch auf die grundsätzliche Beschaffenheit des Probekörpers und nicht auf die Brandbelastung zurückzuführen ist. Alle Proben glühen im Flammkern ca. 20 Minuten, danach ist kein Glühen mehr erkennbar. Es ist möglich, dass es sich um Korkschröt handelt, dass nur eine geringe Bedeckung mit Lehm aufweist. Es fallen keine glühenden Partikel von der Probe ab.

Eine Rauchentwicklung wurde bei keiner Probe beobachtet, die Abgastemperatur ist bis auf windbedingte Schwankungen konstant. Für Lehmtafel 1 wurde die Abgastemperatur nicht aufgezeichnet. Die Abgastemperaturverläufe für Lehmtafel 2 (gold) und 3 (rot) sind in Abbildung 125 dargestellt.

Auf der Abszisse sind die Messpunkte im Abstand von zwei Minuten aufgetragen, auf der Ordinate die Temperatur in °C. Die Werte liegen im normalen Bereich für die Verbrennung von Propangas, eine Entwicklung anderer Gase scheint nicht vorzuliegen.

Abbildung 125: Verlauf der Abgastemperatur für die Lehmtafeln 2 und 3 in °C.



Quelle: eigene Darstellung 2023

Die in Abbildung 126 dargestellten Graphen der Oberflächentemperatur sind mit Vorsicht zu betrachten. Auf der Abszisse sind die Messpunkte im Abstand von 2 Minuten aufgetragen, auf der Ordinate die Temperatur in °C. Die blaue Kurve zeigt die Oberflächentemperatur von Lehmtafel 1, dieser Versuch wurde am 08.03.2023 durchgeführt. Die rot gestrichelte Kurve stellt Lehmtafel 3 dar, die Daten wurden nicht gespeichert. Die Werte wurden während der Versuchsdurchführung analog abgelesen (allerdings in größeren Zeitabständen), da das Messgerät mehrfach ausfiel. Die Werte von Lehmtafel 2 (Gold) sind nicht verwertbar, da sie aufgrund eines Kalibrierungsfehlers falsch sind. So konnte die Lehmtafel bei einer angeblichen Oberflächentemperatur von 240 °C noch problemlos mit der bloßen Hand berührt werden.

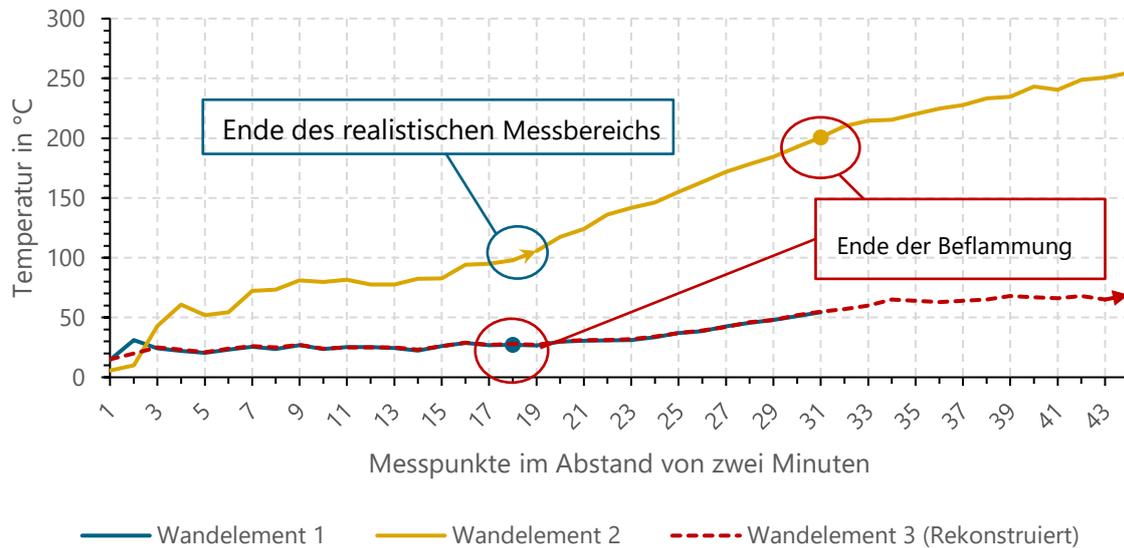
Die Oberflächentemperatur (Rückseite) steigt schnell an und bleibt dann während der Beflammung konstant. Während der Abkühlphase steigt die rückseitige Temperatur deutlich an.

Trotz der ausgefallenen Messtechnik lassen sich aus dem Versuch wertvolle Erkenntnisse ziehen:

Die Oberflächentemperatur (hinten) steigt schnell an und bleibt dann während der Beflammung konstant. Die roten Kreise in Abbildung 126 markieren das Ende der Beflammung von Lehmtafel 1 (blau) und Lehmtafel 2 (gold). Das Ende der Beflammung von Lehmtafel 3 (rot) liegt außerhalb des dargestellten Bereichs. Obwohl die Absolutwerte der Oberflächentemperatur von Lehmtafel 2 nicht der

Realität entsprechen, zeigt die goldene Kurve den Temperaturanstieg nach dem Entfernen der Flamme. Nach dem ersten Anstieg bleibt die Temperatur für etwa eine halbe Stunde konstant und beginnt dann wieder zu steigen. Während der Abkühlphase steigt die Rückseitentemperatur weiter deutlich an. Die Wärme bleibt lange gespeichert. Lehmtafel 2 ist auch nach mehreren Stunden nicht merklich abgekühlt.

Abbildung 126: Verlauf der Oberflächentemperatur (hinten) für die Lehmtafeln 1, 2 und 3 in °C.



Quelle: eigene Darstellung 2023

Keine der Lehmtafeln weist optische Schäden auf, die auf die Brandbeanspruchung zurückzuführen wären. Es bleibt abzuwarten, ob sich die Erhöhung der Beflammungsdauer von 30 Minuten auf 90 Minuten in der Verkohlungstiefe widerspiegelt. (Stand 28.02.2023)

Die Ergebnisse und Beobachtungen dieser Versuche sind in Tabelle 51 zusammengestellt.

Tabelle 51: Zusammenfassung der Messungen und Beobachtungen.

Lehmtafel	1 (F30)	2 (F60)	3 (F90)
Entflammung	nein	nein	nein
Abgastemperatur	konstant	konstant	konstant
Flammhöhe	konstant	konstant	konstant
Glühen im Flammkern	hört nach ca. 20 Minuten auf	hört nach ca. 20 Minuten auf	hört nach ca. 20 Minuten auf
Qualmentwicklung	nein	nein	nein
Verkohlung	35 mm	70 mm	37 mm
Oberfläche gebrannt	ja	ja	ja
Oberflächentemperatur (hinten)	steigend	steigend	steigend

Quelle: eigene Darstellung 2023

## Druckfestigkeit

Die Probekörper werden während der Versuche zur Klassifizierung der Baustoffklasse und der Feuerwiderstandsklasse einseitig einer Brandbeanspruchung ausgesetzt. Eine Druckfestigkeitsprüfung an den verbrannten Probekörpern soll zeigen, ob sich die Druckfestigkeit und das Bruchbild im Vergleich zu früheren Druckversuchen verändert haben.

## Versuchsaufbau

Die Druckfestigkeitsprüfung wird analog zu den Versuchen im Kapitel "Druckfestigkeitsprüfung", Untersuchungsreihe 4, mit der Universalprüfmaschine der Firma Zwick/Roell durchgeführt. Die Vorlast (250 N), die Belastungsgeschwindigkeit (0,05 MPa/s) und das Versagenskriterium ( $\epsilon = 10\%$ ) werden übernommen.

Die ersten Prüfungen finden am 17.03.2023 im Betonlabor der Bauhaus-Universität Weimar statt. Es werden die Probekörper 1 und 2 aus dem Tragschichtgemisch und die Probekörper 4 und 5 aus dem Dämmschichtgemisch untersucht. Die Eigenschaften der Probekörper sind in Tabelle 52 angegeben.

Die Proben 3 und 6 werden zur Überprüfung der Vorkohlungstiefe in der MFPA Weimar aufgeschnitten.

Aus den Lehmtafeln werden vor der Druckfestigkeitsprüfung Würfel herausgeschnitten. Angestrebt werden Würfel mit den Abmessungen 150 x 150 x 150 mm. Von besonderem Interesse sind die Würfel in der Mitte der jeweiligen Lehmtafel, da sich diese im Zentrum der Flammen befanden. Die Versuche finden am 30.03.2023 im Betonlabor der Bauhaus-Universität Weimar statt.

## Versuchsdurchführung

Die Probekörper werden, wie in Abbildung 127 dargestellt, in die Universalprüfmaschine eingelegt und einer einachsigen Belastung ausgesetzt, bis sie versagen.

Abbildung 127: Probe 1 (LG70K30W5ST3) Links vor der Belastung, rechts nach der Belastung.



Foto: Zauke 2023



Foto: Zauke 2023

Geprüft werden aus der Versuchsreihe zur Klassifizierung der Baustoffklasse die Proben P1, P2, P4 und P5. Als Referenz dienen die Probekörper PK 1 aus Untersuchungsreihe 4 (vgl. S. 100) vom 31.03.2022 und PK3 aus Untersuchungsreihe 2 (vgl. S. 89) vom 18.01.2022. Die Referenzprobekörper entsprechen

in ihrer Rezeptur den hier untersuchten Proben. Die Abmessungen sowie das Gewicht der Proben und das Raumgewicht der Mischungen sind in Tabelle 52 zusammengefasst.

Tabelle 52: Übersicht zu den Eigenschaften der untersuchten Proben sowie der Referenzprobekörper.

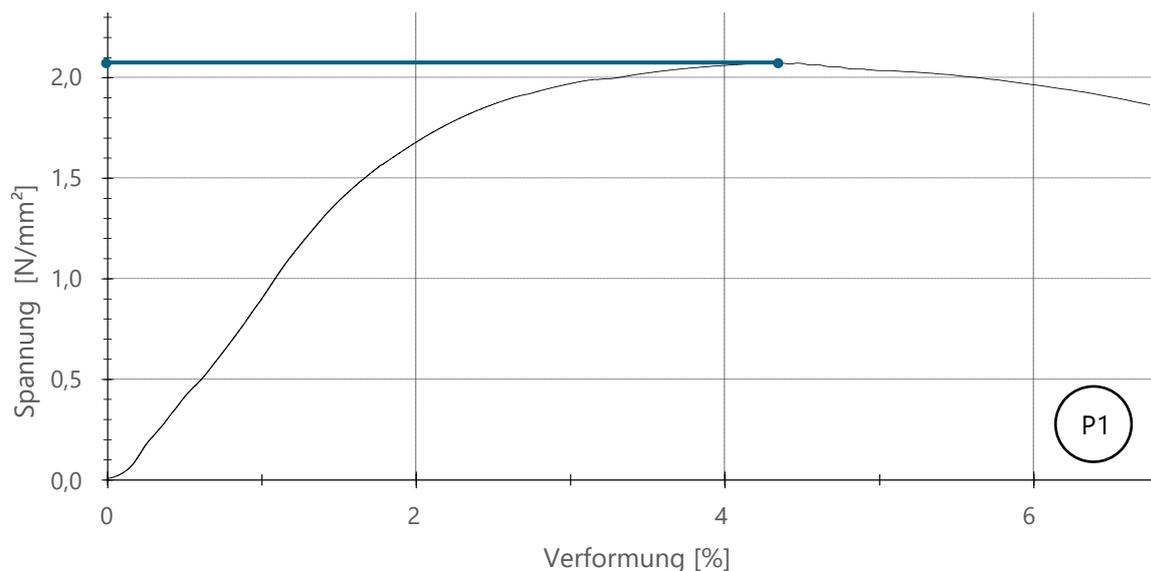
Bezeichnung	Gewicht [kg]	Raumgewicht [kg/m <sup>3</sup> ]	Abmessungen		
			b [mm]	h [mm]	d [mm]
P1	13,57	1739,74	200	195	200
P2	13,93	1785,90	200	195	200
PK1	1,740	1715,00	101,2	100	99,5
P4	9,00	1136,37	200	198	200
P5	10,04	1267,68	200	198	200
PK3	8,99	1134,00	199,2	200	199,0

Quelle: eigene Darstellung 2023 nach dem Prüfprotokoll vom 17.03

### Tragschichtmischung

An der Vorderseite des Probekörpers 1 fallen große, stark verkohlte Stücke ab. An den Seiten bilden sich Risse und kegelförmige Abplatzungen. An der Ober- und Unterseite des Probekörpers treten nur geringe Schäden auf. Probe 1 erreicht unter dem oben genannten Belastungsregime eine Druckfestigkeit von 2,1 N/mm<sup>2</sup>, bei einer maximalen Druckkraft von 81.732,9 N. Abbildung 127- links zeigt Probe 1 vor der Belastung auf der rechten Seite ist die Probe nach der Belastung zu sehen. Abbildung 128 zeigt den Spannungs-/ Dehnungsverlauf von Probe 1.

Abbildung 128: Spannungs-/ Dehnungskurve von Probekörper 1 (1-LG70K30W5ST3) nach dem Brandversuch.



Quelle: eigene Darstellung 2023 nach dem Prüfprotokoll vom 17.03

Probe 2 erreicht eine Druckfestigkeit von  $2,0 \text{ N/mm}^2$ . Die maximale Druckkraft liegt bei  $80.714,5 \text{ N}$ . Es fallen, wie bei Probe 1 große Teile von der verkohlten Vorderseite ab. An den Seiten bilden sich starke Risse und kegelförmige Abplatzungen. In Abbildung 129 ist auf der linken Seite Probe 2 vor der Belastung und auf der rechten Seite nach der Belastung zu sehen. Abbildung 130 zeigt den Spannungs- / Dehnungsverlauf von Probe 2.

Abbildung 129: Probe 2 (2-LG70K30W5ST3) Links vor der Belastung, rechts nach der Belastung.

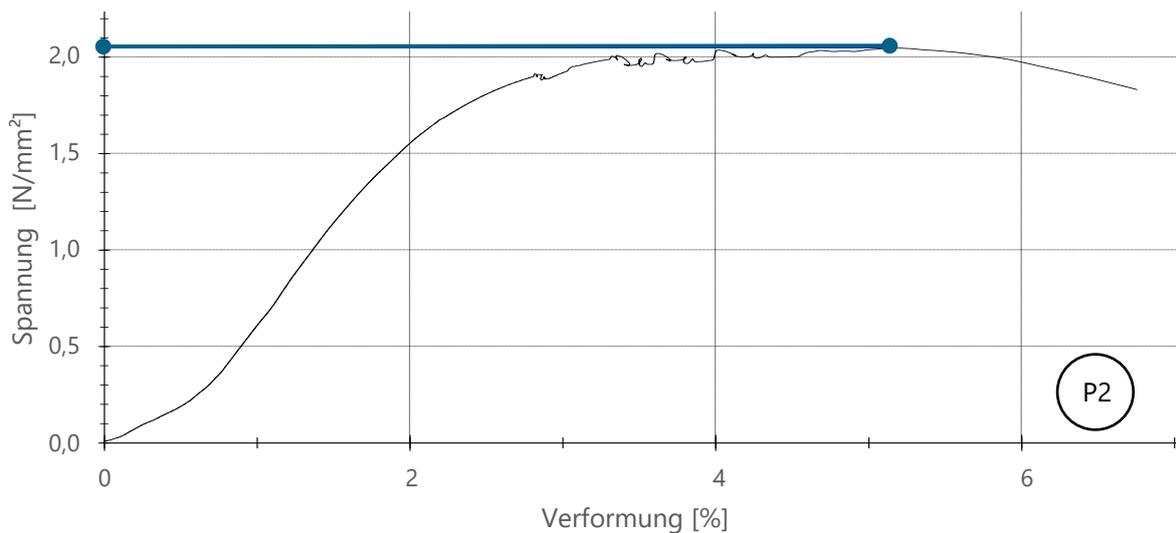


Foto: Zauke 2023



Foto: Zauke 2023

Abbildung 130: Spannungs- / Dehnungskurve von Probekörper 2 (2-LG70K30W5ST3) nach dem Brandversuch.



Quelle: eigene Darstellung 2023 nach dem (Prüfprotokoll vom 17.03)

### **Dämmschichtmischung**

Das Bruchbild von Probe 4 sieht dem der Proben 1 und 2 sehr ähnlich. Auch hier fallen große Stücke Material von der verkohlten Seite ab. An den Seiten bilden sich starke Risse und kegelförmige Abplatzungen. Die gemessene Dehnung ist fast doppelt so groß wie bei den Tragschichtproben. Die Dämmschichtmischung verhält sich wesentlich flexibler. unter dem oben genannten Lastregime erreicht Probe 4 eine Druckfestigkeit von  $1,0 \text{ N/mm}^2$ , bei einer Höchstlast von  $39.905,1 \text{ N}$ . Abbildung 131 zeigt auf der linken Seite Probe 4 vor der Belastung, auf der rechten Seite nach der Belastung. Abbildung 132 zeigt den ermittelten Spannungs-/ Dehnungsverlauf von Probe 4.

Abbildung 131: Probe 4 (1-LG40K60W12.5ST1.5). Links vor der Belastung, rechts nach der Belastung.

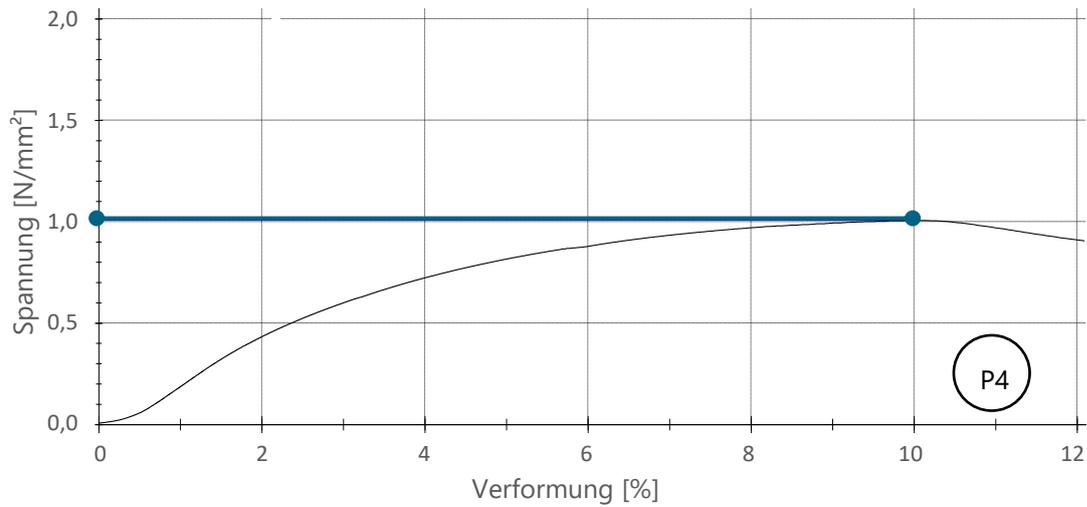


Foto: Zauke 2023



Foto: Zauke 2023

Abbildung 132: Spannungs-/ Dehnungskurve von Probekörper 4 (1-LG40K60W12.5ST1.5) nach dem Brandversuch.



Quelle: eigene Darstellung 2023 nach dem (Prüfprotokoll vom 17.03)

Von Probe 5 fallen seitlich große Stücke ab. Diese Probe scheint insgesamt stärker lädiert zu sein als die vorherigen. Dennoch erreicht Probe 5 mit  $1,3 \text{ N/mm}^2$  eine höhere Druckfestigkeit als Probe 4. Auch die Höchstlast liegt mit  $50.154,6 \text{ N}$  deutlich höher. Abbildung 133 zeigt auf der linken Seite die Probe 5 vor der Belastung, auf der rechten Seite ist dieselbe Probe nach der Belastung zu sehen. Abbildung 134 zeigt den ermittelten Spannungs-/ Dehnungsverlauf von Probe 5.

Abbildung 133: Probe 5 (2-LG40K60W12.5ST1.5). Links vor der Belastung, rechts nach der Belastung.

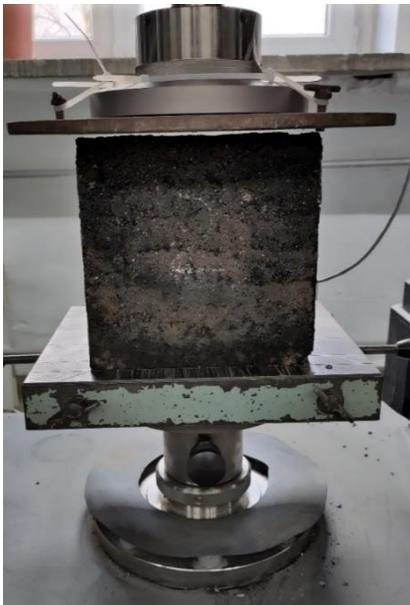
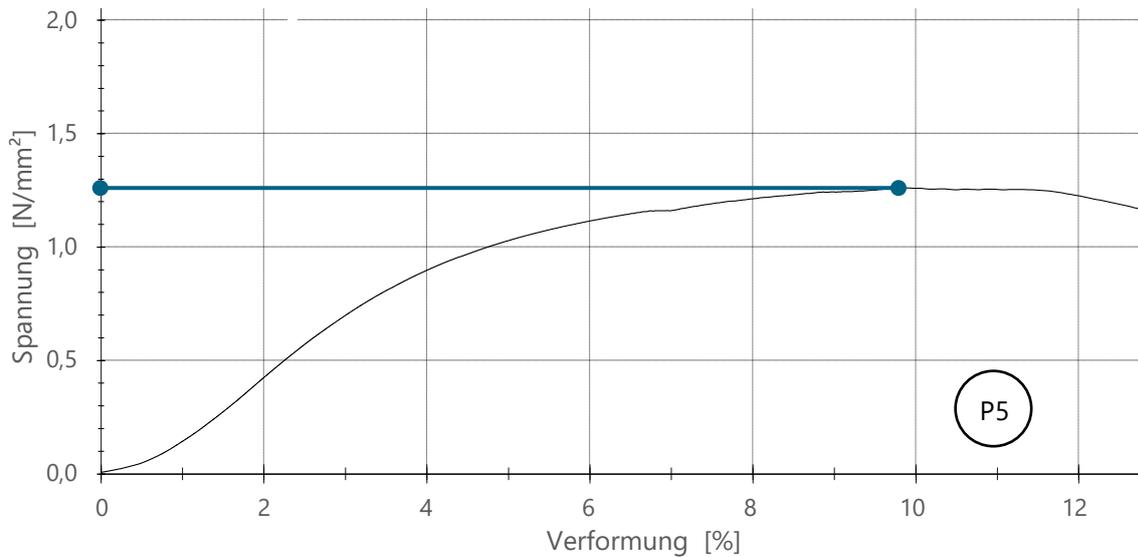


Foto: Zauke 2023



Foto: Zauke 2023

Abbildung 134: Spannungs-/ Dehnungskurve von Probekörper 4 (2-LG40K60W12.5ST1.5) nach dem Brandversuch.



Quelle: eigene Darstellung 2023 nach dem (Prüfprotokoll vom 17.03)

In Tabelle 53 sind die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung vom 17.03.2023 unter Angabe von Raumgewicht in  $\text{kg/m}^3$ , der max. Druckkraft in N, der Druckfestigkeit in  $\text{N/mm}^2$  sowie der Prüffläche in mm zusammengefasst.

Tabelle 53: Zusammenfassung der Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung nach dem Brandversuch.

	Raumgewicht [ $\text{kg/m}^3$ ]	max. Druckkraft $F_c$ [N]	Druckfestigkeit $R_c$ [ $\text{N/mm}^2$ ]	Prüffläche	
				b [mm]	d [mm]
P1	1739,74	81732,9	2,1	200	199,2
P2	1785,90	80714,5	2,0	198,6	198,5
P4	1136,37	39905,1	1,0	198,6	199,5
P5	1267,68	50154,6	1,3	199,4	199,5

Quelle: eigene Darstellung 2023 nach dem (Prüfprotokoll vom 17.03)

### Lehmtafeln

Für die Druckfestigkeitsprüfung der Lehmtafeln am 30.03.2023 im Betonlabor der Bauhaus-Universität Weimar wurden jeweils aus der Mitte der Wandelemente Würfel herausgeschnitten. Die ursprüngliche Lage der Würfel in der Lehmtafel ist in Abbildung 135 rot markiert.

Abbildung 135: Lage der Untersuchten Proben in den Lehmtafeln 1,2 und 3.

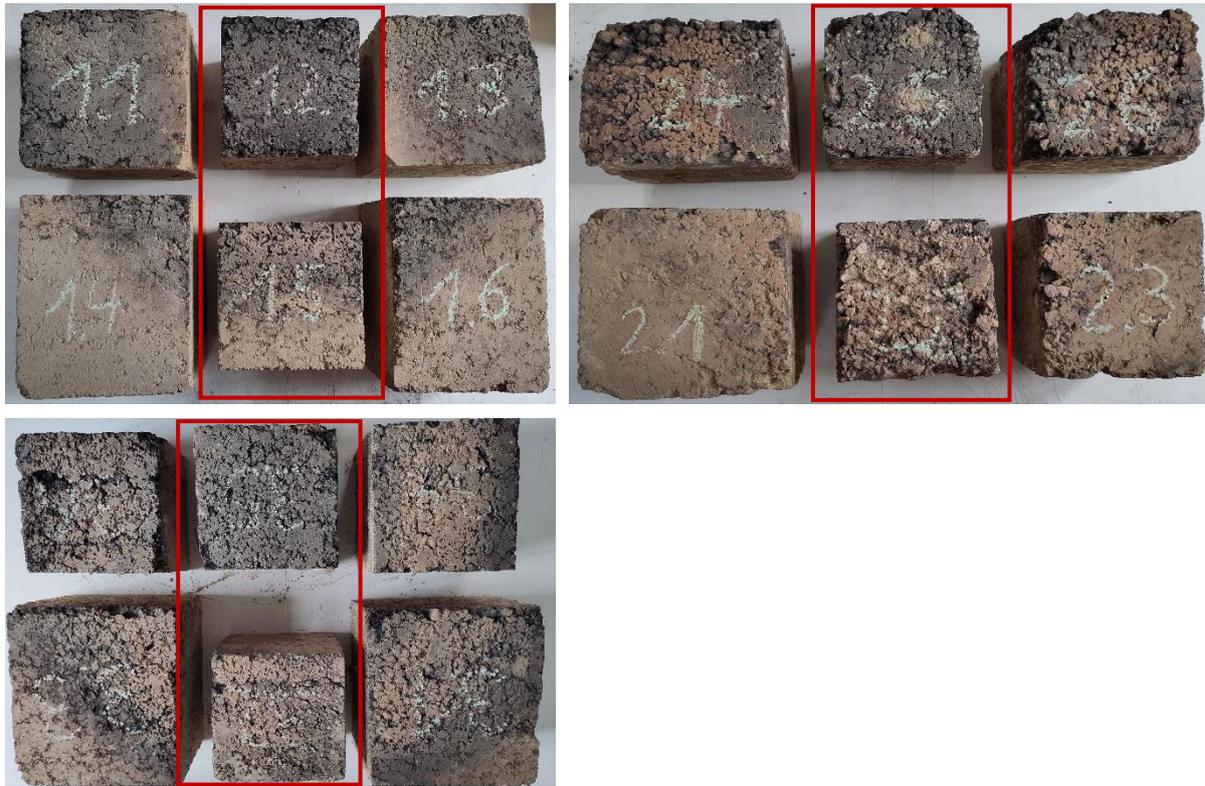


Foto: Zauke 2023

Tabelle 54 weist jedem Probekörper einen Namen mit Bezug auf die ursprüngliche Lehmtafel, das Gewicht in kg, und die Abmessungen in mm zu. Das Raumgewicht in  $\text{kg/m}^3$  ergibt sich aus dem Gewicht und den Abmessungen. Da die Würfel nicht ganz winklig sind und die Ecken teilweise abgestoßen sind, sollte das Raumgewicht lediglich als Orientierungswert dienen. Die Proben P2.2 und P2.5 sind deutlich schwerer als die anderen. Dies ist auch schon beim Einsetzen in den Versuchsstand zur Klassifizierung der Feuerwiderstandsklasse aufgefallen. Beim Aufschneiden von Lehmtafel 2 ist aufgefallen, dass der Anteil an grober Gesteinskörnung höher ist als bei Lehmtafel 1 und 3.

Die Probewürfel werden wie oben beschrieben auf ihre Druckfestigkeit in  $\text{N/mm}^2$  geprüft.

Tabelle 54: Eigenschaften der Probekörper aus den Lehmtafeln.

Bezeichnung	Gewicht [kg]	Raumgewicht [ $\text{kg/m}^3$ ]	Abmessungen		
			b [mm]	h [mm]	d [mm]
P1.2	5,00	1419	145,2	152,9	152,2
P1.5	5,35	1425	146,7	153,6	155,7
P2.2	7,13	2061	156,7	150,0	147,2
P2.5	6,49	1876	153,8	148,2	151,7
P3.2	4,92	1524	145,2	148,0	150,2
P3.5	4,99	1519	146,8	148,5	150,7

Quelle: eigene Darstellung nach dem Prüfprotokoll vom 30.03

Von Probe 1.2 fällt auf der Vorderseite großflächig verkohltes Material ab. Es bilden sich an den Seiten leichte Risse. Ansonsten wirkt der Würfel unversehrt. P1.2 erreicht eine Druckfestigkeit von  $2,3 \text{ N/mm}^2$  bei einer Höchstlast von  $49.913,7 \text{ N}$ . Abbildung 136 zeigt auf der linken Seite die Probe 1.2 vor der Belastung, auf der rechten Seite ist dieselbe Probe nach der Belastung zu sehen. Abbildung 137 zeigt den ermittelten Spannungs-/ Dehnungsverlauf von Probe 1.2.

Abbildung 136: Probe 1.2 aus Lehmtafel 1 vor der Belastung (links) und nach der Belastung (rechts).

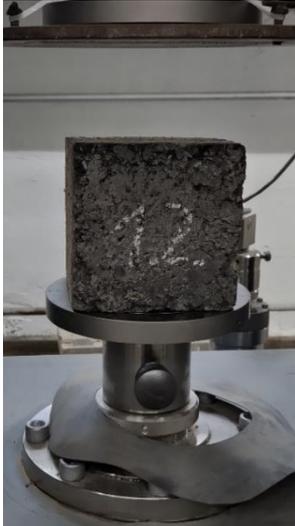
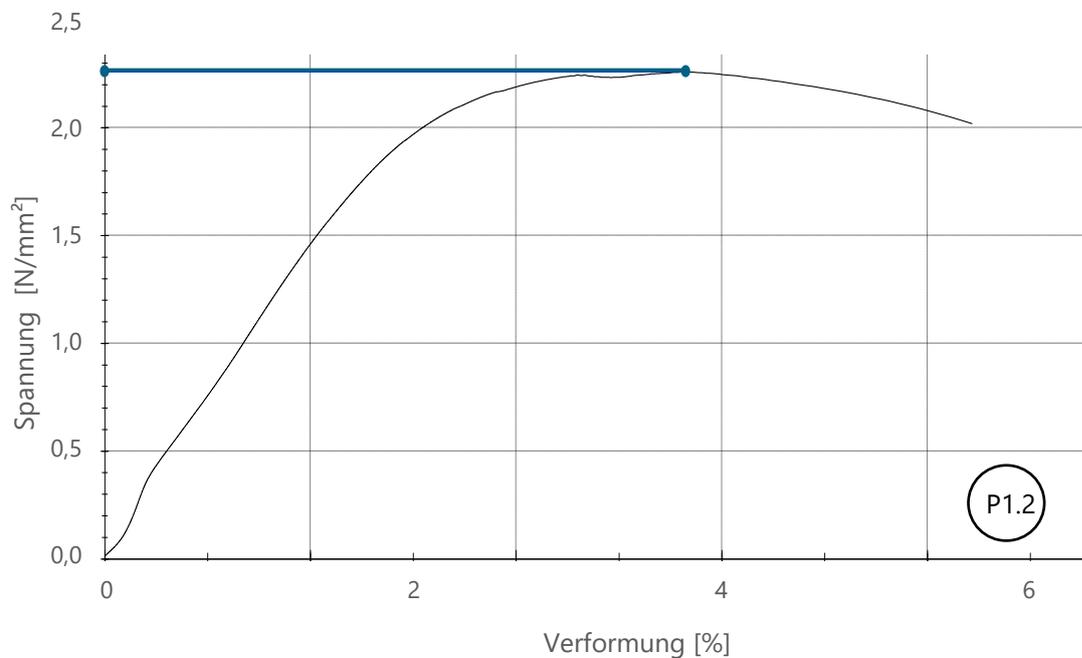


Foto: Zauke 2023



Foto: Zauke 2023

Abbildung 137: Spannungs-/ Dehnungsdiagramm von Probe 1.2 nach dem F30 Feuerwiderstandsversuch.



Quelle: eigene Darstellung 2023 nach dem (Prüfprotokoll vom 30.03)

Von Probe 1.5 fällt auf der Vorderseite großflächig verkohltes Material ab. An den Seiten bilden sich Risse und kegelförmigen Abplatzungen. P1.2 erreicht eine Druckfestigkeit von  $2,3 \text{ N/mm}^2$  bei einer Höchstlast von  $52.419,6 \text{ N}$ . Abbildung 138 zeigt auf der linken Seite die Probe 1.5 vor der Belastung, auf der rechten Seite ist dieselbe Probe nach der Belastung zu sehen. Abbildung 139 zeigt den ermittelten Spannungs-/ Dehnungsverlauf von Probe 1.5.

Abbildung 138: Probe 1.5 aus Lehmtafel 1 vor der Belastung (links) und nach der Belastung (rechts).

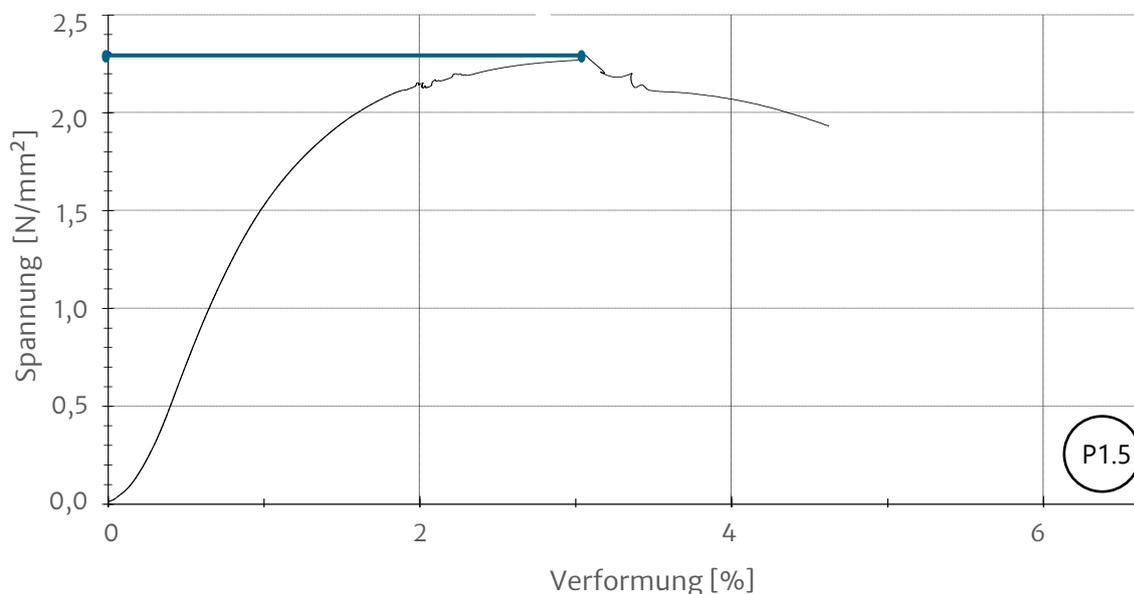


Foto: Zauke 2023



Foto: Zauke 2023

Abbildung 139: Spannungs-/ Dehnungsdiagramm von Probe 1.5 nach dem F30 Feuerwiderstandsversuch.



Quelle: eigene Darstellung 2023 nach dem (Prüfprotokoll vom 30.03)

An den Seiten von Probe 2.2 bilden sich ausgeprägte kegelförmige Abplatzungen. Das Bruchbild weist eine deutliche Ähnlichkeit mit dem eines Betonwürfels auf. Anders als der Name vermuten lässt, stammt der Probekörper nicht aus dem oberen Bereich des Wandelements 2, sondern aus dem unteren. P2.2

erreicht eine Druckfestigkeit von  $2,2 \text{ N/mm}^2$  bei einer Höchstlast von  $51.000,8 \text{ N}$ . Abbildung 140 zeigt auf der linken Seite die Probe 2.2 vor der Belastung, auf der rechten Seite ist dieselbe Probe nach der Belastung zu sehen.

Abbildung 141 zeigt den ermittelten Spannungs-/ Dehnungsverlauf von Probe 2.2.

Abbildung 140: Probe 2.2 aus Lehmtafel 2 vor der Belastung (links) und nach der Belastung (rechts).

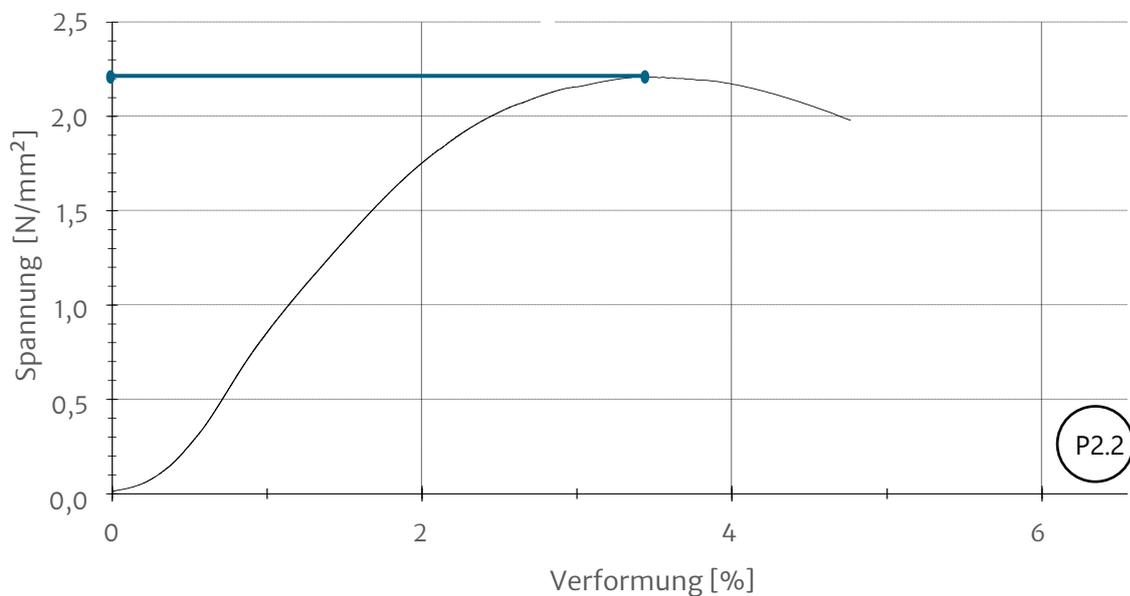


Foto: Zauke 2023



Foto: Zauke 2023

Abbildung 141: Spannungs-/ Dehnungsdiagramm von Probe 2.2 nach dem F60 Feuerwiderstandsversuch.



Quelle: eigene Darstellung 2023 nach dem Prüfprotokoll vom 30.03

Probe 2.5 wurde aus dem oberen Teil von Lehmtafel 2 herausgeschnitten. Der Würfel fällt Aufgrund der Belastung fast vollständig auseinander. Mit einer Druckfestigkeit von  $1,5 \text{ N/mm}^2$  bei einer Höchstlast von  $35.377,7 \text{ N}$  weicht diese Probe deutlich von den anderen ab. Abbildung 142 zeigt auf der linken

Seite die Probe 2.5 vor der Belastung, auf der rechten Seite ist dieselbe Probe nach der Belastung zu sehen.

Abbildung 143 zeigt den ermittelten Spannungs-/ Dehnungsverlauf von Probe 2.5.

Abbildung 142: Probe 2.5 aus Lehmtafel 2 vor der Belastung (links) und nach der Belastung (rechts).

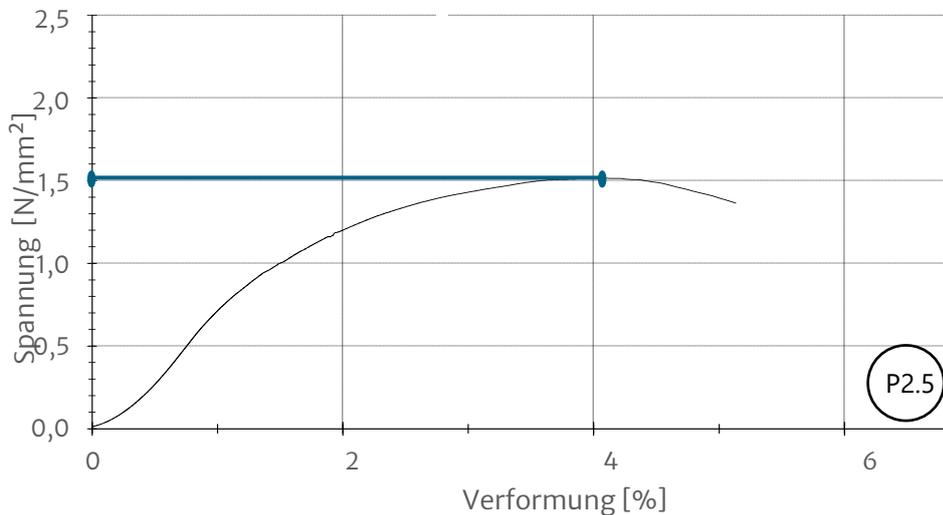


Foto: Zauke 2023



Foto: Zauke 2023

Abbildung 143: Spannungs-/ Dehnungsdiagramm von Probe 2.5 nach dem F60 Feuerwiderstandsversuch.



Quelle: eigene Darstellung 2023 nach dem Prüfprotokoll vom 30.03

Probe 3.2 weist auf der Vorderseite und auf der linken Seite ausgeprägte kegelförmige Abplatzungen auf. Alle anderen Seiten sind nahezu unbeschädigt. P3.2 erreicht eine Druckfestigkeit von 2,3 N/mm<sup>2</sup> bei einer Höchstlast von 50.270,8 N. Abbildung 144 zeigt auf der linken Seite die Probe 3.2 vor der Belastung, auf der rechten Seite ist dieselbe Probe nach der Belastung zu sehen.

Abbildung 145 zeigt den ermittelten Spannungs-/ Dehnungsverlauf von Probe 3.2.

Abbildung 144: Probe 3.2 aus Lehmtafel 3 vor der Belastung (links) und nach der Belastung (rechts).

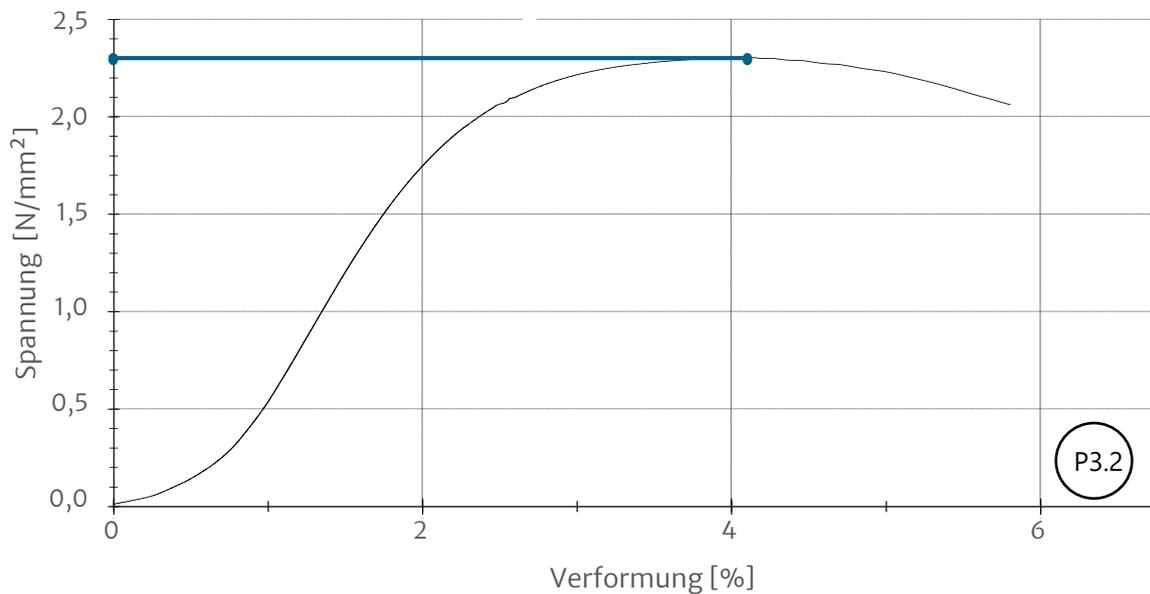


Foto: Zauke 2023



Foto: Zauke 2023

Abbildung 145: Spannungs-/ Dehnungsdiagramm von Probe 3.2 nach dem F90 Feuerwiderstandsversuch.



Quelle: eigene Darstellung 2023 nach dem Prüfprotokoll vom 30.03

Die verkohlte Vorderseite von Probe 3.5 fällt schollenartig ab. Die Seiten weisen leicht kegelförmige Abplatzungen auf. Alle anderen Seiten wirken weitgehend intakt. P3.5 erreicht eine Druckfestigkeit von 2,2 N/mm<sup>2</sup> bei einer Höchstlast von 49.581,4 N. Abbildung 146 zeigt auf der linken Seite die Probe 3.5 vor der Belastung, auf der rechten Seite ist dieselbe Probe nach der Belastung zu sehen.

Abbildung 147 zeigt den ermittelten Spannungs-/ Dehnungsverlauf von Probe 3.5.

Abbildung 146: Probe 3.5 aus Lehmtafel 3 vor der Belastung (links) und nach der Belastung (rechts).

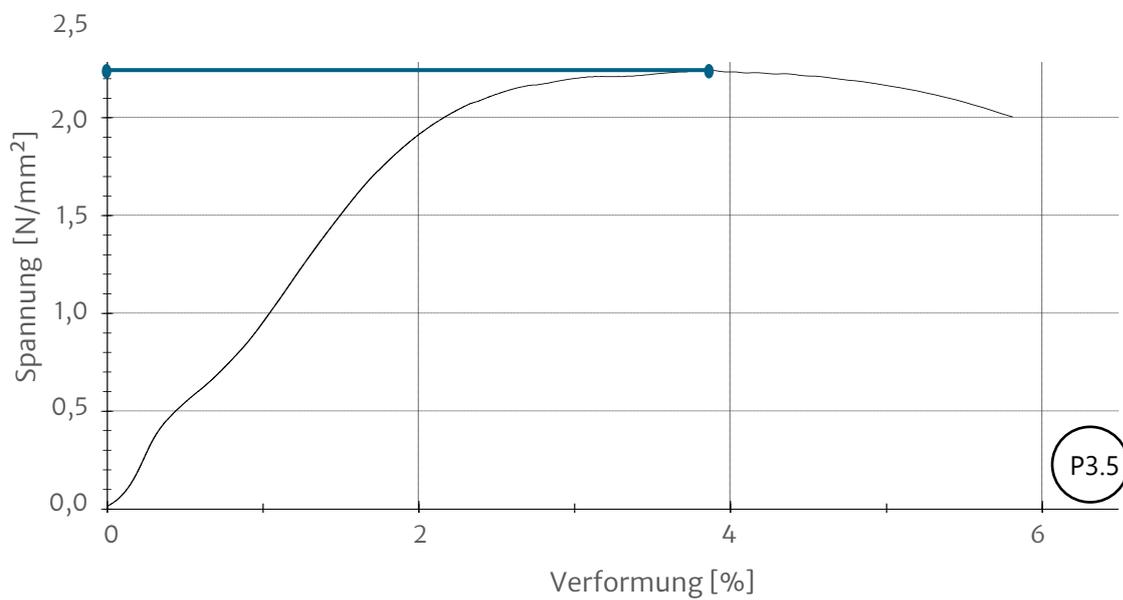


Foto: Zauke 2023



Foto: Zauke 2023

Abbildung 147: Spannungs-/ Dehnungsdiagramm von Probe 3.5 nach dem F90 Feuerwiderstandsversuch.



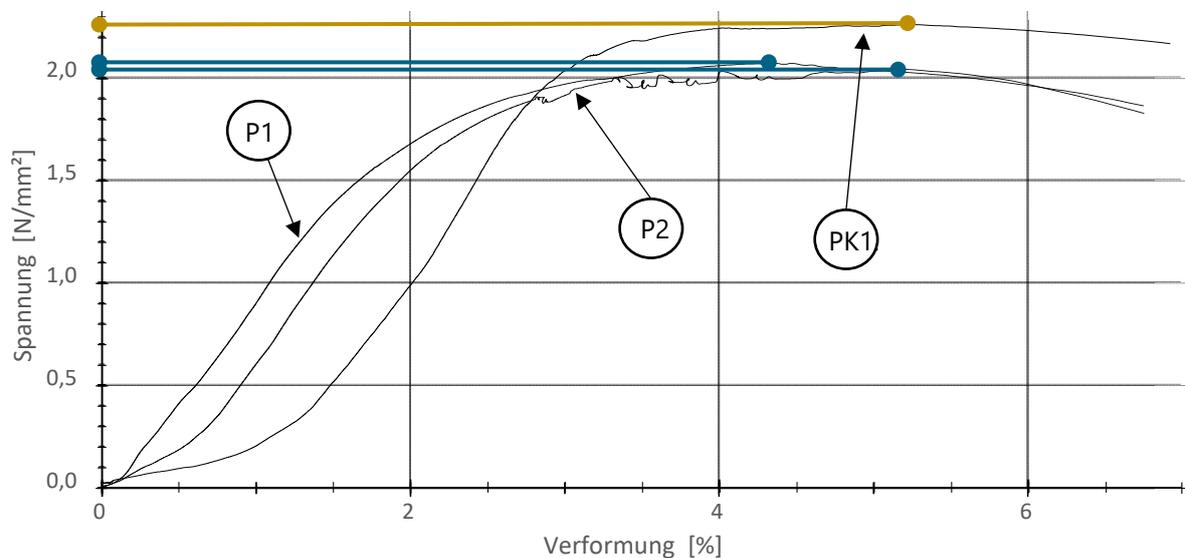
Quelle: eigene Darstellung 2023 nach dem Prüfprotokoll vom 30.03

## Auswertung

### Tragschichtmischung

Ein Vergleich der in Abbildung 148 dargestellten Druckfestigkeiten und der Spannungs-/ Dehnungskurven der Proben 1 und 2 (blau) mit den Ergebnissen der Druckfestigkeitsprüfung des Referenzprobekörpers (gold) zeigt, die beiden Proben aus dem Brandversuch eine etwas geringere Druckfestigkeit erreichen als der Referenzprobekörper. Der Unterschied von max.  $0,26 \text{ N/mm}^2$  ist jedoch marginal. Es wird geschlussfolgert, dass die 10-Minütige Brandbeanspruchung weder einen positiven noch einen negativen Einfluss auf die Druckfestigkeit hat.

Abbildung 148: Vergleich der Spannungs-/ Dehnungskurven aus der Druckfestigkeitsprüfung vom 17.03.2023 nach dem Brandversuch (blau) mit einem Referenzprobekörper (gold) aus einer ähnlichen Mischung aus der Druckfestigkeitsprüfung vom 31.03.2022.



Quelle: eigene Darstellung 2023 mit Daten aus dem Prüfprotokoll vom 17.03 und dem Prüfprotokoll vom 31.03.

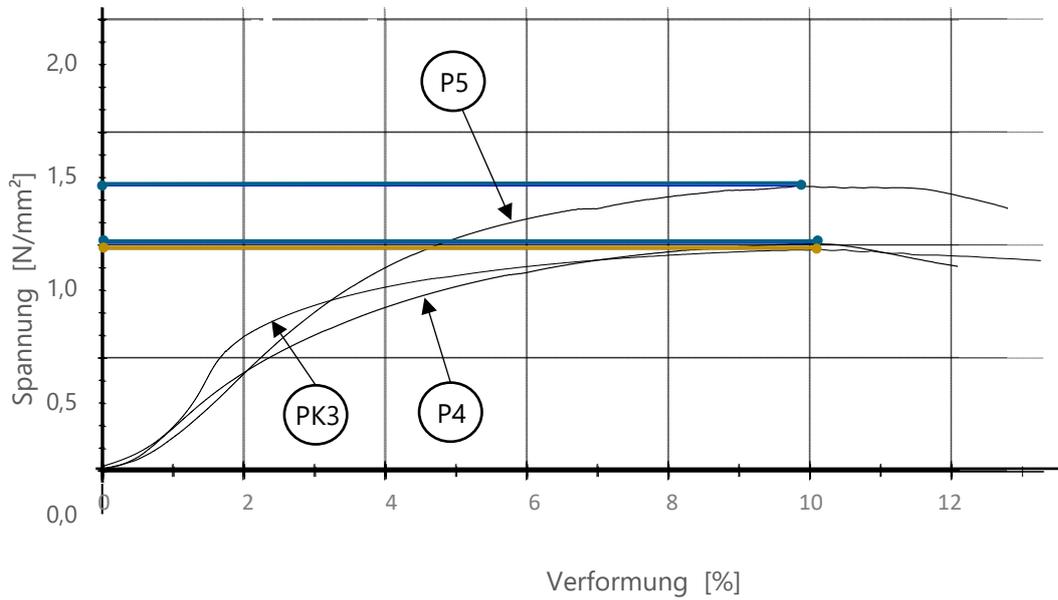
### Dämmschichtmischung

Andersherum verhält es sich bei den Druckfestigkeiten der Dämmschichtproben. Das in Abbildung 149 dargestellte Spannungs-/ Dehnungsdiagramm der Proben 4 und 5 (blau) sowie der des Referenzprobekörpers (gold) zeigt, dass die Druckfestigkeiten P4 mit  $1,0 \text{ N/mm}^2$  und P5 mit  $1,5 \text{ N/mm}^2$  höher ausfallen. Die Differenz ist jedoch nicht auf die Brandbeanspruchung, sondern auf das unterschiedliche Raumgewicht zurückzuführen.

Es kann gefolgert werden, dass die kurzfristige Brandbeanspruchung weder positive noch negative Auswirkungen auf die Druckfestigkeit der Probekörper hat.

In Tabelle 55 sind die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung vom 17.03.2023 und der Referenzprobekörper unter Angabe von Raumgewicht in  $\text{kg/m}^3$ , der max. Druckkraft in N, der Druckfestigkeit in  $\text{N/mm}^2$  sowie der Abmessungen der Prüffläche in mm zusammengefasst.

Abbildung 149: Vergleich der Spannungs-/ Dehnungskurven aus der Druckfestigkeitsprüfung vom 17.03.2023 nach dem Brandversuch (blau) mit einem Referenzprobekörper (gold) ähnlichen Mischung aus Druckversuchen vom 18.01.2022.



Quelle: eigene Darstellung 2023 mit Daten aus dem Prüfprotokoll vom 17.03 und dem Prüfprotokoll vom 18.01

Tabelle 55: Übersicht zu Gewicht, max. Druckkraft, Druckfestigkeit und Größe der Prüffläche der untersuchten Probekörper sowie der Referenzproben.

	Raumgewicht [kg/m³]	max. Druckkraft F <sub>c</sub> [N]	Druckfestigkeit R <sub>c</sub> [N/mm²]	Prüffläche	
				b [mm]	d [mm]
P1	1739,74	81732,9	2,1	200	199,2
P2	1785,90	80714,5	2,0	198,6	198,5
PK1*	1715,00	22715,1	2,26	101,2	99,5
P4	1136,37	39905,1	1,0	198,6	199,5
P5	1267,68	50154,6	1,3	199,4	199,5
PK3**	1134,00	38.545,1	0,97	199,2	199,0

\* als Referenz dient PK 1 (LG70K30W5T3) aus der Druckfestigkeitsprüfung vom 31.03.2022, siehe Tabelle 27, Untersuchungsreihe 4

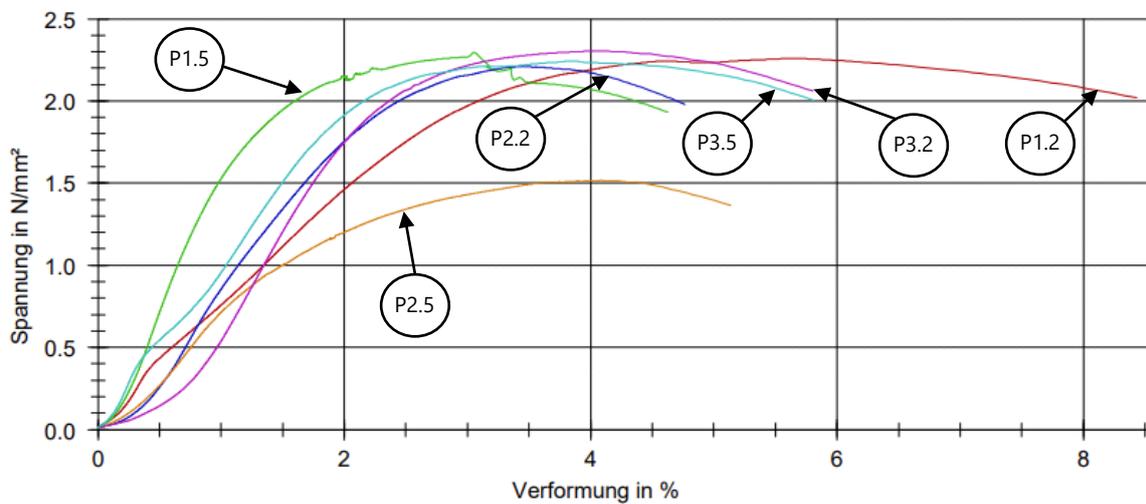
\*\* als Referenz dient PK 3 (LG40K60W12.5S) aus der Druckfestigkeitsprüfung vom 18.01.2022, siehe Tabelle 21, Untersuchungsreihe 2

Quelle: eigene Darstellung 2023 nach dem Prüfprotokoll vom 30.03, dem Prüfprotokoll vom 31.03. und dem (Prüfprotokoll vom 18.01)

## Lehmtafel

Die untersuchten Proben aus den Lehmtafeln erreichen, mit Ausnahme von Probe 2.5, eine Druckfestigkeit mindestens 2,2 N/mm<sup>2</sup> (vgl. Abbildung 150). Der Referenzprobekörper PK 1 lag bei 2,26 N/mm<sup>2</sup>. Die Dauer der Brandbeanspruchung hat keinen messbaren Einfluss auf die Druckfestigkeit. Die Proben wurden wie in der Versuchsdurchführung (ab S. 171) beschrieben 30 bis 90 Minuten dem Feuer ausgesetzt. Die Brandbeanspruchung hat keinen messbaren Einfluss auf die Druckfestigkeit. Das Probe 2.5 lediglich eine Druckfestigkeit von 1,5 N/mm<sup>2</sup> erreicht, obwohl sie aus derselben Lehmtafel stammt wie Probe 2.2 mit einer Druckfestigkeit von 2,2 N/mm<sup>2</sup>, wird auf die schlechte Verdichtung und den hohen Anteil an grober Gesteinskörnung zurückgeführt. Dies verdeutlicht, wie wichtig das sorgsame Mischen, Einfüllen und Verdichten des Stampflehms ist.

Abbildung 150: Zusammenfassung der Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung.



Quelle: eigene Darstellung 2023 mit Daten aus dem Prüfprotokoll vom 30.03

In Tabelle 56 sind die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung vom 30.03.2023 unter Angabe der Probenbezeichnung, des Raumgewichts in kg/m<sup>3</sup>, der max. Druckkraft in N, der Druckfestigkeit in N/mm<sup>2</sup> und den Abmessungen der Prüffläche in mm zusammengefasst.

Tabelle 56: Zusammenfassung der Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung nach dem Brandversuch.

Bezeichnung	Raumgewicht [kg/m <sup>3</sup> ]	max. Druckkraft F <sub>c</sub> [N]	Druckfestigkeit R <sub>c</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Prüffläche	
				b [mm]	d [mm]
P1.2	1419	49913,7	2,3	145,2	152,2
P1.5	1425	52419,6	2,3	146,7	155,7
P2.2	2061	51000,8	2,2	156,7	147,2
P2.5	1876	35377,7	1,5	153,8	151,7
P3.2	1524	50270,8	2,3	145,2	150,2
P3.5	1519	49581,4	2,2	146,8	150,7

Quelle: eigene Darstellung 2023 nach dem Prüfprotokoll vom 30.03

## Zusammenfassung

Ziel der vereinfachten Brandversuche ist eine vorbehaltliche Klassifizierung des neu entwickelten Lehmbaustoffs mit Kork als Zuschlagstoff bezüglich der Baustoffklasse nach DIN 4102-1<sup>177</sup> und der Feuerwiderstandsklasse nach DIN 4102-2<sup>178</sup>. In Druckversuchen im Anschluss an die Brandversuche sollte geprüft werden, ob die Brandbeanspruchung negative Auswirkungen auf die Druckfestigkeit der Probekörper hat.

Die Ergebnisse liefern lediglich eine Prognose für die Durchführung von normierten Brandversuchen nach DIN 4102-1<sup>179</sup> und DIN 4102-2<sup>180</sup> und stellen keinen Ersatz für diese dar.

## Baustoffklasse

Zu diesem Zweck wurden je drei Probewürfel der Tragschichtmischung LG70K30W5ST3 und drei Probewürfel der Dämmschichtmischung LG40K60W12.2ST1.5 hergestellt. Alle Probewürfel haben eine Kantenlänge von 20 x 20 x 20 cm, im unteren Drittel wurde eine Lage des Hochleistungsflachsgewebes eingestampft. Die Proben wurden 10 Minuten mit einem Propangasbrenner beflammt.

Während der Versuchsdauer und der Abkühlphase wurden verschiedene Messungen und Beobachtungen durchgeführt. Bei den Dämmschichtproben wurde eine leichte Rauchentwicklung beobachtet, bei den Tragschichtproben nicht. Keine der Proben hat sich entzündet. Keine der Proben trägt zur Brandausbreitung bei. Eine detaillierte Beschreibung der Versuche und der Ergebnisse befindet sich im Kapitel Baustoffklasse (ab S. 152).

Anschließend wurde die Druckfestigkeit der Probewürfel im Betonlabor der Bauhaus-Universität geprüft. Diese unterscheidet sich nur marginal von denen der Referenzprobenkörper. Eine Beschreibung der Druckfestigkeitsprüfung und der daraus resultierenden Ergebnisse befindet sich im Kapitel „Druckfestigkeit“, ab Seite 178.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass sich weder die Tragschichtmischung noch die Dämmschichtmischung entzündet haben.

Die Tragschichtmischung verfügt über ein Raumgewicht  $>1700 \text{ kg/m}^3$  und darf daher nach DIN 18951 trotz des pflanzlichen Zuschlagstoffes als Baustoffklasse A1 (nichtbrennbar) eingestuft werden. Diese Klassifizierung kann bestätigt werden.

Aufgrund des deutlich höheren Korkanteils der Dämmschichtmischung unterschreitet das Durchschnittliche Raumgewicht die Grenze von  $1700 \text{ kg/m}^3$ . Die Resultate der Versuche lassen jedoch eine vorsichtige Klassifizierung die Baustoffklasse B1 (schwerentflammbar) zu.

## Feuerwiderstandsklasse

Zur Klassifizierung der Feuerwiderstandsklasse wurden Lehmtafeln verwendet, die mit den Abmessungen 55 x 39 x 15 cm einer um den Faktor 0,26 runterskalierten Originallehmtafel entsprechen. Lehmtafel 1 wurde auf Feuerwiderstandsklasse F30 geprüft, Lehmtafel 2 auf Feuerwiderstandsklasse F60 und Lehmtafel 3 auf Feuerwiderstandsklasse F90.

---

<sup>177</sup> Vgl. DIN 4102-1.

<sup>178</sup> Vgl. DIN 4102-2.

<sup>179</sup> Vgl. DIN 4102-1.

<sup>180</sup> Vgl. DIN 4102-2.

Die Stabilität der Lehmtafeln wurde durch die Brandbeanspruchung nicht beeinträchtigt. Die Oberflächen wurden nach dem Brandversuch gleichmäßig mit einer Drahtbürste abgefegt. Die Menge des abgebürsteten Materials unterscheidet sich nur geringfügig.

Keine der Lehmtafeln hat sich während des Versuchs entzündet, es wurde keine Rauchentwicklung beobachtet und es sind keine glühenden Teile abgefallen. Der für die Lehmtafel verwendete Lehmbaustoff trägt nicht zur Brandausbreitung bei.

Aus allen Lehmtafeln wurden im Anschluss Probewürfel aus kritischen Bereichen herausgeschnitten, um diese auf ihre Druckfestigkeit zu prüfen. Dazu wurden die Lehmtafeln stehend und über Druckhölzer mit Spanngurten gesichert auf der Ladefläche eines Transporters transportiert. Der Transport hat keine Schäden an den Lehmtafeln verursacht.

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung geben keinen Hinweis auf eine Beeinträchtigung der Tragfähigkeit nach einer 90-Minütigen Brandbeanspruchung.

Es besteht ein berechtigter Grund zu der Annahme, dass auch ein normgerechter Brandversuch nach DIN 4102-2 zur Klassifizierung in die Feuerwiderstandsklasse F90 führt.

Weitere Untersuchungen zur Feuerwiderstandsklasse der Dämmschichtmischung mit und ohne Putz werden empfohlen.

## Elastizitätsmodul

Damit ein Lehmbaustoff als lasttragend eingestuft werden kann, muss er mindestens ein Elastizitätsmodul von  $750 \text{ N/mm}^2$  erreichen (vgl. Kapitel Allgemeine Anforderungen und Eigenschaften, ab S. 64). Unter zunehmender Spannung können sich Bauteile, abhängig vom Material, auf verschiedene Weisen verformen. Bei Druckbelastung spricht man dabei von Stauchung, bei Zugbelastung von Dehnung. Diese Verformungen  $\epsilon$  sind definiert als der Quotient aus der Längenänderung  $\Delta l$  und der Ausgangslänge  $L_0$ .<sup>181</sup> „Als statischer Druck-Elastizitätsmodul gilt der als Sehnenmodul ermittelte Verhältniswert zwischen einer Druckspannungsdifferenz und der ihr entsprechenden sogenannten elastischen Verformung.“<sup>182</sup> Es gilt das Hooksche Gesetz, das den linearen Zusammenhang zwischen Spannung und der elastischen Dehnung herstellt. Der Proportionalitätsfaktor  $E$  (Elastizitätsmodul, E-Modul) symbolisiert eine Materialkonstante und ergibt sich aus dem Quotienten aus Spannung und Dehnung.<sup>183</sup>

## Untersuchungsreihe 1

### Methodik

Wie bei den Druck- bzw. Biegezugversuchen in den vorangegangenen Kapiteln wird versucht, die in DIN 12390 beschriebene Prüfung von Festbeton auf den Werkstoff Lehm zu übertragen und das Versuchsprogramm ggf. zu modifizieren. Die DIN 12390-13 *Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul)* regelt dabei aktuell die E-Modulprüfung. Das Verfahren B – *Bestimmung des stabilisierten E-Moduls* erlaubt die Prüfung nach der alten DIN 1049-5 von 1991, die im Zuge dieser Arbeit durchgeführt wird.<sup>184</sup>

Als Probekörper sind nach aktueller Norm vorzugsweise Zylinder mit einem Durchmesser  $d$  von mindestens dem 3,5-fachen des Größtkorns  $D_{\max}$  zu verwenden. Die Probekörperlänge  $L$  soll dabei im Verhältnis zum Durchmesser  $d$  im Bereich von  $2 \leq L/d \leq 4$  liegen. Die Körnung des verwendeten groben Stampflehms weist, wie im Kapitel „Ökologische Zuschlagstoffe“ ab Seite 34 bereits beschrieben, ein Größtkorn von 16 mm auf, weshalb ein Durchmesser von mindestens 56 mm zu wählen ist. Die Wahl fällt auf eine Prüfkörperlänge  $L$  von 200 mm und einen Durchmesser  $d$  von 70 mm, womit beide Kriterien der DIN 12390-13 eingehalten werden.<sup>185</sup>

Da die E-Modulprüfung sehr präzise Messungen im Mikrometerbereich vorsieht und es bislang kein erprobtes Verfahren für den Lehmabau gibt, werden, um ausreichend Spielraum für das Einstellen der richtigen Prüfparameter zu haben, zehn Zylinder mit dem Mischverhältnis LG70K30W3.5T3 hergestellt. Als Schalung wird ein Kunststoffrohr verwendet, das vor dem Einfüllen des Materials auf der Innenseite gefettet wird. Nach dem Verdichten wird die Masse dann aus der Schalung gepresst und für mindestens zwei Wochen unter Normklima (20,7 °C Raumtemperatur und 65 % Luftfeuchtigkeit) getrocknet. Die zehn Proben werden nachfolgend mit PK1 bis PK10 bezeichnet (vgl. Abbildung 151).

---

<sup>181</sup> Vgl. Läßle 2016, 88f.

<sup>182</sup> DIN 1048 Teil 5, S. 6.

<sup>183</sup> Vgl. Balke 2010, S. 15.

<sup>184</sup> Vgl. DIN EN 12390-13, S. 11.

<sup>185</sup> Vgl. DIN EN 12390-13, S. 8.

Für ein Mischverhältnis LG40K60W10T0.01 waren ebenfalls zehn Probekörper vorgesehen. Es zeigte sich jedoch, dass sich diese eher schwach bindige Mischung im feuchten Zustand nicht schadlos aus der Schalung pressen ließ, weshalb nur zwei Prüfkörper dieser Mischung verwendbar sind. Diese beiden Probekörper wurden zunächst in der Schalung gelassen zum Trocknen und erst nach wenigen Tagen herausgepresst (vgl. Abbildung 151). Diese beiden Proben werden nachfolgend mit PKI und PKII bezeichnet.

Alle Probekörper wurden am 10.06.2022 hergestellt und 26.07.2022 in der MFPA Thüringen geprüft.

Abbildung 151: Probekörper für E-Modulprüfung kurz nach dem Ausschalen.



Foto: Plattner 2022

Die Lasteinleitungsflächen aller Probekörper müssen für den Versuch eben und parallel sein, weshalb die Zylinder vorab mit Hilfe einer Steinsäge an den Rändern begradigt werden. Anschließend werden diese in ein dünnes Gipsbett gestellt und mit Hilfe einer Nivellierlibelle exakt waagrecht ausgerichtet. (vgl. Abbildung 152) Kleine Abplatzungen an den Ecken werden in dem Zuge ebenfalls mit Gips ausgebessert.

Abbildung 152: Probekörper nach Ausbesserung und Nivellierung.



Foto: Plattner 2022

Die verwendete Prüfmaschine (Zwick/Roell Z250) bietet die Möglichkeit Dehnungen auf zwei Arten aufzuzeichnen. Zum einen über eine seitlich angebrachte taktile Messeinheit mit vier Messdosen (MultiXtense, kurz: MX), die vor der Versuchsdurchführung mittig austariert werden muss. Zum anderen können die Dehnungen optisch über eine hochauflösende Kamera (VideoXtense, kurz: VX) aufgezeichnet werden. Damit die Kamera mehr Messpunkte auf den optisch sehr inhomogenen Oberflächen findet, werden an den Messstellen weiße Messmarkierungen, mit schwarzen Punkten bzw. Gittern, aufgezeichnet (vgl. Abbildung 153).

Abbildung 153: Eingefärbte Messfelder für die VideoXtense Aufnahme.

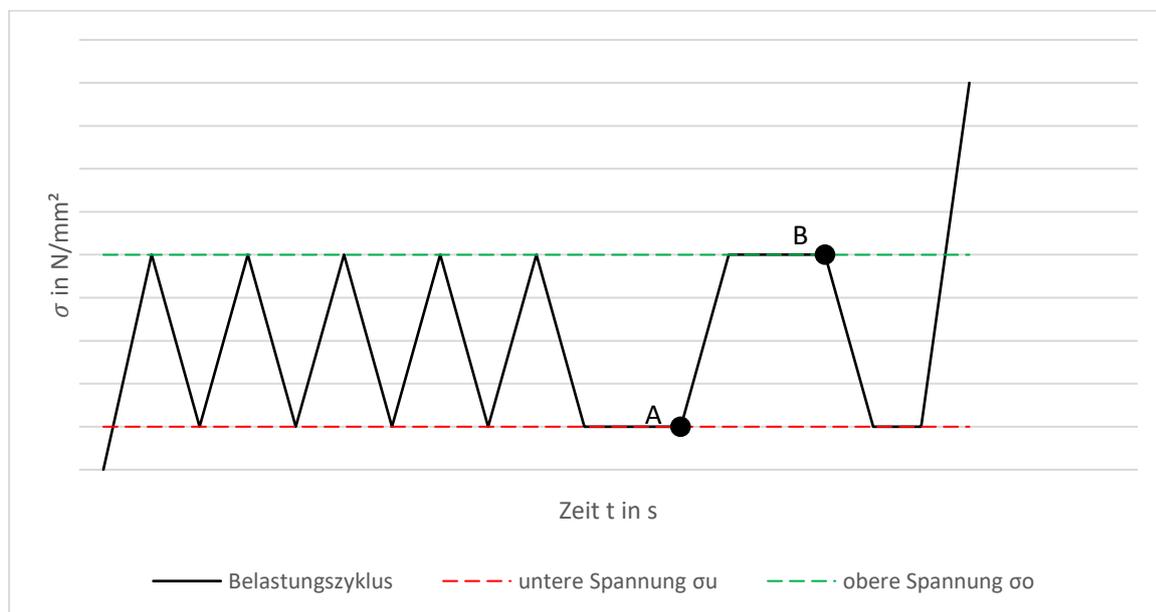


Foto: Plattner 2022

Für den Versuch müssen zunächst eine obere Prüfspannung  $\sigma_o$  und eine untere Prüfspannung  $\sigma_u$  festgelegt werden.  $\sigma_o$  ist dabei frei wählbar, sollte aber etwa ein Drittel der zu erwartenden Druckfestigkeit des Probekörpers betragen. Die untere Prüfspannung muss zwischen 10 % und 20 % der Druckfestigkeit liegen. Für Beton wird eine Prüfgeschwindigkeit von  $0,6 \pm 0,2$  MPa/s vorgeschlagen - wie bei den Biegezugversuchen muss diese für die Lehmprüfung auf etwa 10 % reduziert werden.<sup>186</sup>

Die Probekörper müssen zentrisch auf die Prüfmaschine gesetzt werden. Danach wird der Kolben langsam angefahren, bis die obere Platte ganzflächig an der oberen Druckfläche anliegt. Schließlich wird die untere Prüfspannung aufgebracht und der Versuch wird entsprechend dem Belastungsdiagramm in Abbildung 154 durchgeführt. Für die Ermittlung des E-Moduls werden fünf Be- und Entlastungszyklen gefahren und anschließend die Druckfestigkeit bestimmt. Bei Punkt A ist die untere Spannung  $\sigma_u$ , die zugehörige Dehnung  $\varepsilon_u$  bzw. Messlänge  $l_u$  abzulesen. Bei B entsprechend die obere Spannung  $\sigma_o$ , Dehnung  $\varepsilon_o$  und Messlänge  $l_o$ . Die Belastungszeit ergibt sich aus der Belastungsgeschwindigkeit.<sup>187</sup>

Abbildung 154: Belastungs-Zeit Diagramm für Elastizitätsmodulprüfung.



Quelle: eigene Anfertigung 2022 nach DIN 1048 Teil 5, S. 6

Das Elastizitätsmodul wird in  $\text{N/mm}^2$  angegeben und berechnet sich wie folgt:

$$E_b = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{\varepsilon_o - \varepsilon_u} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (52)$$

### Untersuchungsreihe 1 – LG70K30W3.5T3

Für PK1 - Pk10 erwies sich eine untere Prüfspannung  $\sigma_u$  von  $0,1 \text{ N/mm}^2$  als sinnvoll, während die Prüfgeschwindigkeit bei allen zehn Versuchen bei  $0,05 \text{ MPa/s}$  lag. Um sinnvolle Annahmen für die obere Prüfspannungen zu treffen, wurde PK1 nach den fünf Belastungszyklen mit  $\sigma_o = 0,7 \text{ N/mm}^2$  weggeregelt mit einer Traversenverschiebung von  $1 \text{ mm/min}$  bis zum Bruch belastet. Es zeigte sich, dass die erzielte

<sup>186</sup> Vgl. DIN EN 12390-13, 11ff.

<sup>187</sup> Vgl. DIN 1048 Teil 5, S. 6.

Druckspannung etwa  $1,5 \text{ N/mm}^2$  betrug und somit das Drittelkriterium der oberen Prüfspannung nicht eingehalten werden konnte. Daher wurde  $\sigma_o$  nach dem ersten Versuch von  $0,7 \text{ N/mm}^2$  auf  $0,5 \text{ N/mm}^2$  gesenkt (vgl. Abbildung 155).

Abbildung 155: Dokumentation der Prüfparameter für E-Modul.

Kenngroße	Einheit	Wert
Nennwert der unteren Prüfspannung $\sigma_u$	MPa oder $\text{N/mm}^2$	0,10
Nennwert der oberen Prüfspannung $\sigma_o$	$\text{N/mm}^2$	0,50
Max. Druckfestigkeit $f_c$	MPa oder $\text{N/mm}^2$	1,80
Prüfgeschwindigkeit	MPa/s	0,05
Größtkorn $D_{\max}$	mm	16

Quelle: eigene Anfertigung 2022

Die angepassten Parameter wurden bei PK2 angewendet und die Ergebnisse auf Plausibilität überprüft. Die Probe wurde nach den fünf Zyklen nicht bis zum Bruch, sondern kraftgesteuert mit  $0,05 \text{ MPa/s}$  belastet, bis der Versuch schließlich manuell abgebrochen wurde. Alle Kriterien wurden eingehalten und es ergab sich ein annähernd linearer Verformungsanstieg. (vgl. Anlage 6)

In PK3 wurde die maximale Druckspannung mit der angepassten Prüfspannung noch einmal überprüft, indem dieser wieder mit einer Traversenverschiebung von  $1 \text{ mm/min}$  bis zum Bruch belastet wurde. Das Ergebnis war annähernd deckungsgleich, weshalb davon ausgegangen werden konnte, dass die Prüfparameter sinnvoll gewählt wurden.

PK4 bis PK10 wurden demnach mit  $\sigma_u = 0,1 \text{ N/mm}^2$ ,  $\sigma_o = 0,5 \text{ N/mm}^2$  und einer Prüfgeschwindigkeit von  $0,05 \text{ MPa/s}$  durchgeführt. In Abbildung 154 (S. 200) sind qualitativ die Be- und Entlastungszyklen während des Versuchs zu erkennen. Nach den fünf Zyklen wird die Spannung nach 30 Sekunden wieder hochgefahren. Der Versuch wird schließlich vor dem Bruch manuell abgebrochen, sodass die Probekörper zu einem späteren Zeitpunkt weiter untersucht werden können.

In nachfolgender Tabelle 57 sind die errechneten E-Moduln  $E_{\text{stat,mx}}$  mit den aufgezeichneten Werten der Dehnungsaufnehmer (MX) aufgelistet. Alle Spannungen und Dehnungen wurden nach Abschluss des fünften Belastungszyklus am erneuten Anstieg gemessen. Vergleicht man die Ergebnisse von PK3 mit PK10, so unterliegen diese einer Schwankung von  $510 \text{ N/mm}^2$ , was etwa einer Diskrepanz von 20 % entspricht. Der durchschnittlich gemessene E-Modul beträgt  $2128 \text{ N/mm}^2$ .

Tabelle 57: Ergebnisse der E-Modulprüfung LG70K30W3.5T3.

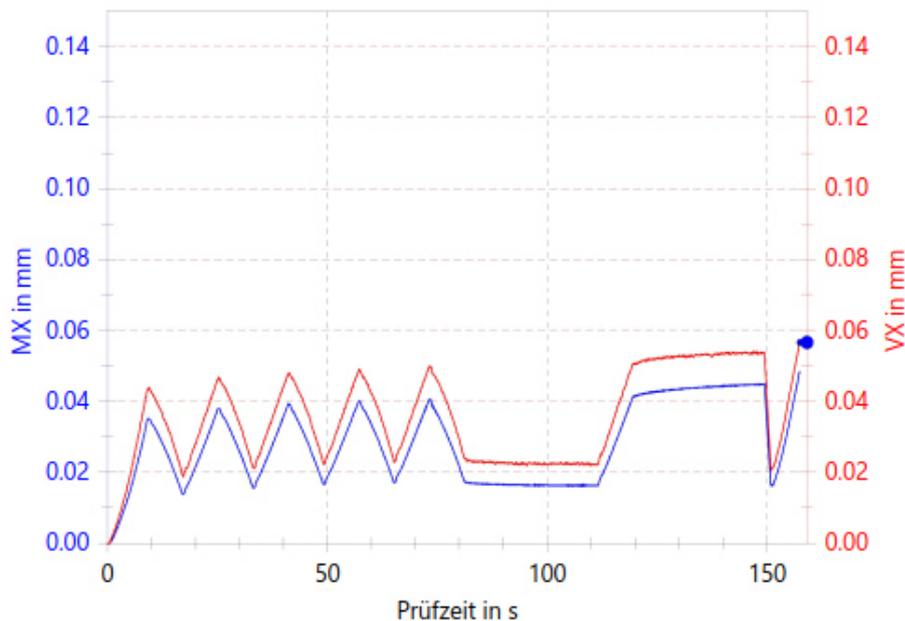
Probe	$d_0$ [mm]	L [mm]	$\Delta_\sigma$	$\Delta_\epsilon$	$E_{\text{stat, mx}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
PK 1	69,7	201,3	0,596	0,000286	2080
PK 2	70,5	199,2	0,372	0,000159	2340
PK 3	70,0	203,4	0,389	0,000165	2350
PK 4	70,5	203,1	0,395	0,000207	1900
PK 5	70,3	196,5	0,389	0,000210	1850
PK 6	69,7	198,6	0,388	0,000167	2330
PK 7	70,0	197,0	0,388	0,000183	2120
PK 8	70,0	198,0	0,390	0,000173	2250
PK 9	70,1	202,7	0,389	0,000176	2220
PK10	70,5	194,6	0,371	0,000202	1840
<b>Ø</b>	-	-	<b>0,407</b>	<b>0,000193</b>	<b>2128</b>

Quelle: eigene Anfertigung 2022 in Anlehnung an Prüfprotokoll D70 vom 28.07.

Alle Prüfprotokolle, Zwischenergebnisse der Versuchsauswertung sowie die über die Videoaufnahme (VX) gemessenen Dehnungen sind in Anlage 5 dokumentiert. Die errechneten  $E_{\text{stat, vx}}$  liegen in der Regel 10-20% über den mechanisch gemessenen  $E_{\text{stat, mx}}$ .

Aufgrund der inhomogenen Oberfläche des Lehm-Kork-Gemischs, wird davon ausgegangen, dass die taktilen Dehnungsaufnehmer deutlich präzisere Ergebnisse liefern. Dennoch unterscheiden sich die Verläufe qualitativ nicht, was für die Richtigkeit der gewählten Parameter spricht. (vgl. Abbildung 156)

Abbildung 156: Gegenüberstellung der Dehnungen MX; VX.



Quelle: Prüfprotokoll D70 vom 28.07., S. 18

In der Literatur findet sich eine breite Streuung an Angaben über E-Moduln von Stampflehm. Eine im Jahr 2000/2001 entstandene Forschungsarbeit von Dierks und Ziegert zu tragendem Lehm- und Zieglerbau beschreibt für reinen Stampflehm beispielsweise E-Moduln zwischen 550 – 960 N/mm<sup>2</sup>, die, abgesehen von der Prüfkörpergeometrie, nach dem exakt gleichen Verfahren in Anlehnung an DIN 1048-5 geprüft wurden.<sup>188</sup> Statt Zylinder wurden hier prismatische Prüfkörper mit den Abmessungen 150 x 150 x 300 mm untersucht.<sup>189</sup> Es wird jedoch nicht beschrieben, ob die Verformung über den Traversenweg der Prüfmaschine oder wie in den hier beschriebenen Versuchen direkt am Prüfkörper über taktile Messeinheiten gemessen wurden. Wird die Verformung nur über den Traversenweg gemessen, wird die gesamte Maschinenverformung vernachlässigt. Eine Messung direkt am Prüfkörper liefert demnach deutlich präzisere Messergebnisse. Dies ist eine mögliche Erklärung für die deutlich höheren E-Moduln, die im Zuge dieser Arbeit gemessen werden konnten. Dieser sollte bei der Zugabe von elastischem Kork erwartungsgemäß deutlich sinken. Kontinuierliche Messfehler oder fehlerhaftes Tarieren der Prüfmaschine sind dennoch nicht auszuschließen. Dass das Beimengen von Tonmehl für eine zusätzliche Steigerung des E-Moduls sorgt, legen die Ergebnisse nahe. Aufgrund der sehr präzisen Messtechnik über die taktile Dehnungsaufnehmer (MultiXtense) und den vorangegangenen aufwändigen Ausbesserungsarbeiten an den Probekörpern, wird jedoch nach Absprache mit MFPA-Thüringen an der Richtigkeit der Ergebnisse festgehalten.

### Untersuchungsreihe 1 - LG40K60W10T0.01

Für die Untersuchung des Dämmstoffs LG40K60W10T0.01 wurden die Prüfparameter niedriger angesetzt, da hier deutlich geringere Druckfestigkeiten erwartet wurden. So betrug hier die untere Prüfspannung  $\sigma_u$  0,08 N/mm<sup>2</sup>, die obere Prüfspannung  $\sigma_o$  0,24 N/mm<sup>2</sup> und die Prüfgeschwindigkeit bei 0,01 MPa/s lag.

<sup>188</sup> Vgl. DIN 1048 Teil 5.

<sup>189</sup> Vgl. Schroeder 2019, 243f.

Für PKI und PKII ergaben sich E-Moduln im Bereich von 80 N/mm<sup>2</sup> und 150 N/mm<sup>2</sup> (Tabelle 58).

Tabelle 58: Ergebnisse der E-Modulprüfung LG40K60W10T0.01.

Probe	d <sub>0</sub> [mm]	L [mm]	Δ <sub>σ</sub>	Δ <sub>ε</sub>	E <sub>stat, mx</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]
PK I	70,0	206,0	0,151	0,001001	150
PK II	70,0	204,1	0,150	0,001934	80
<b>∅</b>	-	-	<b>0,151</b>	<b>0,001468</b>	<b>115</b>

Quelle: eigene Anfertigung 2022 in Anlehnung an Prüfprotokoll D70 vom 28.07.

Alle Prüfprotokolle, Zwischenergebnisse der Versuchsauswertung sowie die über die Videoaufnahme (VX) gemessenen Dehnungen sind in Anlage 5 dokumentiert. Die errechneten E<sub>stat, vx</sub> liegen in der Regel 10 – 20 % über den mechanisch gemessenen E<sub>stat, mx</sub>.

Der E-Modul des Dämmwerkstoffs liegt erwartungsgemäß weit unter dem des Tragwerkstoffs. Das verwendete Kunststoffrohr eignete sich nicht als Schalung für den schwach bindigen Werkstoff, weshalb nur zwei Probekörper hergestellt werden konnten.

## Zusammenfassung Untersuchungsreihe 1

Die Untersuchungsreihe hat gezeigt, dass alle Probekörper der Tragschicht den geforderten E-Modul von 750 N/mm<sup>2</sup> deutlich einhalten. Gleichzeitig lag der Mittelwert der Mischung LG70K30W3.5T3 mit 2128 N/mm<sup>2</sup> deutlich über dem erwarteten Wert, was bedeutet, dass die Mischung deutlich steifer ist als angenommen. Die Mischung der Dämmschicht weist mit rund 115 N/mm<sup>2</sup> einen deutlich niedrigeren E-Modul auf, was belegt, dass sich dieser Baustoff deutlich duktiler bzw. weicher verhält.

Die Forschung an geeigneten Messverfahren zum Prüfen des E-Moduls von Lehmbaustoffen gilt es weiterzuverfolgen.

## Simulation

Wie bereits bei der thermischen Simulation (ab Seite 59) erwähnt, bezieht sich der Begriff Simulation auf die Verwendung von Computermodellen zur Reproduktion und Analyse des Verhaltens eines physischen Systems oder Prozesses. Diese Simulationen werden genutzt, um die Leistung verschiedener Entwürfe, Systeme oder Prozesse vor ihrer tatsächlichen Realisierung zu testen und zu optimieren. Dadurch können potenzielle Probleme oder Verbesserungsbereiche frühzeitig identifiziert werden, was zu effizienteren und effektiveren Lösungsansätzen führt.

Das Ziel jeder Simulation besteht darin, ein Computermodell eines realen Systems oder Prozesses zu erstellen, um sein Verhalten unter verschiedenen Bedingungen zu verstehen und vorherzusagen. Durch die Simulation eines Systems können Forscher:innen komplexe Phänomene untersuchen, die im realen Leben schwer oder unmöglich zu beobachten oder zu manipulieren sind. Darüber hinaus kann die Simulation genutzt werden, um das eingegebene Modell zu testen und zu optimieren, beziehungsweise um potenzielle Probleme zu identifizieren.

In diesem Kapitel werden Belastungsversuche an Lehm-Kork-Proben simuliert, um die mechanischen Eigenschaften dieses Materials unter verschiedenen Arten und Belastungsstufen zu charakterisieren.

ANSYS eignet sich dabei als Software für die geplante Simulation. Als Multiphysik und System simulationsprogramm kann ANSYS die Belastungstests simulieren und das Verhalten von Strukturen und Materialien unter verschiedenen Belastungsbedingungen vorhersagen. ANSYS ist eine Finite-Elemente-Analyse-Software, die es Anwender:innen ermöglicht, Simulationen komplexer Strukturen zu entwickeln und die Reaktion dieser Strukturen auf verschiedene Arten von Belastungen zu simulieren, einschließlich mechanischer Belastungen wie bei Druckversuchen.

Durch den Vergleich der simulierten Ergebnisse mit den Ergebnissen von Laborversuchen kann die Genauigkeit des Simulationsmodells bewertet und erforderliche Anpassungen zur Verbesserung der Genauigkeit vorgenommen werden.

Für das Modell müssen zunächst Materialeigenschaften definiert und in das Programm eingepflegt werden. Diese Eigenschaften umfassen physikalische und mechanische Eigenschaften wie die Dichte, Elastizität, Druckfließgrenze und Zugfestigkeit. Die folgende Tabelle 59 gibt einen Überblick über die für die Lehmmischung LG70K30W5S verwendeten Parameter.

Während die Dichte, der E-Modul und die maximale Druckfestigkeit des Gemischs über labortechnische Untersuchungen ermittelt werden konnten, musste für die Querdehnungszahl auf externe Literatur zurückgegriffen werden.<sup>190</sup>

---

<sup>190</sup> Vgl. Kumar Thota et al. 2021.

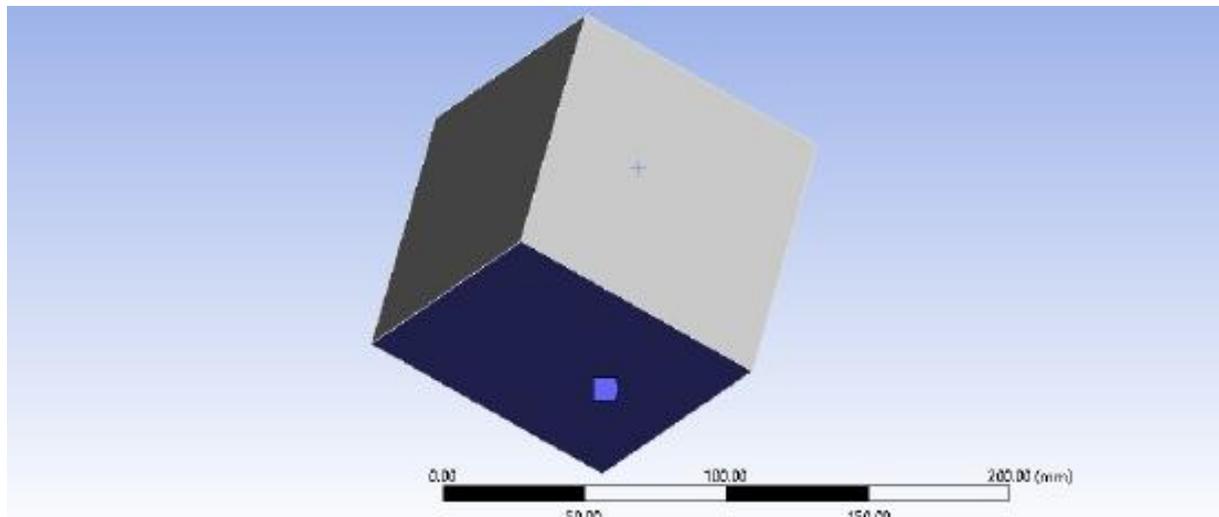
Tabelle 59: Materialeigenschaften LG70K30W5S als Parameter für Simulation.

Eigenschaften	LG70K30W5S	Quelle
Dichte	1.353 [ $Kg/m^3$ ]	Tabelle 28, S. 104 *unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Schichtdicke von Trag- und Dämmschicht im fertigten Bauteil
Elastizitätsmodul	2.128 [ $MPa$ ]	Tabelle 57, S. 202
Querdehnungszahl	0,3	Kumar Thota et al. 2021, S. 4
Druckfestigkeit	2,0 [ $MPa$ ]	Tabelle 9, S. 65 *als abgeminderter Sicherheitswert
Biegezugfestigkeit	0.74 [ $MPa$ ]	Tabelle 39, S. 127

Quelle: eigene Anfertigung 2023 mit Daten nach Kumar Thota et al. 2021, S. 4

Die Maße des simulierten Probekörpers betragen 100 x 100 x 100 mm, wobei zwei Schichten des Geogitters aus Hochleistungsflachsgewebe oben und unten mit einem Abstand von 10 mm von der oberen und unteren Oberfläche des Würfels, im Modell berücksichtigt wurden. Die definierte Unterseite des Probekörpers wurde als fixiert markiert (vgl. Abbildung 157). Die Probekörperfläche, welche parallel zu dieser fixierten Fläche liegt, ist in den weiteren Untersuchungen die Lastangriffsfläche.

Abbildung 157: Fixierte Unterseite des Probekörpers.



Quelle: ANSYS-Simulation 2023

Nach Zuweisung des Materials unter Berücksichtigung der zusätzlichen Stabilisierung in Form eines Geogitters aus Flachsgewebe, konnte der Anfangsdruck festgelegt und das Modell anschließend vermasht werden. Für das aktuelle Modell wurden die Standardeinstellungen für das Meshing verwendet (vgl. Abbildung 158).

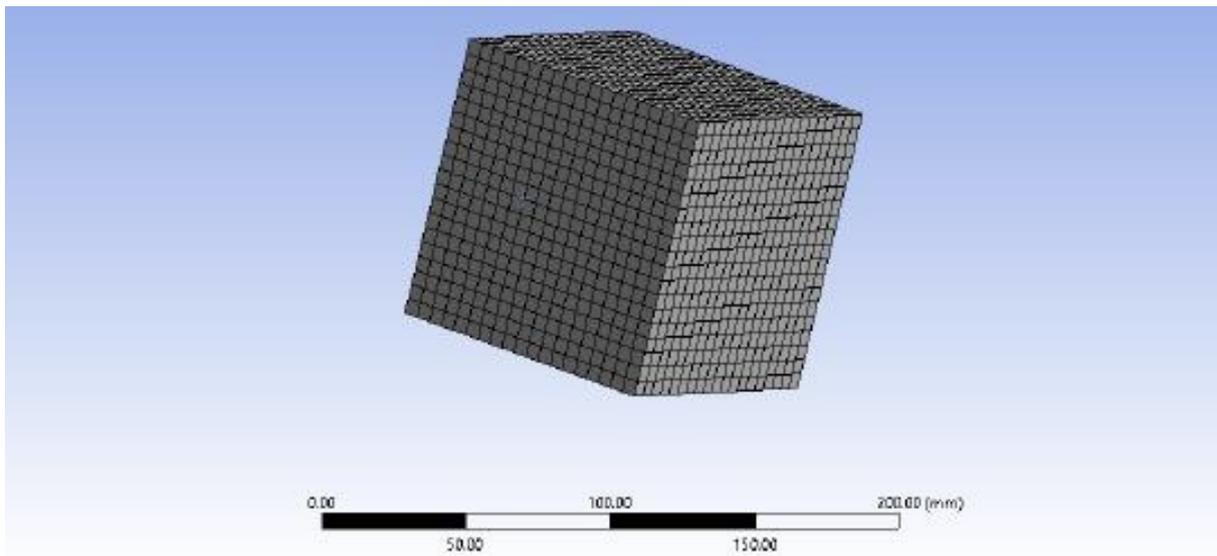
Das Meshing ist wichtig, da die meisten numerischen Simulationssoftwares auf der Finite-Elemente-Analyse (FEA) basieren. Ein FEA-Modell teilt ein komplexes physikalisches Problem in kleine Elemente

auf, die durch mathematische Gleichungen beschrieben werden. Diese Gleichungen werden dann numerisch gelöst, um die Verhaltensweise des Systems unter bestimmten Bedingungen vorherzusagen.

Für die Untersuchung von Lehm-Kork wurde explizite Dynamik verwendet. So konnte ein Druckfestigkeitsversuch simuliert werden und anschließend die Auswirkung der simulierten Lasten auf die Struktur analysiert werden.

Während die explizite Dynamik häufig verwendet wird, um die Reaktion von Strukturen unter dem Einfluss von dynamischen Lasten zu bewerten, wurde sie hier speziell zur Simulation eines Kompressionstests eingesetzt.

Abbildung 158: Zerlegtes Modell (meshing).

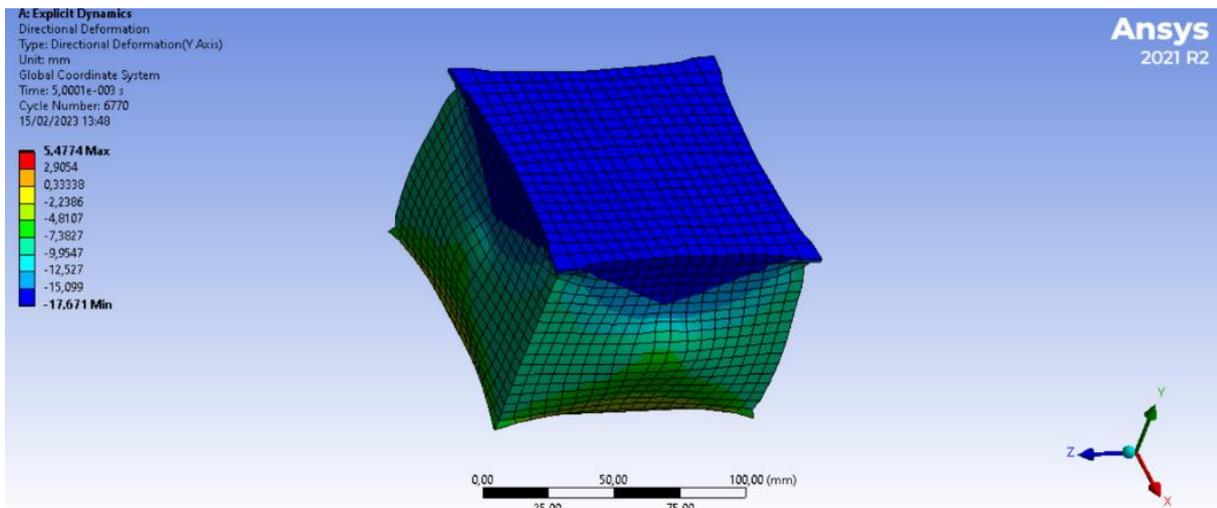


Quelle: ANSYS-Simulation 2023

## Ergebnisse

Im Zuge der Simulation wurde der erstellte Probekörper einer Druckbelastung unterzogen. Abbildung 159 zeigt die aufgetretene Verformung. Die positiven Zahlen (rot, orange und gelb) stehen dabei für eine starke Verformung des Materials und die negativen Werte (grün bis blau) für eine sehr kleine Verformung. Demnach herrscht an der Oberseite des Probekörpers eine minimale Verformung, während vor allem an den Seiten eine etwas größere Verformung auftritt.

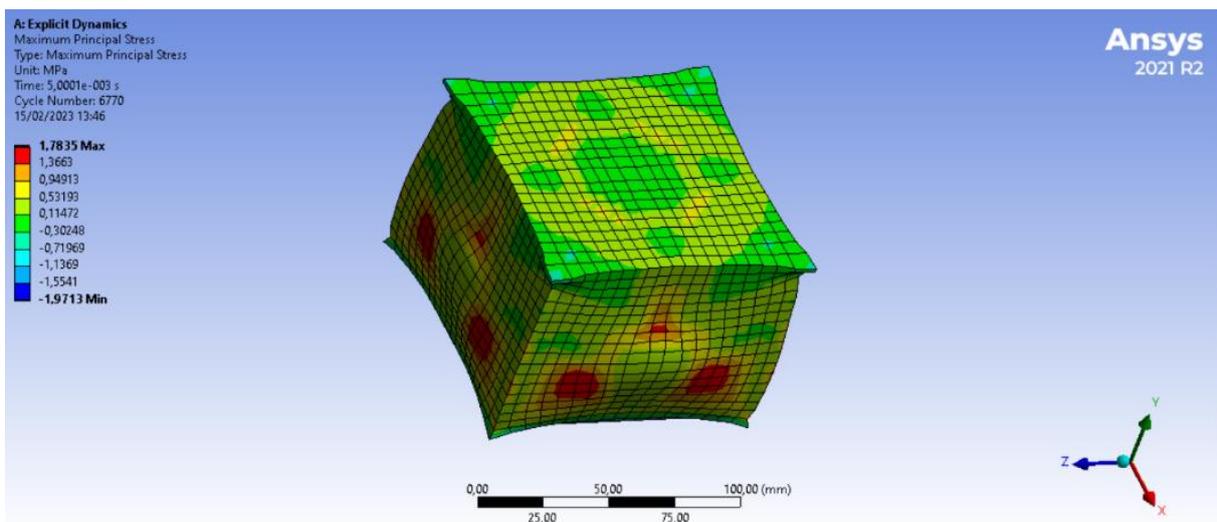
Abbildung 159: Richtungsabhängige Verformung des simulierten Probekörpers.



Quelle: ANSYS-Simulation 2023

In einer weiteren Simulation wurde die maximale Spannung untersucht (vgl. Abbildung 160). Während die positiven Spannungen (rot) auf eine sehr hohe Spannung hinweisen, sind blaue Bereiche nur sehr kleinen Spannungen ausgesetzt.

Abbildung 160: Maximale Spannung in [MPa].



Quelle: ANSYS-Simulation 2023

Die maximal aufgezeichneten Druckspannungen passen bei diesem Versuch sehr gut zu den Ergebnissen aus dem Kapitel Untersuchungsreihe 6, ab Seite 107. Hier wurde für den weggeregelter Versuch eine durchschnittliche Druckfestigkeit von 1,55 MPa gemessen. Die Simulation liegt somit nur 0,008 MPa über der durchschnittlichen Messung. Interessant ist, dass die roten Bereiche der Abbildung 160 ziemlich genau jene Bereiche mit einer maximalen Rissbildung bei den realen Probekörper darstellen (vgl. Abbildung 161). Das bedeutet, dass in diesen Bereichen auch in der Realität die größten Spannungen auftraten.

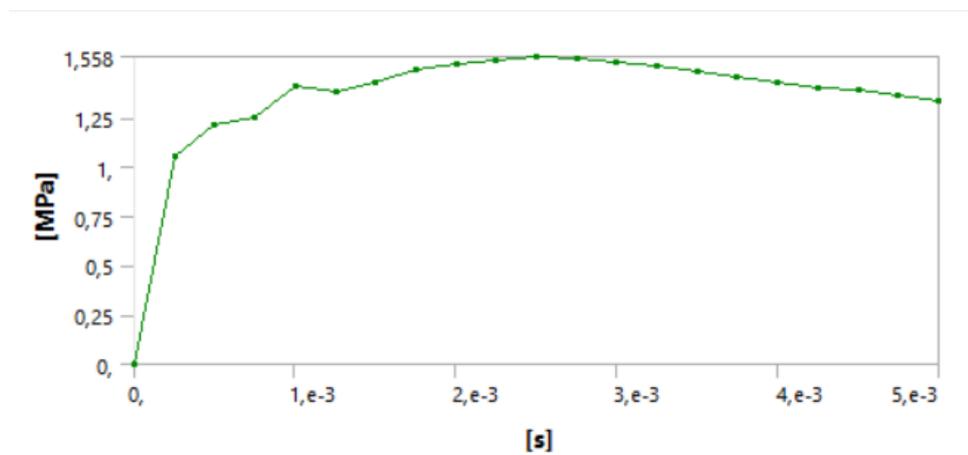
Abbildung 161: Rissbildung am PK D.



Foto: Plattner 2022

Auch das Spannungs-Dehnungsdiagramm aus ANSYS (vgl. Abbildung 162) kann mit realen Diagrammen abgeglichen werden. Das Diagramm zeigt zu Beginn der Belastung einen starken, linearen Anstieg bis knapp über 1 MPa. Anschließend verläuft die Kurve der Spannungszunahme deutlich flacher und etwas ungleichmäßig bis auf 1,558 MPa. Nach Erreichen der maximalen Spannung folgt ein fast linearer und sehr flach verlaufender Abstieg der Spannung.

Abbildung 162: Spannungs-Dehnungsdiagramm ANSYS.

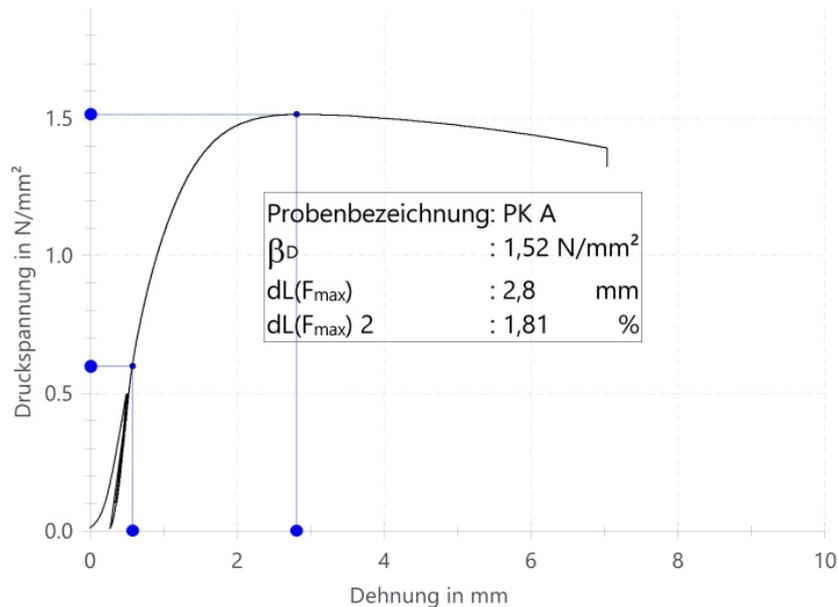


Quelle: ANSYS-Simulation 2023

Ein sehr ähnlicher Verlauf wurde für den Probekörper A dokumentiert (vgl. Abbildung 163).<sup>191</sup> Die Druckspannung steigt auch hier zunächst steil an. Bei etwa  $0,7 \text{ N/mm}^2$  flacht die Kurve bereits leicht ab, wobei ab diesem Punkt die Steigung kontinuierlich abnimmt. Ab der maximalen Spannung von 1,52 MPa fällt die Kurve leicht ab.

<sup>191</sup> Vgl. Prüfprotokoll W150 28.07., S. 4.

Abbildung 163: Spannungs-Dehnungsdiagramm PK A.

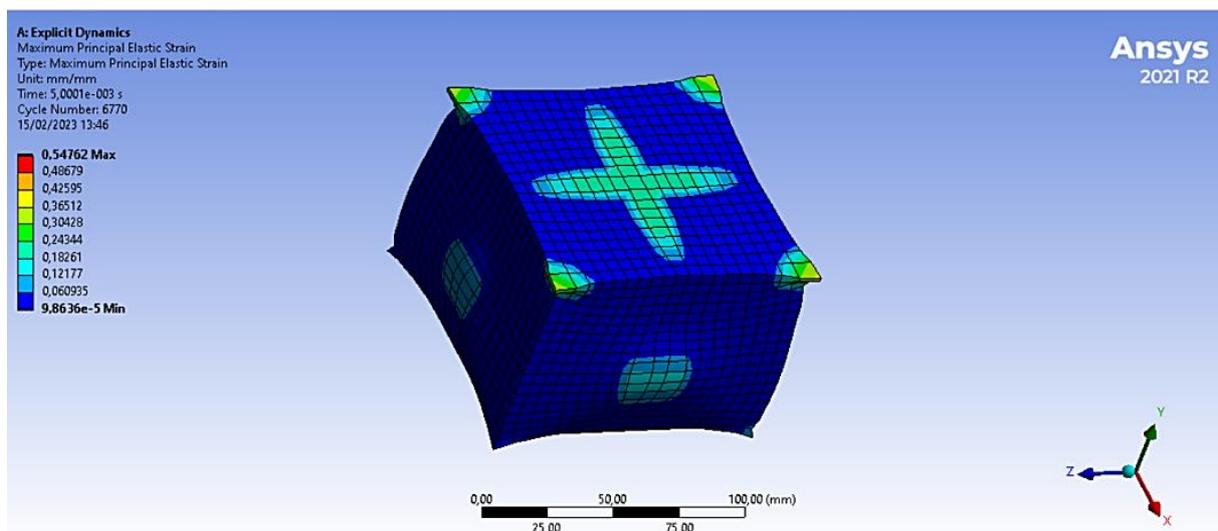


Quelle: Prüfprotokoll W150 28.07., S. 4

Die beschriebenen Beobachtungen zeigen, dass das Modell die tatsächlichen Materialeigenschaften der Lehm-Kork-Mischung gut simulieren kann.

Auch die maximale Dehnung des gewählten Materials wurde durch eine Simulation untersucht und anschließend mit labortechnischen Werten abgeglichen (vgl. Abbildung 164). Erneut stehen rote Bereiche für eine starke Dehnung und blaue Bereiche für eine schwache, beziehungsweise minimale Dehnung. Es fällt auf, dass auf der Oberseite des Probekörpers eine kreuzförmige mittlere Dehnung auftritt. Im Bereich der Ecken tritt ebenfalls eine mittlere Dehnung auf. An den Seiten tritt zentral eine punktförmige mittlere Dehnung auf.

Abbildung 164: Maximale Dehnung.

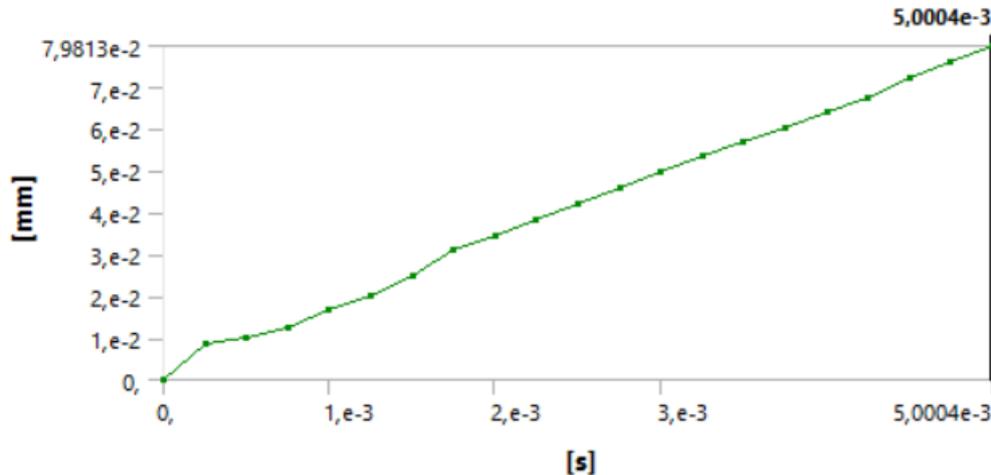


Quelle: ANSYS-Simulation 2023

Das zugehörige Diagramm zeigt einen fast linearen Verlauf, was bedeutet, dass die Dehnung kontinuierlich und gleichmäßig zunimmt. Die maximale Dehnung beträgt 0,07 mm, was knapp 0,1 % entspricht. Die aufgezeichnete Dehnung ist somit minimal. Die in Abbildung 163 aufgezeichnete

maximale Dehnung lag bei ca. 2,8 mm, was umgerechnet knapp 1,9 % entspricht. Somit ist das simulierte Material etwas steifer als das verwendete Gemisch.

Abbildung 165: Diagramm zur maximalen Dehnung.



Quelle: ANSYS-Simulation 2023

## Zusammenfassung der Ergebnisse

Insgesamt zeigte der Abgleich der Simulation mit den labortechnischen Untersuchungen eine große Übereinstimmung der Werte. Daraus lässt sich schließen, dass das simulierte Material in großen Teilen die tatsächlichen Eigenschaften der untersuchten Lehm-Kork-Mischung widerspiegelt.

Gleichzeitig war die Eingabe der entsprechenden Materialparameter eine wesentliche Herausforderung, da nur wenig passende Literatur zu Lehm-Kork-Gemischen existiert. An vielen Stellen wurde daher auf, aus Sicht der Verfasser, geeignete Referenzen zurückgegriffen. Ob die Simulation auch im großen Maßstab zu verlässlichen Ergebnissen führt und somit labortechnische Untersuchungen ersetzt werden können, bleibt jedoch fraglich.

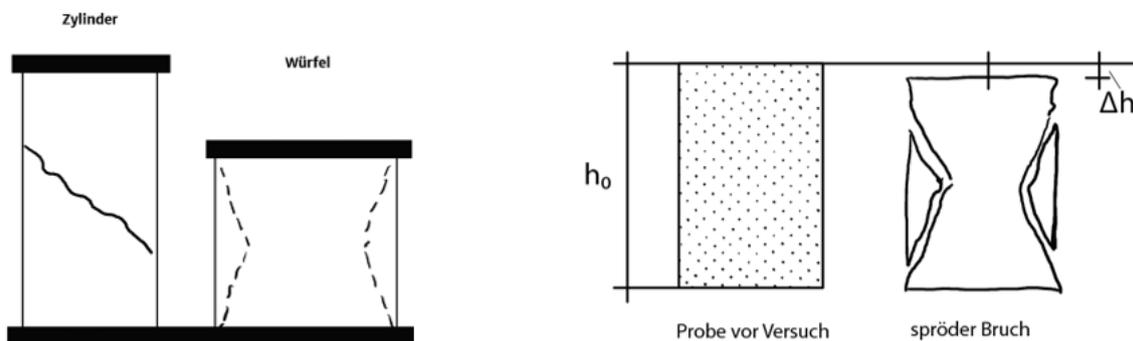
## Bemessung LTBw

### Referenzbaustoff Beton

Die von Dierks und Stein beschriebene Affinität soll ebenfalls als Basis für die hier durchgeführten Untersuchungen und Überlegungen dienen. Jedoch dürfen dabei die Unterschiede zwischen den beiden Materialien (Lehm und Beton) nicht vernachlässigt werden, wirken sie sich doch deutlich auf die Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit aus. Die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen Stampflehm und Beton werden im Folgenden eingehend betrachtet.

Als Gemeinsamkeiten von Beton und Stampflehm nennen Dierks und Stein, wie auch Schröder die Beschaffenheit der Gemische. Stampflehm wird als ein tongebundenes Konglomerat mit einer deutlichen Affinität zum zementgebundenen Konglomerat Beton beschrieben.<sup>192,193</sup> Unterstützt wird diese Annahme durch das Verhalten von Stampflehm- und Betonprobewürfeln unter einachsigem Druck. Beide Materialien zeigen ein ähnliches Bruchbild, welches durch Querkzugversagen hervorgerufen wird, siehe Abbildung 166. Wie Beton verfügt auch Stampflehm über eine im Verhältnis zur Biegezugfestigkeit, sehr hohe Druckfestigkeit. Ferner lassen sich sowohl Beton als auch Stampflehm durch das Einlegen einer Bewehrung ertüchtigen. Dies gilt sowohl für Druck- als auch für Biegebeanspruchung.

Abbildung 166: links: Bruchbild von Betonprüfkörpern im Druckversuch eigene Darstellung 2022 nach Holcim 2022, S. 5; rechts: Bruchbild von zylindrischen Stampflehmprüfkörpern im Druckversuch.



Quelle: eigene Darstellung 2022 nach (Schröder 2019, S. 252)

Auf der anderen Seite weisen Stampflehm und Beton deutliche Unterschiede auf. Das Abbinden des Betons, bzw. des Zements als Bindemittel ist ein chemischer, irreversibler Prozess. Als Hauptbestandteile des Zementklinkers sind kieselsaures Calcium, Aluminium und Eisen zu nennen. Der Zementklinker reagiert mit Wasser zu Calciumsilikathydraten (CSH). Diese Calciumsilikathydrate wachsen als nadelförmige Kristalle ineinander. Das Wasser ist dauerhaft chemisch gebunden, weshalb der Zement auch unter Wasser seine Festigkeit behält.<sup>194</sup> Wird beispielsweise dem Tricalciumsilikat (C3S:  $2(3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2)$ ) Wasser ( $6\text{H}_2\text{O}$ ) hinzugefügt, reagiert es zu Tricalciumsilikathydrat ( $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O} + 3\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Wird dagegen trockener Lehm ( $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) mit Wasser ( $n\text{H}_2\text{O}$ ) angemacht, findet keine chemische Reaktion statt. Im Ergebnis handelt es sich bei der Mischung nach wie vor um Lehm mit Wasser ( $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2\cdot (\text{H}_2\text{O})_{2+n}$ ). Der Stampflehm trocknet reversibel aus, indem enthaltenes Wasser an die Umgebungsluft abgegeben wird. Er kann im Bedarfsfall wieder Feuchtigkeit aufnehmen (z. B. Feuchteregulierung im Wohnraum). Ungebrannter Lehm kann beliebig oft trocknen

<sup>192</sup> Vgl. Dierks und Stein 2002, S. 37.

<sup>193</sup> Vgl. Schroeder 2019, S. 344.

<sup>194</sup> Vgl. Verein Deutscher Zementwerke e.V. 2008, S. 107–115.

oder mit Wasser erneut in einen formbaren Zustand gebracht werden. In Tabelle 60 sind die Reaktionsgleichungen der vier Klinkerphasen: Tricalciumsilikat, Dicalciumsilikat, Tricalciumaluminat und Calciumaluminatferrit sowie von Lehm unter Zugabe von Wasser zusammengefasst. Die Fähigkeit durch Wasserzugabe wieder Formbar werden zu können erhöht die Recyclingfähigkeit des Lehm gegenüber des Betons, mindert jedoch seine Dauerhaftigkeit, insbesondere unter direkter Bewitterung.

Tabelle 60: Reaktionsgleichungen der Klinkerphasen beim Abbinden von Portlandzement<sup>195</sup>, sowie die Reaktionsgleichung beim Trocknen von Lehm<sup>196</sup>

Klinkerphase	Reaktionsgleichung
Tricalciumsilikat (C3S)	$2 (3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2) + 6 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 3 \text{ CaO} \cdot 2 \text{ SiO}_2 \cdot 3 \text{ H}_2\text{O} + 3 \text{ Ca(OH)}_2$
Dicalciumsilikat (C2S)	$2 (2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2) + 4 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 3 \text{ CaO} \cdot 2 \text{ SiO}_2 \cdot 3 \text{ H}_2\text{O} + \text{Ca(OH)}_2$
Tricalciumaluminat (C3A)	$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 12 \text{ H}_2\text{O} + \text{Ca(OH)}_2 \rightarrow 4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13 \text{ H}_2\text{O}$
Calciumaluminatferrit (C4AF)	$4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + 13 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 13 \text{ H}_2\text{O}$
Formbarer Lehm	Getrockneter Lehm
$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{ SiO}_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})_{2+n}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{ SiO}_2 \cdot 2 \text{ H}_2\text{O} + n \text{ H}_2\text{O}$

Quelle: eigene Darstellung 2022

Neben den Materialeigenschaften, die für etwaige Berechnungen notwendig sind unterscheiden sich Lehm und Beton auch hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Umwelt. Lehm kann fast wie aus der Erde entnommen verwendet werden, in manchen Fällen ist eine mechanische Aufbereitung notwendig.<sup>197</sup> Der Zement für die Betonherstellung muss energieintensiv gebrannt werden. Etwa zwei Drittel der Emissionen entstehen bei der Kalzinierung, der Reaktion von Kalkstein zu Branntkalk ( $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ). Die Treibhausgas-Emissionen der Zementindustrie machen derzeit bis zu 8 % der globalen Gesamtemissionen aus, Tendenz steigend.<sup>198</sup> Auch in der Recyclingfähigkeit unterscheiden sich beide Materialien stark. Das Abbinden des Betons ist irreversibel. Abbruchbeton kann zwar gebrochen und als Füllmaterial im Straßenbau oder als Zuschlagstoff in RC-Betonen verwendet werden, dies ist jedoch eher die Ausnahme.<sup>199</sup> Die reversible Trocknung des Lehms ermöglicht es, diesen sofern er nicht von Schadstoffen belastet ist, durch erneutes Wässern immer wieder Formbar zu machen. Die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen Stampflehm und Beton sind in Tabelle 61 noch einmal übersichtlich zusammengefasst. Die Materialeigenschaften, welche für die Berechnungen nach dem Vorbild von Stahlbetonquerschnitten notwendig sind, ähneln sich, abgesehen vom Abbinde Prozess.

Tabelle 61: Übersicht zu Gemeinsamkeiten und Unterschieden zwischen Stampflehm und Beton.

Versagensmechanismus unter einachsigen Druck			
Stampflehm	Querzugversagen	Beton	Querzugversagen

<sup>195</sup> Vgl. Verein Deutscher Zementwerke e.V. 2008, S. 107.

<sup>196</sup> Vgl. Rauch 2021.

<sup>197</sup> Vgl. Ziegert und Röhlen 2014, S. 25–28.

<sup>198</sup> Vgl. Umweltbundesamt 2020, S. 1.

<sup>199</sup> Vgl. Klotz 06.05.2022.

Druckfestigkeit im Verhältnis zur Biegezugfestigkeit			
Stampflehm	hoch	Beton	hoch
Biegezugfestigkeit im Verhältnis zur Druckfestigkeit			
Stampflehm	niedrig	Beton	niedrig
Ertüchtigung durch Bewehrung			
Stampflehm	möglich	Beton	möglich
Herstellung			
Stampflehm	nahezu unverändert verarbeitbar	Beton	energieintensiver Brennprozess des Zementklinkers
Trocknungs-/ Abbindeprozess			
Stampflehm	Trocknung (reversibel), Anmachwasser wird an die umgebende Luft abgegeben und kann auch wieder aufgenommen werden	Beton	Hydratation (irreversibel), Wasser wird chemisch gebunden, Zementleim wird in festen Zementstein umgewandelt
Recyclingfähigkeit			
Stampflehm	Abbruchlehm kann nach Wasserzugabe direkt wiederverwendet werden	Beton	Betonbruch kann aufgemahlen und unter bestimmten Umständen in RC- Beton wiederverwendet werden
Umweltbelastung			
Stampflehm	gering	Beton	hoch (insbesondere Stahlbeton)

Quelle: eigene Darstellung 2022

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Beton in seinen mechanischen und bauphysikalischen Eigenschaften dem Baustoff Lehm in vielen Aspekten ähnelt. Daher kann in ausgewählten Kapiteln Beton,

beispielsweise in Form von Normen, als Referenz für den noch nicht genormten Baustoff Stampflehm herangezogen werden

## Bemessung

Nachfolgend wird auf Grundlage der rechnerisch und experimentell erzielten Erkenntnisse (vgl. Kapitel „Festigkeit“, ab Seite 21 und Kapitel „Wärmedurchgangswiderstand“, ab Seite 24) sowie den geltenden Anforderungen der Lehmbauregeln bzw. des GEGs anhand mehrerer Bemessungsbeispiele untersucht, wie sich die Wandtafeln aus Lehm-Kork-Mischungen unter realem Lasteinfluss verhalten, welche Wandquerschnitte nötig sind und ob diese generell umsetzbar sind. Dafür wird der vertikale Lastabtrag eines fiktiven, zweigeschossigen Gebäudes mit Flachdach berechnet und die Druckspannungen in den tragenden Wänden überprüft. Die Wandquerschnitte werden geschossweise iterativ, je nach Ausnutzung der Tragfähigkeit angepasst, um Material und somit Eigengewicht einsparen zu können. Das Gebäude besitzt eine Grundfläche von 10 x 10 m und eine Geschosshöhe von 3 m.

Als Dach- bzw. Deckensystem wird beispielhaft das Bausystem *Holz100* der Firma *Thoma* herangezogen, da sich eine Mischbauweise aus Holz und Lehm sowohl aus nachhaltiger Sicht als auch aufgrund der geringen Eigenlasten sehr gut eignet. Die 21,2 cm starken Holzdecken sind als Einfeldträger für Spannweiten von knapp 6 m zulässig. In den nachfolgenden Berechnungen wird eine maximale Deckenspannweite von 5,0 m gewählt.<sup>200</sup>

Äußeren Lasteinwirkungen, Eigenlasten und Verkehrslasten werden DIN EN 1991-1 und deren nationalen Anhänge bzw. DIN EN 1995-1 entnommen. Schnee- und Windlasten werden für den Standort Weimar in Thüringen angenommen.

In den Lehmbauregeln wird die Stabilitätsproblematik für tragende Lehmbauteile lediglich über Mindestwanddicken abgedeckt. Es wird also davon ausgegangen, dass druckbelastete Stampflehmwände aufgrund ihrer ohnehin sehr geringen Schlankheit, die der niedrigen Festigkeit des Werkstoffs geschuldet ist, nicht knickgefährdet sind. Daher werden lediglich Druckspannungsnachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit geführt. Standsicherheitsnachweise sowie Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit sind in den Lehmbauregeln ebenfalls über Mindestwanddicken und bestimmte konstruktive Vorgaben geregelt und werden im Rahmen dieser Bemessung vernachlässigt. Alle Lastannahmen sind großzügig gewählt und liegen daher auf der sicheren Seite.

Die Berechnung für ein zweischichtiges Musterbauteil zeigt, dass bei einer Tragschicht von 25 cm mindestens 19 cm Korkdämmung notwendig ist um einen U-Wert von 0,28 W/m<sup>2</sup>K einzuhalten und somit den Anforderungen des GEG gerecht zu werden (vgl. Kapitel „Wärmedurchgangswiderstand“, ab Seite 21). Ein Mischverhältnis mit 70% Lehmanteil erzielte bei den Laboruntersuchungen für die Tragschicht die höchsten Druckfestigkeiten. (vgl. Kapitel „Druckfestigkeitsprüfung“, Tabelle 27) Für die Dämmschicht erwies sich ein Mischverhältnis mit 60 % Korkanteil als sinnvoll.

In den nachfolgenden Bemessungsbeispielen wird davon ausgegangen, dass die Korksicht stabilisierend wirkt und im Gesamtbauteil eine höhere Steifigkeit erzeugt. Um verschiedene Tragfähigkeiten verschiedener Wandquerschnitte zu untersuchen, werden daher die vorgegebenen Mindestwanddicken der Lehmbauregeln teilweise ignoriert.

---

<sup>200</sup> Vgl. Thoma 2017, S. 40.

## Ständige Lasten

### Eigengewicht

Wichte Vollholz Fichte/Tanne<sup>201</sup>:

$$\gamma_{\text{Holz}} = 5,00 \text{ kN/m}^3 \quad (53)$$

Wichte der Tragschicht mit 70% Lehmanteil (vgl. Untersuchungsreihe 4 – 30 % Korkanteil, S.100):

$$\gamma_{70-30} = \rho_{70-30} \cdot g \quad [\text{kN/m}^3] \quad (54)$$

$$1715,00 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 16,82 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

Wichte der Dämmschicht mit 60% Korkanteil (vgl. Untersuchungsreihe 2 – 60 % Korkanteil, S. 93):

$$\gamma_{40-60} = \rho_{40-60} \cdot g \quad [\text{kN/m}^3] \quad (55)$$

$$1059,00 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 10,39 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

Dach-/Deckenelement H100-D21:

$$g_{k1} = \gamma_{\text{Holz}} \cdot d \quad [\text{kN/m}^2] \quad (56)$$

$$5,00 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 0,212 \text{ m} = 1,06 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

---

<sup>201</sup> Vgl. Thoma 2017, S. 6.

Dachaufbau einfache Extensivbegrünung inkl. Photovoltaikanlage<sup>202</sup>:

$$g_{Dach} + g_{Begrünung} + g_{Photovoltaik} = g_{k2} \quad [kN/m^2] \quad (57)$$

$$1,00 \frac{kN}{m^2} + 1,00 \frac{kN}{m^2} + 0,50 \frac{kN}{m^2} = 2,50 \frac{kN}{m^2}$$

Fußbodenaufbau: Trockenaufbau mit Trockenschüttung<sup>203</sup>:

$$g_{k3} = 1,00 \frac{kN}{m^2} \quad (58)$$

---

<sup>202</sup> Vgl. Albert 2014, 3.12; 4.9.

<sup>203</sup> Vgl. Thoma 2017, S. 6.

## Vorrübergehende Lasten

### Verkehrslasten

Es wird Kategorie A3 (Wohn- und Aufenthaltsräume) bzw. B1 (Büroflächen, Arbeitsflächen, Flure) inkl. einem Trennwandzuschlag von  $0,8 \text{ kN/m}^2$  angenommen.<sup>204</sup>

$$q_k = q_1 + q_T \quad [kN/m^2] \quad (59)$$

$$2,00 \frac{kN}{m^2} + 0,80 \frac{kN}{m^2} = 2,80 \frac{kN}{m^2}$$

### Windlast

Lastannahmen für Windlasten sind in DIN EN 1991-1-4 geregelt. Für den Standort Weimar gilt:

Windzone II,  $q_{b,0} = 0,39 \text{ kN/m}^2$ ;  $v_{b,0} = 25,0 \text{ m/s}$

Abmessungen des Gebäudes quer zum Wind  $b = 10 \text{ m}$ , Bauwerkshöhe  $h = 6 \text{ m}$

Für den vertikalen Lastabtrag wird ausschließlich Winddruck auf das Flachdach angesetzt. Der vertikale Windsog wirkt in dem Fall günstig und kann daher vernachlässigt werden.

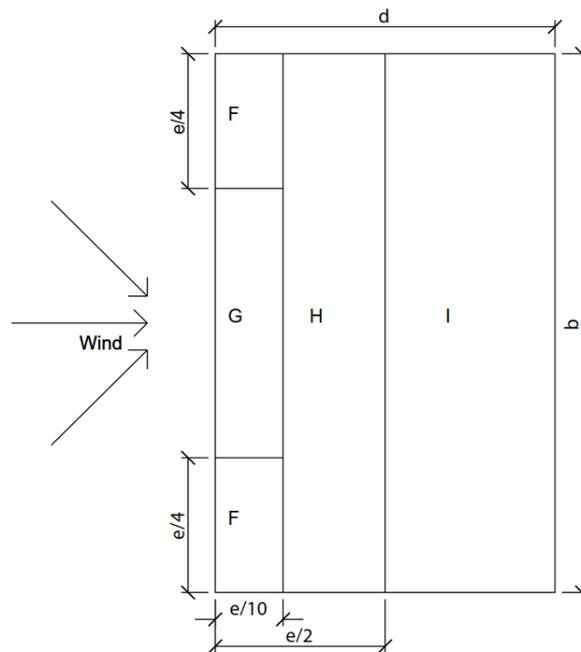
Für  $h \leq 10 \text{ m}$  und der Geländekategorie Binnenland ergibt sich ein Böengeschwindigkeitsdruck für Bauwerke bis  $25 \text{ m}$  Höhe nach dem vereinfachten Verfahren von  $q_p = 0,65 \text{ kN/m}^2$ .<sup>205</sup>

---

<sup>204</sup> Vgl. DIN EN 1991-1-1-1/NA, S. 6.

<sup>205</sup> Vgl. DIN EN 1991-1-1-4/NA, S. 19.

Abbildung 167: Einteilung der Dachflächen bei Flachdächern



Quelle: eigene Anfertigung 2022 nach Albert 2014, 3.32

Bei scharfkantigem Traufbereich gilt für den Bereich I ein Außendruckbeiwert von  $c_{p,10} = +0,2$ . (vgl. Abbildung 167). In den Bereichen F, G und H treten nur abhebende Windlasten auf und können daher vernachlässigt werden.<sup>206</sup> Daraus folgt:

$$w_k = c_{p,10} \cdot q_p \quad [kN/m^2] \quad (60)$$

$$0,2 \cdot 0,65 \frac{kN}{m^2} = 0,13 \frac{kN}{m^2}$$

<sup>206</sup> Vgl. DIN EN 1991-1-1-4/NA, S. 9.

## Schneelast

Lastannahmen für Schneelasten sind in DIN EN 1991-1-3 geregelt. Für den Standort Weimar gilt:

Höhe über NN: A = 220m; Schneelastzone II

Tabelle 62: Schneelastzonen nach Gebieten/Städten und zugehörige Werte für Schneelast.

Schneelastzonen	Gebiete/Städte	Charakteristischer Wert der Schneelast auf dem Boden in kN/m <sup>2</sup>
Zone 1:	Darmstadt, Dortmund, Düsseldorf, Frankfurt a.M., Karlsruhe, Köln, Mainz, Nürnberg, Ulm	$s_k = 0,19 + 0,91 \cdot \left(\frac{A + 140}{760}\right)^2 \geq 0,65$
Zone 1a:	Augsburg, München, Regensburg	$s_k = 1,25 \cdot \left[0,19 + 0,91 \cdot \left(\frac{A + 140}{760}\right)^2\right] \geq 0,81$
Zone 2:	Aachen, Berlin, Bremen, Chemnitz, Coburg, Dresden, <b>Erfurt</b> , Freiburg, Fulda, Hamburg, Hannover, Kassel, Leipzig, Magdeburg, Nordhausen, Stuttgart, Zwickau	$s_k = 0,25 + 1,91 \cdot \left(\frac{A + 140}{760}\right)^2 \geq 0,85$
Zone 2a:	Rhön, Siegen	$s_k = 1,25 \cdot \left[0,25 + 1,91 \cdot \left(\frac{A + 140}{760}\right)^2\right] \geq 1,06$
Zone 3: <sup>1)</sup>	Berchtesgaden, Erlass Harz-Insel, Garmisch-Patenkirchen, Rostock, Suhl	$s_k = 0,31 + 2,91 \cdot \left(\frac{A + 140}{760}\right)^2 \geq 1,10$
	<sup>1)</sup> In Zone 3 können für bestimmte Lagen (z.B. Oberharz, Hochlagen des Fichtelgebirges, Reit im Winkl, Obernach/Walchensee) höhere Werte maßgebend sein. Angaben über die Schneelast in diesen Regionen sind bei den zuständigen Stellen einzuholen.	

Quelle: eigene Anfertigung 2022 in Anlehnung an Albert 2014, 3.49

Für Schneelastzone II ergibt sich eine Schneelast am Boden von  $s = 0,85 \text{ kN/m}^2$ . (vgl. Tabelle 62) Für die Flächenlast auf dem Dach wird die Schneelast am Boden mit einem Formbeiwert  $\mu_1$  abhängig von der Geometrie und der Neigung des Dachs multipliziert.<sup>207</sup>

$$s_k = \mu_1 \cdot s_{\text{Schneelastzone II}} \quad [\text{kN/m}^2] \quad (61)$$

<sup>207</sup> Vgl. DIN EN 1991-1-3, 16f.

$$0,8 \cdot 0,85 \frac{kN}{m^2} = 0,68 \frac{kN}{m^2}$$

### Schnittgrößenermittlung

Da es sich um Holzdecken handelt, wird für die Schnittgrößenermittlung wird DIN 1995-1-1 herangezogen. Es wird von einer Nutzungsklasse (NKL) 1 – beheizte Innenräume – ausgegangen. Die Lasteinwirkungsdauer (KLED) für Wind- und Schneelasten sind kurz.<sup>208</sup> Für die Ständige und vorübergehende Einwirkungskombination im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GzT) ergibt sich mit der Schneelast als Leiteinwirkung:

$$E_d = \sum \gamma_G \cdot g_k + \gamma_{Q,1} \cdot q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,1} \cdot g_{k,i} \quad (62)$$

---

<sup>208</sup> Vgl. DIN EN 1995-1-1, S. 25.

### Beispiel 1: 25,0 cm Tragschicht in beiden Geschossen

Linienlast der Tragschicht (25 cm):

$$g_{kT} = \gamma_{70-30} \cdot b_T \cdot h \quad [kN/m] \quad (63)$$

$$16,82 \frac{kN}{m^3} \cdot 0,25 m \cdot 3,0 m = 12,62 \frac{kN}{m}$$

Linienlast der Dämmschicht (19 cm):

$$g_{kD} = \gamma_{40-60} \cdot b_D \cdot h \quad [kN/m] \quad (64)$$

$$10,39 \frac{kN}{m^3} \cdot 0,19 m \cdot 3,0 m = 5,92 \frac{kN}{m}$$

Lehmtafel gesamt (44cm):

$$g_{kLTBw} = g_{k1} + g_{k2} \quad [kN/m] \quad (65)$$

$$12,62 kN/m + 5,92 kN/m = 18,54 \frac{kN}{m}$$

Bei einer maximalen Spannweite von 5,0 m ergibt sich daraus eine Lasteinzugsbreite 2,5 m. Nach (62) ergibt sich die Linienlast aus der Dachdecke inkl. Wandtafel aus:

$$\begin{aligned} q_{d,1} &= 1,35 \cdot 18,54 \frac{kN}{m} + \left( 1,35 \cdot \left( 2,5 \frac{kN}{m^2} + 1,06 \frac{kN}{m^2} \right) + 1,5 \cdot \left( 0,68 \frac{kN}{m^2} + 0,6 \cdot 0,13 \frac{kN}{m^2} \right) \right) \cdot \frac{5,00 m}{2} \\ &= 39,89 \frac{kN}{m} \end{aligned} \quad (66)$$

Die Linienlast aus der Geschossdecke inkl. Wandtafel beträgt:

$$q_{d,2} = 1,35 \cdot 18,54 \frac{kN}{m} + \left( 1,35 \cdot \left( 1,0 \frac{kN}{m^2} + 1,06 \frac{kN}{m^2} \right) + 1,5 \cdot 2,8 \frac{kN}{m^2} \right) \cdot \frac{5,00 m}{2} = 42,48 \frac{kN}{m} \quad (67)$$

## Druckspannungsnachweise

Die Bemessungsdruckspannung pro Meter berechnet sich aus dem Quotienten der Linienlasten und der Auflagerfläche der Tragschicht von 0,25 m.

Für das Obergeschoss:

$$\sigma_{d,1} = \frac{q_{d,1}}{A} \quad [kN/m^2] \quad (68)$$

$$\sigma_{d,1} = \frac{39,89 \text{ kN/m}}{1 \text{ m} \cdot 0,25 \text{ m}} = 159,56 \frac{kN}{m^2} \cong 0,160 \frac{N}{mm^2} \text{ (pro Meter)}$$

Für das Untergeschoss:

$$\sigma_{d,2} = \frac{q_{d,2}}{A} \quad [kN/m^2] \quad (69)$$

$$\sigma_{d,2} = \frac{39,89 \frac{kN}{m} + 42,48 \frac{kN}{m}}{1 \text{ m} \cdot 0,25 \text{ m}} = 329,48 \frac{kN}{m^2} \cong 0,329 \frac{N}{mm^2} \text{ (pro Meter)}$$

In den Lehmbauregeln wird für Stampflehm mit der Druckfestigkeit von 2,0 N/mm<sup>2</sup> eine zulässige Druckspannung von  $\sigma_{Rd} = 0,3 \text{ N/mm}^2$  angegeben.<sup>209</sup>

Daraus folgt:

$$\eta_{OG} = \frac{\sigma_{d,1}}{\sigma_{d,Rd}} = \frac{0,160 \frac{N}{mm^2}}{0,30 \frac{N}{mm^2}} = 0,53 \quad (70)$$

$$\eta_{EG} = \frac{\sigma_{d,2}}{\sigma_{d,Rd}} = \frac{0,329 \frac{N}{mm^2}}{0,30 \frac{N}{mm^2}} = 1,10 \quad (71)$$

<sup>209</sup> Vgl. Volhard und Röhlen 2009, S. 50.

Die Ausnutzung der Tragfähigkeit liegt im Obergeschoss bei etwa 53 %. Im Erdgeschoss reicht eine Tragschicht von 25,0 cm innerhalb des Wandquerschnitts nicht aus. Die Wandtafeln werden um ca. 110 % ausgenutzt, weshalb kein Nachweis erbracht werden kann.

## Beispiel 2: 32,5 cm Tragschicht in beiden Geschossen

Die erforderliche Schichtdicke aus reinem Kork abzüglich des Korkanteils der Tragschicht ergibt sich aus:

$$\text{erf. } d_1 = 19,0 \text{ cm} - 0,3 \cdot 32,5 \text{ cm} = 9,25 \text{ cm} \quad (72)$$

Um die erforderliche Gesamtdicke einer Dämmschicht aus Kork zu ermitteln, muss folgende Gleichung gelten:

$$\text{erf. } d_{ges} = \frac{9,25 \text{ cm}}{0,60} = 15,42 \text{ cm} \quad (73)$$

Demnach reicht eine 15,5 cm dicke Dämmung mit 60 % Korkanteil aus und es ergibt sich ein Gesamtwandaufbau von 48 cm.

Linienlast der Tragschicht (32,5 cm) nach (63):

$$16,82 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 0,325 \text{ m} \cdot 3,0 \text{ m} = 16,40 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (74)$$

Linienlast der Dämmschicht (15,5 cm) nach (64):

$$10,39 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 0,155 \text{ m} \cdot 3,0 \text{ m} = 4,83 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (75)$$

Lehmtafel gesamt (48 cm) nach (65):

$$16,40 \text{ kN/m} + 4,83 \text{ kN/m} = 21,23 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (76)$$

Bei einer maximalen Spannweite von 5,0 m ergibt sich daraus eine Lasteinzugsbreite 2,5 m. Nach (62) ergibt sich die Linienlast aus der Dachdecke inkl. Wandtafel aus:

$$\begin{aligned} q_{d,1} &= 1,35 \cdot 21,23 \frac{\text{kN}}{\text{m}} + \left( 1,35 \cdot \left( 2,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 1,06 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right) + 1,5 \cdot \left( 0,68 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 0,6 \cdot 0,13 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right) \right) \cdot \frac{5,00 \text{ m}}{2} \\ &= 43,52 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \end{aligned} \quad (77)$$

Die Linienlast aus der Geschossdecke inkl. Wandtafel beträgt:

$$q_{d,2} = 1,35 \cdot 21,23 \frac{kN}{m} + \left( 1,35 \cdot \left( 1,0 \frac{kN}{m^2} + 1,06 \frac{kN}{m^2} \right) + 1,5 \cdot 2,8 \frac{kN}{m^2} \right) \cdot \frac{5,00 m}{2} = 46,11 \frac{kN}{m} \quad (78)$$

### Druckspannungsnachweise

Die Bemessungsdruckspannung pro Meter berechnet sich aus dem Quotienten der Linienlasten und der Auflagerfläche der Tragschicht von 0,325 m:

Für das Obergeschoss gilt (68):

$$\sigma_{d,1} = \frac{43,52 \frac{kN}{m}}{1 m \cdot 0,325 m} = 133,91 \frac{kN}{m^2} \cong 0,134 \frac{N}{mm^2} \text{ (pro Meter)} \quad (79)$$

Für das Untergeschoss gilt (69):

$$\sigma_{d,2} = \frac{43,52 \frac{kN}{m} + 46,11 \frac{kN}{m}}{1 m \cdot 0,325 m} = 275,78 \frac{kN}{m^2} \cong 0,276 \frac{N}{mm^2} \text{ (pro Meter)} \quad (80)$$

Daraus folgt:

$$\eta_{OG} = \frac{\sigma_{d,1}}{\sigma_{d,Rd}} = \frac{0,134 \frac{N}{mm^2}}{0,30 \frac{N}{mm^2}} = 0,45 \quad (81)$$

$$\eta_{EG} = \frac{\sigma_{d,2}}{\sigma_{d,Rd}} = \frac{0,276 \frac{N}{mm^2}}{0,30 \frac{N}{mm^2}} = 0,92 \quad (82)$$

Die Ausnutzung der Tragfähigkeit liegt im Obergeschoss bei etwa 45 %. Im Erdgeschoss sind die Wandtafeln auf 92 % ihrer Tragfähigkeit ausgenutzt.

**Beispiel 3: 25,0 cm Tragschicht im OG | 32,5 cm Tragschicht im EG**

Die Linienlast aus der Dachdecke inkl. Wandtafel beträgt nach (66):

$$q_{d,1} = 39,89 \frac{kN}{m} \quad (83)$$

Die Linienlast aus der Geschossdecke inkl. Wandtafel beträgt nach (78):

$$q_{d,2} = 46,11 \frac{kN}{m} \quad (84)$$

**Druckspannungsnachweise**

Die Bemessungsdruckspannung pro Meter berechnet sich aus dem Quotienten der Linienlasten und der Auflagerfläche der Tragschicht von 0,325 m. Für das Untergeschoss gilt (69):

$$\sigma_{d,2} = \frac{39,89 \frac{kN}{m} + 46,11 \frac{kN}{m}}{1 m \cdot 0,325 m} = 264,62 \frac{kN}{m^2} \cong 0,265 \frac{N}{mm^2} \text{ (pro Meter)} \quad (85)$$

$$\eta_{EG} = \frac{\sigma_{d,2}}{\sigma_{d,Rd}} = \frac{0,265 \frac{N}{mm^2}}{0,30 \frac{N}{mm^2}} = 0,88 \quad (86)$$

Im Erdgeschoss sind die Wandtafeln auf 88 % ihrer Tragfähigkeit ausgenutzt.

### Beispiel 4: 20,0 cm Tragschicht im OG | 28,0 cm Tragschicht im EG

#### Obergeschoss:

Die erforderliche Schichtdicke aus reinem Kork abzüglich des Korkanteils der Tragschicht ergibt sich aus:

$$\text{erf. } d_1 = 19,00 \text{ cm} - 0,30 \cdot 20,00 \text{ cm} = 13,00 \text{ cm} \quad (87)$$

Um die erforderliche Gesamtdicke einer Dämmschicht aus Kork zu ermitteln, muss folgende Gleichung gelten:

$$\text{erf. } d_{ges} = \frac{13,00 \text{ cm}}{0,60} = 21,70 \text{ cm} \quad (88)$$

Demnach reicht eine 21,50 cm dicke Dämmung mit 60 % Korkanteil aus und es ergibt sich ein Gesamtwandaufbau von 41,50 cm.

Linienlast der Tragschicht (20,00 cm) nach (63):

$$16,82 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 0,20 \text{ m} \cdot 3,00 \text{ m} = 10,09 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (89)$$

Linienlast der Dämmschicht (21,50 cm) nach (64):

$$10,39 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 0,215 \text{ m} \cdot 3,00 \text{ m} = 6,70 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (90)$$

Lehmtafel gesamt (41,50 cm) nach (65):

$$10,09 \text{ kN/m} + 6,70 \text{ kN/m} = 16,79 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (91)$$

Die Linienlast aus der Dachdecke inkl. Wandtafel beträgt nach (62):

$$q_{d,1} = 1,35 \cdot 16,79 \frac{\text{kN}}{\text{m}} + \left( 1,35 \cdot \left( 2,50 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 1,06 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right) + 1,5 \cdot \left( 0,68 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 0,60 \cdot 0,13 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right) \right) \cdot \frac{5,00 \text{ m}}{2} = 37,53 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (92)$$

#### Untergeschoss:

Die erforderliche Schichtdicke aus reinem Kork abzüglich des Korkanteils der Tragschicht ergibt sich aus:

$$erf. d_1 = 19,00 \text{ cm} - 0,30 \cdot 28,00 \text{ cm} = 10,60 \text{ cm} \quad (93)$$

Um die erforderliche Gesamtdicke einer Dämmschicht aus Kork zu ermitteln, muss folgende Gleichung gelten:

$$erf. d_{ges} = \frac{10,60 \text{ cm}}{0,60} = 17,70 \text{ cm} \quad (94)$$

Demnach reicht eine 17,5 cm dicke Dämmung mit 60 % Korkanteil aus und es ergibt sich ein Gesamtwandaufbau von 45,5 cm.

Linienlast der Tragschicht (28,0 cm) nach (63):

$$16,82 \frac{kN}{m^3} \cdot 0,28 \text{ m} \cdot 3,00 \text{ m} = 14,13 \frac{kN}{m} \quad (95)$$

Linienlast der Dämmschicht (17,5 cm) nach (64):

$$10,39 \frac{kN}{m^3} \cdot 0,175 \text{ m} \cdot 3,00 \text{ m} = 5,45 \frac{kN}{m} \quad (96)$$

Lehmtafel gesamt (45,5 cm) nach (65):

$$14,13 \text{ kN/m} + 5,45 \text{ kN/m} = 19,58 \frac{kN}{m} \quad (97)$$

Die Linienlast aus der Geschossdecke inkl. Wandtafel beträgt nach (62):

$$q_{d,2} = 1,35 \cdot 19,58 \frac{kN}{m} + \left( 1,35 \cdot \left( 1,0 \frac{kN}{m^2} + 1,06 \frac{kN}{m^2} \right) + 1,5 \cdot 2,8 \frac{kN}{m^2} \right) \cdot \frac{5,00 \text{ m}}{2} = 43,89 \frac{kN}{m} \quad (98)$$

### Druckspannungsnachweise

Die Bemessungsdruckspannung pro Meter berechnet sich aus dem Quotienten der Linienlasten und der Auflagerfläche der Tragschicht von 0,20 m bzw. 0,28 m:

Für das Obergeschoss gilt (68):

$$\sigma_{d,1} = \frac{37,53 \text{ kN/m}}{1 \text{ m} \cdot 0,20 \text{ m}} = 187,65 \frac{kN}{m^2} \cong 0,188 \frac{N}{mm^2} \text{ (pro Meter)} \quad (99)$$

Für das Untergeschoss:

$$\sigma_{d,2} = \frac{37,53 \frac{kN}{m} + 43,89 \frac{kN}{m}}{1 m \cdot 0,28 m} = 290,79 \frac{kN}{m^2} \cong 0,291 \frac{N}{mm^2} \text{ (pro Meter)} \quad (100)$$

Daraus folgt:

$$\eta_{OG} = \frac{\sigma_{d,1}}{\sigma_{d,Rd}} = \frac{0,188 \frac{N}{mm^2}}{0,30 \frac{N}{mm^2}} = 0,63 \quad (101)$$

$$\eta_{EG} = \frac{\sigma_{d,2}}{\sigma_{d,Rd}} = \frac{0,291 \frac{N}{mm^2}}{0,30 \frac{N}{mm^2}} = 0,97 \quad (102)$$

Die Ausnutzung der Tragfähigkeit liegt im Obergeschoss bei etwa 63 %. Im Erdgeschoss sind die Wandtafeln auf 97 % ihrer Tragfähigkeit ausgenutzt.

## Auswertung

Die Bemessungsbeispiele zeigen, dass die Tragfähigkeit der Wände eines zweigeschossigen Gebäudes in Lehmtafelbauweise nach den aktuellen Anforderungen der Lehmbaueregeln und dem GEG nachgewiesen werden kann. Im Rahmen dieser Bemessung wurde rechnerisch vereinfacht davon ausgegangen, dass sich eine monolithische Wand mit dem Mischwerkstoff aus Lehm und Kork bauphysikalisch gleichwertig verhält wie eine Wand mit einer separaten Trag- und Dämmschicht. Diese Annahme gilt es in zukünftigen, praktischen Simulationen zu belegen.

Ferner ist davon auszugehen, dass durch ein normativ geregeltes Nachweiskonzept mit Teilsicherheitsbeiwerten, wie es bei den etablierten Bauweisen Anwendung findet, deutlich geringere Wandquerschnitte möglich sind und die Eigenlasten somit erheblich reduziert werden können. Betrachtet man das Eigengewicht der Wandtafeln, zeigt sich, dass diese, je nach Querschnitt, weit mehr als die Hälfte der gesamten Bemessungslast aus Dach- bzw. Geschossdecke ausmachen. Reduziert man den Querschnitt entgegen den Lehmbaueregeln, sind im Obergeschoss Tragschichtdicken von 20 cm oder weniger möglich, sofern man davon ausgeht, dass das Gesamtbauteil nicht stabilitätsgefährdet ist.

In der Betrachtung wurde bislang jeweils ein Mischverhältnis pro Schicht untersucht. Optimale Mischverhältnisse für das bestmögliche Trag- und Stabilitätsverhalten von Trag- und Dämmschicht gilt es weiterhin zu untersuchen, zumal reine Stampflehmmischungen mit Tonmehlzuschlag und Faserverstärkung Druckfestigkeiten von weit über 5 N/mm<sup>2</sup> erreichen können.

## Vorfertigung, Transport und Einbau

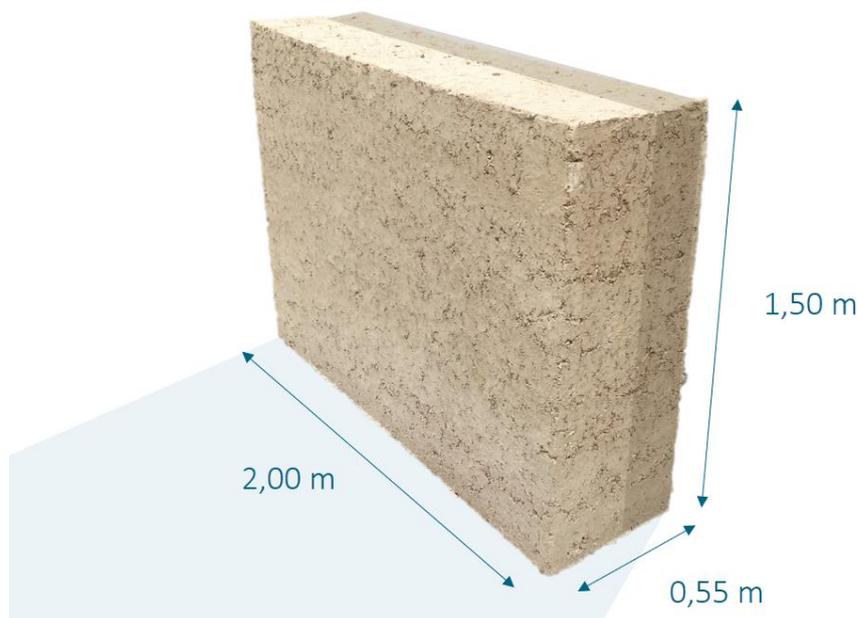
### Vorfertigung

Je nach gewünschter Oberflächenqualität des Endproduktes sind unterschiedliche Vorfertigungs-Strategien denkbar. Während sich bei Fertigteilen mit angestrebter Sichtqualität eine Fertigung als Wandstrang mit nachträglichem Zuschnitt auf die gewünschte Fertigteilgröße anbietet, können Elemente, die keine optischen Ansprüche erfüllen müssen, in Einzelschalungen gefertigt werden.

*„Die Vorfertigung hat entscheidende Vorteile: Sie ist wetterunabhängig, terminlich kalkulierbar, verkürzt die Arbeitszeit auf der Baustelle und kann somit in industrialisierte Bauprozesse integriert werden. [...] Die Vorfertigung in der Werkhalle erlaubt eine optimierte Detailarbeit. Das ermöglicht eine flexible Ausführung auch bei grossen Dimensionen.“<sup>210</sup>*

Fertigt man die Wandtafeln fortlaufend als Wandstrang, so wird nach dem Trocknen an den Stirn -bzw. Ober- und Unterseiten eine Art Falzverbindung zum Fügen der Bauteile, sowie für Fensteröffnungen und Rohrleitungen eingefräst. Durch Wandtafeln (vgl. Abbildung 168) mit den Maßen 2,0 m x 1,50 m x 0,55 m (l x h x t) lassen sich sowohl Raumhöhen von 3,0 m für den privaten Wohnungsbau als auch öffentliche Bauten mit 4,5 m Raumhöhe realisieren.

Abbildung 168: Abmessungen Lehmtafelbauweise



Quelle: eigene Anfertigung 2023

Ein Fertigteil mit den genannten Maßen, bestehend aus ca. 0,3 m Tragschicht und 0,25 m Dämmschicht, wiegt etwa 2,3 t (vgl. Formel (103)), was hinsichtlich des Transports und des Einbaus gut handhabbar ist.

<sup>210</sup> Rauch 2013.

Damit sind die Fertigteile nur etwa halb so schwer wie jene vom Ricola-Kräuterzentrum in Laufen.<sup>211</sup> Längere Bauteile sind je nach Einsatz ebenfalls denkbar.

Die Berechnung des Gewichts der Lehmtafel kann nach Formal (103), gesplittet nach Trag- und Dämmschicht, berechnet werden:

$$\text{Rohdichte}_{\text{Lehmtafelschicht}} \cdot l_{\text{Lehmtafel}} \cdot h_{\text{Lehmtafel}} \cdot b_{\text{Schicht}} = \text{Gewicht}_{\text{Lehmtafel}} \quad [\text{kg}] \quad (103)$$

Gewicht Tragschicht:

$$1700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 2,0\text{m} \cdot 1,5\text{m} \cdot 0,3\text{m} = 1.530\text{kg}$$

Gewicht Dämmschicht:

$$1054 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 2,0\text{m} \cdot 1,5\text{m} \cdot 0,25\text{m} = 791\text{kg}$$

Gewicht Lehmtafel:

$$1530\text{kg} + 791\text{kg} = 2.321\text{kg}$$

## Forschung zu robotergesteuerten Herstellungsverfahren

Die Stampflehmabauweise bringt den Nachteil mit sich, dass sie durch den hohen Schalungsaufwand und die manuelle Verdichtung sehr arbeits-, zeit- und kostenintensiv ist. Daher gibt es derzeit zahlreiche Forschungsvorhaben, die sich mit der robotergesteuerten Verarbeitung von Lehm beschäftigen. Additive Fertigungsverfahren wie etwa 3D-Druck sollen einerseits dazu beitragen Zeit, Kosten oder Ressourcen etwa durch Topologieoptimierung einzusparen und gleichzeitig eine präzise Vorfabrikation sicherzustellen, andererseits sind durch diese Technologie komplexe Bauteilgeometrien möglich, die durch herkömmliche Schalungen nicht oder nur sehr aufwendig umzusetzen sind. Da der schichtweise aufgetragene Lehm nicht verdichtet wird, weisen die entstandenen Konstruktionen bislang allerdings eine sehr geringe mechanische Beanspruchbarkeit auf.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgt ein ebenfalls von *Zukunft Bau* gefördertes Forschungsvorhaben der TU Braunschweig. Hier nehmen die Forschenden Bezug auf die traditionelle Stampflehmabauweise, indem ein Lehm-Stein Gemisch schichtweise aufgetragen und verdichtet wird. Da Stampflehmabauweise unmittelbar nach dem Verdichten ausgeschalt werden können, wird eine aktive Schalung verwendet, die gezielt nur den Bereich einschalt, in dem das Material aufgetragen und verdichtet wird. Das Schalungselement bewegt sich fortlaufend mit dem Roboterarm mit und verursacht durch die kleine Schalungsoberfläche nur sehr wenig Reibung zwischen Schalung und Bauteil.<sup>212</sup> Wirtschaftlichkeit wird also nicht wie herkömmlich durch eine Vergrößerung der Schalung, sondern durch eine verfeinerte Prozesssteuerung erreicht. Als Verdichtungsmethoden wurden bereits pneumatische Stampfer und Rüttelplatten erprobt.<sup>213</sup>

<sup>211</sup> Vgl. Rauch 2013.

<sup>212</sup> Vgl. Kloft 2019.

<sup>213</sup> Vgl. Kloft et al. 2020.

### Transport und Einbau

Da Lehm, verglichen mit Beton, deutlich spröder ist und eine viel geringere Festigkeit aufweist, unterscheiden sich die logistischen Maßnahmen des Lehmfertigteilbaus vom Betonfertigteilbau. Die Lehmtafeln können nicht wie Betonfertigteile mit Hilfe von Transportankern oder hydraulischen Klemmen transportiert werden und benötigen generell einen deutlich behutsameren Umgang. Daher werden die Lehmfertigteile für den Transport zunächst auf Holzbrettern oder -balken gelagert und schließlich mit mehreren Spanngurten im Abstand von etwa 50-70 cm umspannt, sodass sich die Last auf die gesamte Länge verteilen kann.

Für eine kraftschlüssige Fügung auf der Baustelle sollen die Lehmbautafeln mit einem Falz versehen werden. Um keine zu dünnen Wandsegmente zu erzeugen, bietet sich die Lage der Falz am Übergang von Trag- zu Dämmschicht an. Dadurch bildet dieser Punkt ein wesentliches Planungsdetail, da im Verbindungsbereich möglichst keine Scherkräfte oder Biegung auf die potenziell instabilere Dämmschicht ausgeübt werden dürfen (vgl. Abbildung 169).

Abbildung 169: Lage der Falz.



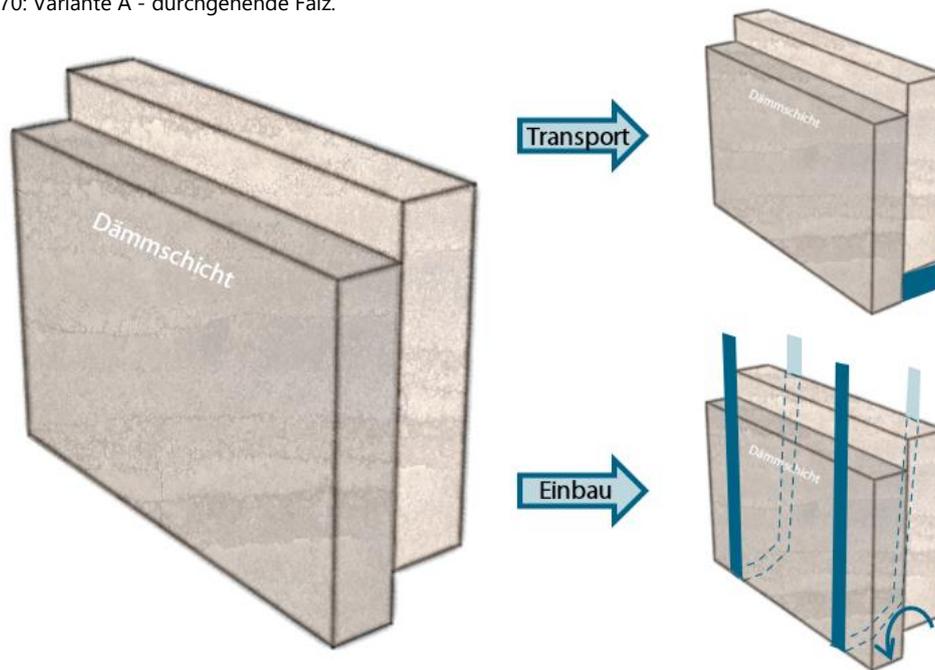
Quelle: eigene Anfertigung 2023

Um den Herstellungsprozess möglichst einfach zu halten wird die Falz erst nach der Trocknung mit einer Steinsäge aus dem Bauteil herausgeschnitten. Durch dieses Vorgehen kann eine ausreichende Maßhaltigkeit sichergestellt werden. Die Reststücke können in Wasser gelöst (vgl. Kapitel Rezyklierbarkeit, ab S. 140) und dem Fertigungsprozess wieder beigeführt werden. Somit entstehen bei diesem Schritt keine vermeidbaren mineralischen Abfälle.

Sowohl im Fertigteilwerk als auch auf der Baustelle hängt am Kranhaken für den zum Heben der Tafel, ein Profil in der Länge des Fertigteils, an welchem wiederum die Gurte über die gesamte Länge befestigt werden. Auf der Baustelle werden die Fertigteile dann mit Hilfe eines Krans gesetzt. Sämtliche Fugen und Öffnungen werden nachträglich mit Lehmputz bzw. Trasskalkmörtel verfüllt und ausgebessert.

Für die genaue Ausbildung der Verbindung gibt es mehrere Möglichkeiten. Eine durchgehende Verbindung (vgl. Abbildung 170) bringt den Vorteil einer einfachen Fertigung, über nur zwei Schnitte, mit sich. Gleichzeitig bildet die exponierte Dämmschicht eine Schwachstelle. Beim Transport kann diese zwar durch das Unterlegen von Balken ausgeräumt werden, bei der Fügung auf der Baustelle können jedoch keine Balken die Dämmschicht schützen, sodass diese ausbrechen könnte. Auch die Spannung der Hebeschlaufen auf der Bauteilrückseite stellt beim Fügen eine Herausforderung dar.

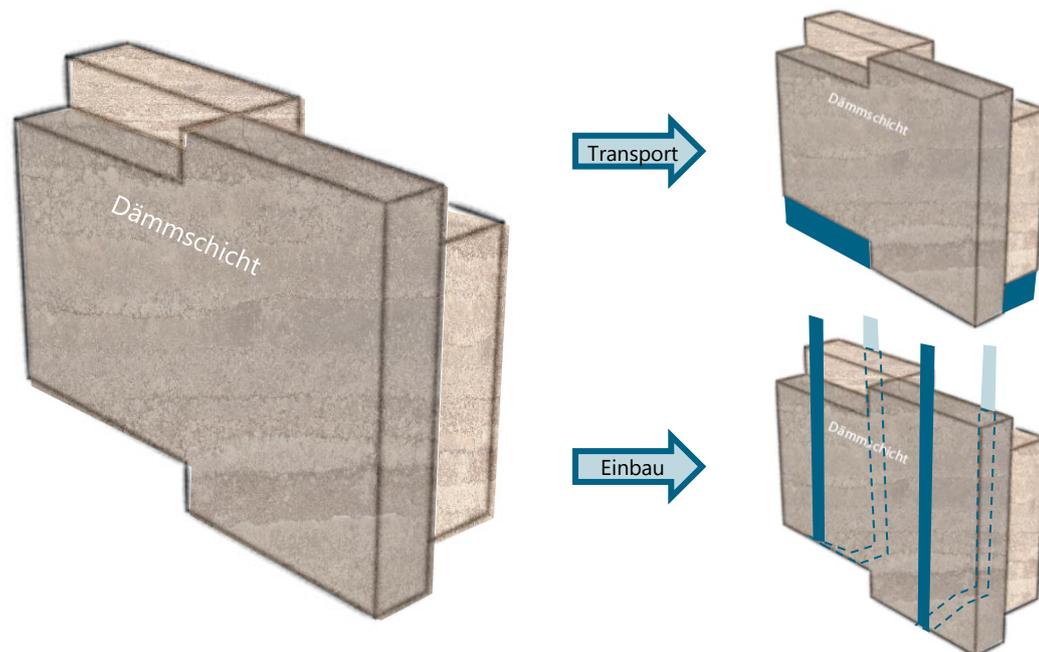
Abbildung 170: Variante A - durchgehende Falz.



Quelle: eigene Anfertigung 2023

Eine mögliche Alternative wäre die Ausbildung von zwei Falzen (vgl. Abbildung 171). Diese Variante ist in der Fertigung komplexer, würde jedoch im eingebauten Zustand weniger Biegung auf die Dämmschicht übertragen. Beim Fügen auf der Baustelle würden die Hebeschlaufen auf der einen Seite des Bauteils zwar nur auf die Tragschicht wirken, auf der anderen Seite würde jedoch nach wie vor das Problem der exponierten Dämmschicht bestehen bleiben. Auch die Spannung der Hebeschlaufen stellt bei dieser Option ein Problem beim Fügen dar.

Abbildung 171: Variante B - unterbrochene Falz.

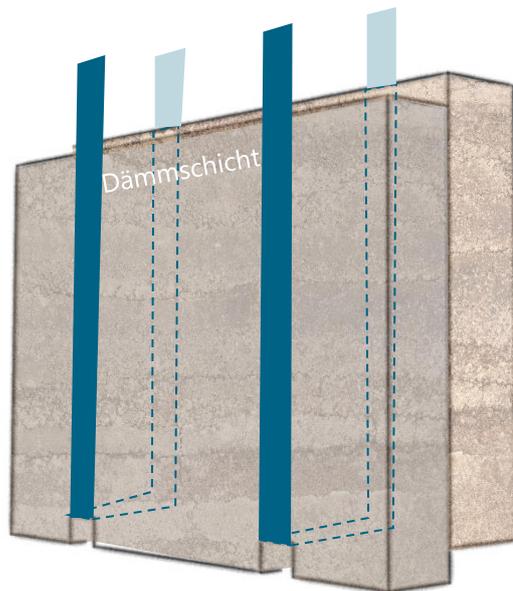


Quelle: eigene Anfertigung 2023

Um die Problematik mit der Dämmschicht zu umgehen, soll die Hebeschleufe auf allen Seiten bis auf die Tragschicht geführt werden. Eine Aussparung quer zum Bauteil ermöglicht dies und die Bauteile lassen sich problemlos auf der Baustelle fügen (vgl. Abbildung 172). Wie bei der vom Architekturbüro Conte Pianetti Zanetta geplante Landwirtschaftsschule Mezzana, welche 2012 fertiggestellt wurde, können die Fertigelemente anschließend „mit Lehmsandmörtel verklebt“<sup>214</sup> und die Aussparung in der Dämmschicht mit der Lehm-Kork-Mischung verschlossen werden.

<sup>214</sup> Rauch 2013.

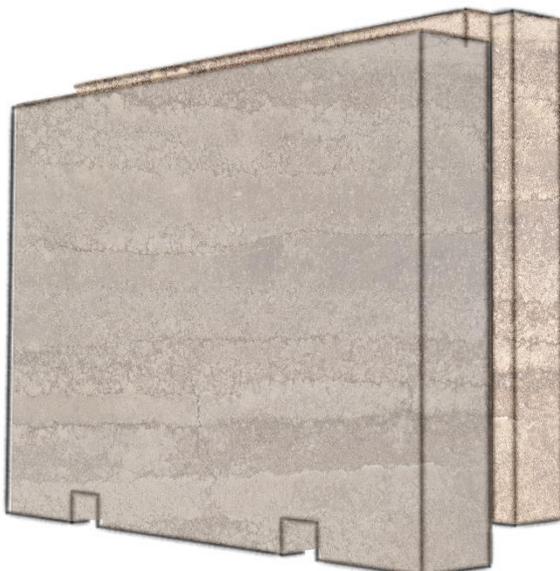
Abbildung 172: Vertikale Aussparung im Fertigbauteil.



Quelle: eigene Anfertigung 2023

Eine zusätzliche vertikale Nut auf der einen und eine vertikale Feder auf der anderen Seite, könnte den Bauteilen zusätzliche Stabilität verleihen und nach dem Fügen auf der Baustelle mit Trasskalkmörtel kraftschlüssig vergossen werden. Dieses Vorgehen wurde beispielsweise auch bei der bereits erwähnten Landwirtschaftsschule gewählt.<sup>215</sup> Durch das Einsägen der 10 cm breiten und 8 cm tiefen Nut in die Tragschicht entsteht schließlich ein gebrauchstaugliches Fertigteil, welche alle Anforderungen an Herstellung, Transport und Einbau erfüllt (vgl. Abbildung 173).

Abbildung 173: Fertigteil Lehmtafelbauweise.



Quelle: eigene Anfertigung 2023

<sup>215</sup> Vgl. Rauch 2013.

## Architektursprache

Im Rahmen des fünften Arbeitspaketes soll eine ansprechende Architektursprache zugunsten einer höheren Akzeptanz der LTBw entwickelt werden. Dabei spielt einerseits die angestrebte Oberflächengestaltung, beziehungsweise das Erscheinungsbild, eine wesentliche Rolle, andererseits die aktuelle Wahrnehmung von Lehmbauten in der Gesellschaft.

Basierend auf dieser These lassen sich drei wesentliche Untersuchungs- und Themengebiete definieren:

1. Aktuelles Meinungsbild
2. Aufklärung
3. Oberflächengestaltung

Um sich den Themen differenziert nähern zu können, werden zu den einzelnen Untersuchungs- und Themengebieten Thesen formuliert (vgl. Tabelle 63). Diese ermöglichen es die Themen multiperspektivisch zu betrachten und nachvollziehbar zu bearbeiten. Zusätzlich können auf diese Weise die spezifischen Anforderungen ermittelt werden, die erforderlich sind, um sowohl die Informationsvermittlung als auch die äußere Erscheinung zu optimieren.

Tabelle 63: Inhalte der Untersuchungs- und Themengebiete.

Untersuchungsgebiet	Nr.	These
Untersuchungsgebiet 1: Aktuelles Meinungsbild	1	Die meisten Menschen betrachten Lehmbau als eine veraltete Bauweise.
	2	Die meisten Menschen halten Lehm für einen günstigen Krisenbaustoff.
	3	Die Vorteile des Baustoffes Lehm sind weitestgehend unbekannt.
Untersuchungsgebiet 2: Aufklärung	4	Durch ansprechende und niederschwellige Workshop- und Lehrangebote ändert sich die Einstellung gegenüber dem Baustoff Lehm.
	5	Durch den alltäglichen Kontakt zum Baustoff Lehm, gewinnt dieser an Akzeptanz.
Untersuchungsgebiet 3: Oberflächengestaltung	6	Durch eine gewohntere Oberflächenbeschaffenheit gewinnt Lehmbau an Akzeptanz.

Quelle: eigene Anfertigung 2022

Zur Untersuchung der Thesen aus Tabelle 63 wird auf die Werkzeuge Umfrage, Lehre (Seminar) und Workshop zurückgegriffen (vgl. Tabelle 64).

Tabelle 64: Übersicht der verwendeten Methoden.

	Lehre (Seminar)		Workshop	Umfrage
Befragte / Teilnehmende	21 Studierende (Bachelor- und Masterstudierende; Fakultätsübergreifend)	19 Studierende (Bachelor- und Masterstudierende; Fakultätsübergreifend)	42 Personen (Studierende und Externe)	ca. 40 Personen (Kinder, Jugendliche und Erwachsene)
Umfang	Ein Semester	Ein Semester	6 Fragen	3-stündiger Workshop
Themen	Bauweisen, Zuschläge, Baustoff Lehm	Stampflehm, Oberflächenveredelung, Architektursprache, Bauphysikalische Eigenschaften, Herstellungsprozesse	Fassadengestaltung, Anforderungen an Wohnraum, Kontakt zu Lehm, Bau, Bekannte Lehmbauten, Vorwissen zu Lehm als Baustoff	Grundkenntnisse Lehmbau, Fertigung, Lehmtafelbauweise

Quelle: eigene Anfertigung 2022

Nachfolgend sollen die einzelnen Methoden jeweils kurz beschrieben werden, um einen groben Überblick über die Inhalte zu geben.

## Lehre

Im Seminar „Lehm versteh´n“ hatten 21 Studierende die Chance eine selbst gewählte Lehmbauweise tiefergehend zu erforschen und die gewonnenen Erkenntnisse in Form eines Workshops aufzubereiten. Das Seminar fand im Wintersemester 2021/22 statt, weshalb der Workshop aufgrund der Corona-Pandemie nicht wie ursprünglich vorgesehen, einer breiten Öffentlich zugänglich gemacht werden konnte, sondern ausschließlich den anderen Kursteilnehmer:innen angeboten wurde.

Im Seminar „ClayLab“ bekamen 19 Studierende der Bauhaus-Universität Weimar die Möglichkeit Stampflehm selbst zu verarbeiten, unterschiedliche Oberflächenveredelungen zu erproben und Raum für bauphysikalische und baukonstruktive Versuche zu schaffen. Das Seminar war partizipativ angelegt, sodass die Studierenden ein großes Mitspracherecht beim Entwurf und der finalen Umsetzung hatten.

Als Ergebnis stehen zwei Demonstratoren auf dem Campusgelände der Bauhaus-Universität: Eine monolithische Stampflehmwand zur Erprobung von unterschiedlichen Oberflächenveredelungen und eine Tischtennisplatte mit integriertem Messraum. Durch die Platzierung auf dem Campus, konnte ein großer Publikumsverkehr sichergestellt werden, welcher so spielerisch in Kontakt mit Stampflehm kommt. Durch dieses Vorgehen soll auf These 5 aus Tabelle 63 reagiert werden und das Thema Lehm in den Alltag von Studierenden und Passant:innen integriert werden. Eine genauere Beschreibung des Seminars und seiner Inhalte findet sich im Kapitel Demonstrator, ab S. 253.

Darüber hinaus wurde eine Vielzahl an Bachelor- und Masterthesen, sowie Studienarbeiten mit dem Schwerpunktthema „Lehmbau“ betreut.

Im Folgenden sind besonders relevante Abschluss- und Studienarbeiten chronologisch aufgelistet:

1. Labortechnische Untersuchungen zum Brandverhalten von Stampflehmfertigteilen – Masterthesis – Claudia Zauke – 2023.
2. Erstellung eines Leitfadens zu Recyclingtechniken im Lehmbau – Studienarbeit – Pauline Grunert – 2022/23.
3. Lehmtafelbauweise: Untersuchung der Materialeigenschaften von Stampflehm – Korkmischungen – Masterthesis – Paul Plattner – 2022.
4. Optimierungen im Stampflehm bau – Bachelorthesis – Simon Schlegel – 2021/22.
5. Additive Fertigung im Lehm bau – Studienarbeit – Niklas Haschke – 2021.

Neben den universitären Arbeiten wurde von Frau Daube auch eine Seminarfacharbeit am Carl-Zeiss-Gymnasium Jena, als Fachbetreuerin, begleitet. Die Arbeit zum Thema „Untersuchung zu physikalischen und chemischen Baustoffeigenschaften verschiedener Lehmproben des Weimarer Raums“ von Melia Marie Messner und Pauline Ziegler konnte sich bei Jugend Forscht erfolgreich für die Landesrunde qualifizieren und wurde zusätzlich beim bundesumweltwettbewerb eingereicht.

### Workshop

Im Rahmen der „Langen Nacht der Wissenschaften 2022“ (LNdW) am 18. November. 2022 wurde ein Workshop zum Thema „Lehm bau mit Zukunft – Ein Workshop zu modernem Lehm bau“ angeboten. Die LNdW in Weimar ist „[e]in Gemeinschaftsprojekt wissenschaftlicher Einrichtungen und technologieorientierter Unternehmen der Stadt Weimar und des Kreises Weimarer Land.“<sup>216</sup> Teilnehmenden wird so, einen Abend lang von 18:00 – 24:00, die Möglichkeit geboten aktuelle Forschungsthemen und -einrichtungen zu erkunden.

Der Forschungspartner Alte Feuerwache Weimar e.V. unterstützte die Planung des Workshops.

Da mit einem heterogenen Teilnehmendenfeld aus Laien, Erfahrenen, Studierenden, Schüler:innen und Kindern gerechnet wurde, musste das Workshopkonzept entsprechend vielschichtig gestaltet werden. Ziel war es einen möglichst niederschweligen und dennoch umfassenden Einblick in das Thema „Lehm bau“ aber auch in die Forschung zur Lehmtafelbauweise zu geben.

Um diesem Anspruch gerecht zu werden wurde der Workshop in zwei wesentliche Bereiche gegliedert. Im ersten Bereich bestand die Möglichkeit Stampflehm selbst zu verarbeiten. Dafür wurde die LTBw in einen geeigneten kleinen Maßstab skaliert (Abbildung 174), sodass die Teilnehmenden mittels eigener Körperkraft Lehmtafeln stempften.

---

<sup>216</sup> Stadt Weimar 2022.

Abbildung 174: Skalierter Prototyp der LTBw.

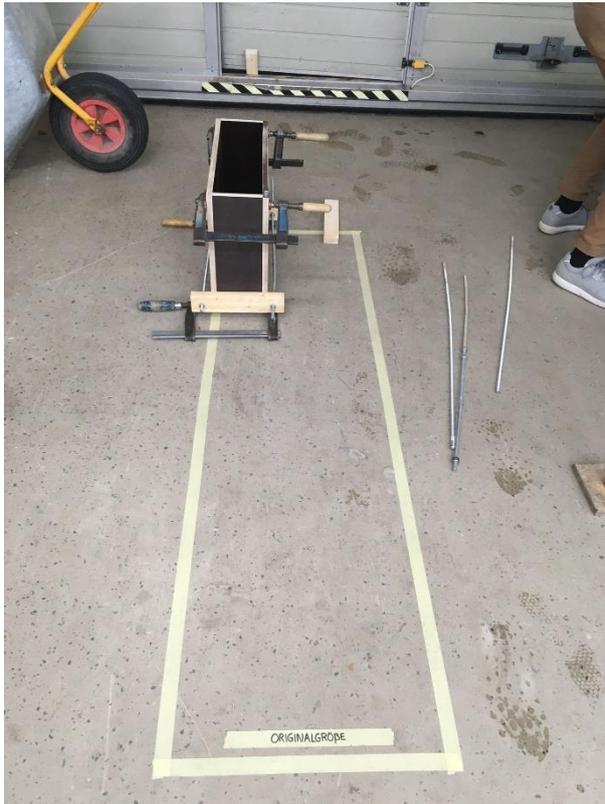


Foto: Daube 2022

Zusätzlich bietet diese Wand über den Workshop hinaus das Potenzial unterschiedliche Materialprüfungen (Brandschutz, Oberflächenveredelungen, etc.) vorzunehmen. So resultiert die Arbeitsleistung der Workshopteilnehmenden auch tatsächlich in einem realen Forschungsprozess. Auf diese Art spielerisch selbst Teil echter Wissenschaft und Forschung zu werden diene als Alleinstellungsmerkmal und sollte zusätzlichen Anreiz schaffen.

Der zweite Bereich des Workshops beschäftigte sich mit Lehmzuschlagsstoffen und war körperlich weniger fordernd (Abbildung 175). Den Teilnehmenden war es möglich selbst Mischungen aus Lehm und unterschiedlichen Zusätzen (Kork, Pigmente, etc.) herzustellen und zu Kerzenständer oder Kartenhalter zu stampfen. Die Resultate durften selbstverständlich gerne als Andenken mit nachhause genommen werden.

Abbildung 175: Experimentiertisch.



Foto: Daube 2022

Neben diesen praktischen Teilen wurden Workshopstationen (z.B. Was ist Lehm?, Wie hält Lehm zusammen?, Kann Lehm mehr?) vorbereitet, welche die beiden Bereiche durch umfassende Rahmeninformationen ergänzen. So konnte ein tiefgehender Einblick ermöglicht werden, ohne durch eine permanente Informationsflut zu überfordern.

## Umfrage

Die Umfrage diente zur Erhebung eines aktuellen Meinungsbildes zum Baustoff Lehm.

Im Zuge der „Langen Nacht der Wissenschaften“ (LNdW), welche am 18.11.2022 in Weimar stattfand, sowie im Zuge einer Lehmbauvorlesung wurden Besucher:innen und Studierende zum Baustoff Lehm, sowie den persönlichen Ansprüchen an Wohnen befragt. Ziel der Umfrage war es herauszufinden, wie moderner Lehmbau gestaltet sein muss, um die Anforderungen von potenziellen Nutzer:innen zu erfüllen und somit eine realistische Chance im Bauwesen zu erlangen. Außerdem sollte die Umfrage ein aktuelles Stimmungsbild zum Lehmbau liefern. Der Fragebogen setzt sich aus insgesamt sechs Fragen zusammen.

42 Personen nahmen an der Umfrage teil.

## Auswertung

Der Fragebogen startete mit der Abfrage von sechs Fassadengestaltungen (Holz, Ziegel, Stampflehm, Sichtbeton und Putz), wobei die Teilnehmenden die „Fassadengestaltung [wählen sollten, welche ihnen] optisch am meisten zu[sagt.]“<sup>217</sup>

---

<sup>217</sup> Daube und Bieganski 2022.

Abbildung 176 zeigt, dass über die Hälfte der Teilnehmenden die Holzfassade (54,76%) und etwa ein Viertel der Teilnehmenden eine Ziegelfassade (28,57%) bevorzugen [N = 42]. Stampflehm wurde von nur knapp einem Zehntel (11,90%) der Teilnehmenden gewählt. Eine Putz- oder Betonfassade favorisierten nur jeweils etwa ein Fünftel (4,76%) der Befragten.

Abbildung 176: Welche Fassadengestaltung sagt Ihnen optisch am meisten zu?

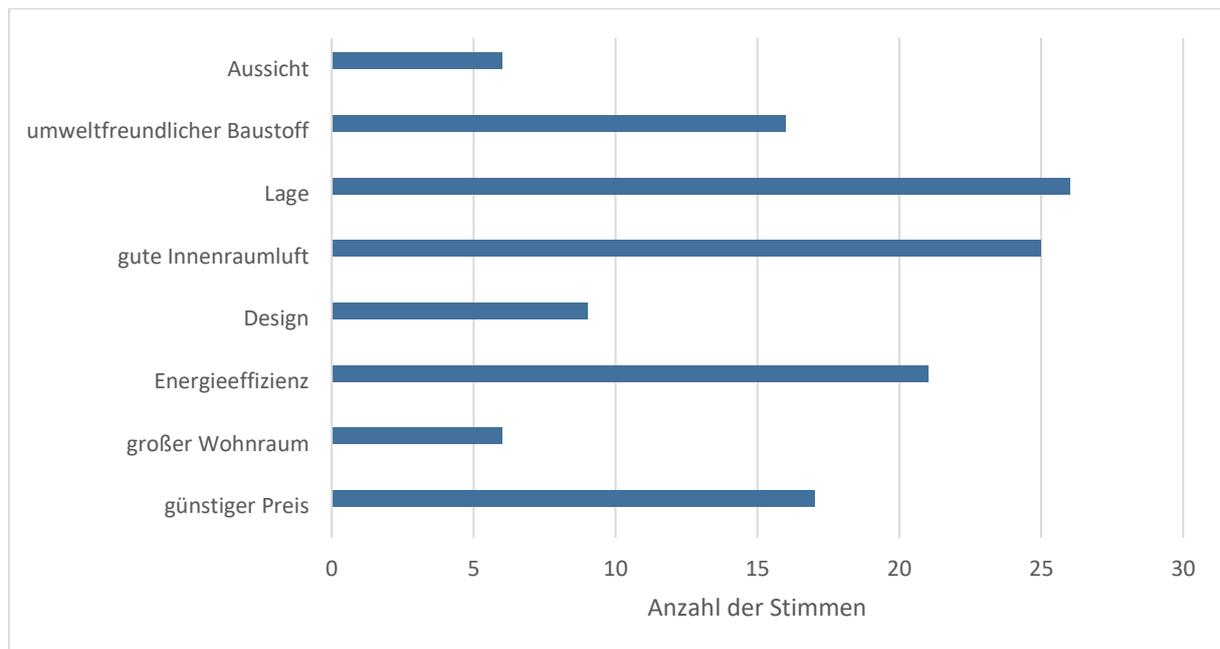


Quelle: eigene Anfertigung 2022

Die zweite Frage beschäftigt sich mit den „[...] Anforderungen [...] an [den eigenen] Wohnraum“<sup>218</sup>. Dabei durften die Teilnehmenden drei von acht Kategorien (Aussicht, umweltfreundlicher Baustoff, Lage, gute Innenraumluft, Design, Energieeffizienz, großer Wohnraum und günstiger Preis) anwählen. Abbildung 177 zeigt, dass für die meisten Teilnehmenden die Lage (61,90 %) des eigenen Wohnraums, sowie eine gute Innenraumluft (59,52 %) wichtig sind. Aussicht oder ein großer Wohnraum waren, im Gegensatz dazu, jeweils nur knapp 14 % der Befragten wichtig.

<sup>218</sup> Daube und Bieganski 2022.

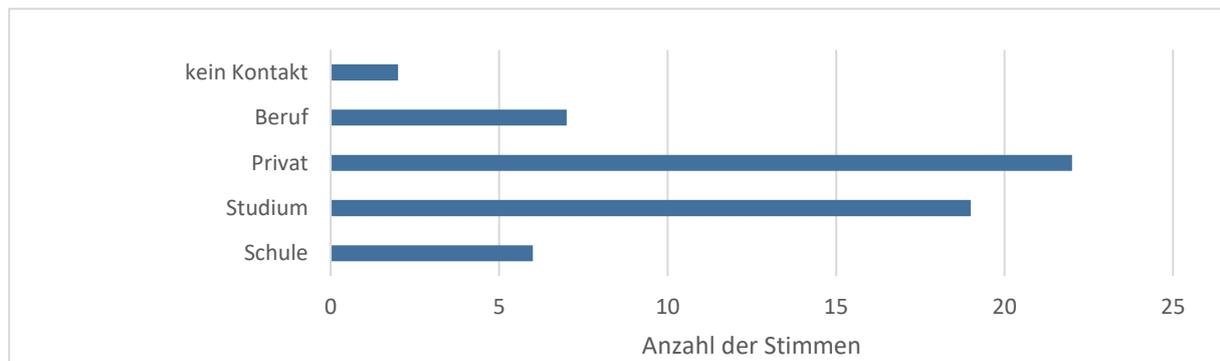
Abbildung 177: Welche Anforderungen stellen Sie an Ihren Wohnraum? (Maximal 3)



Quelle: eigene Anfertigung 2022

Auch der individuelle Kontakt zu Lehmbau wurde im Zuge der Umfrage ermittelt. Die Teilnehmenden hatten hierbei fünf Antwortmöglichkeiten: Kontakt im Studium, in der Schule, privat, im Beruf oder kein Kontakt. Abbildung 178 zeigt, dass insgesamt nur zwei Personen (4,76 %) angaben, noch keinen Kontakt zu Lehmbau gehabt zu haben. Im Gegensatz dazu gaben 52,38 % der Befragten an, bereits privat Kontakt zu Lehmbau gehabt zu haben. Etwa 45 % der Befragten gaben ihr Studium als Kontakt zum Lehmbau an.

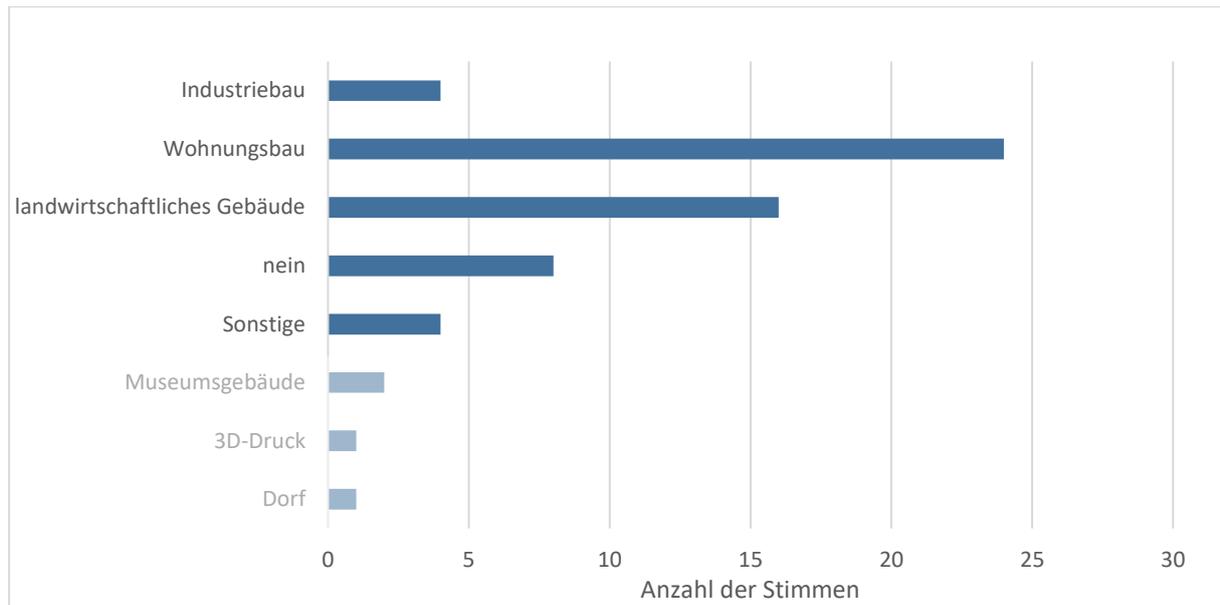
Abbildung 178: Wo hatten Sie schon Kontakt zum Thema Lehmbau?



Quelle: eigene Anfertigung 2022

In der Umfrage wurde darüber hinaus nach bereits bekannten Lehmbauten gefragt. Diese waren hinsichtlich ihrer Art einzuordnen. Zur Auswahl hatten die Befragten neben landwirtschaftlichen Gebäuden, Wohnungs- und Industriebauten. Unter „Sonstiges“ konnten darüber hinaus noch individuelle Angaben gemacht werden. Über die Hälfte der Befragten (57,14 %) gab an ein Wohngebäude aus Lehm zu kennen (vgl. Abbildung 179). Etwa 38 % gaben an ein landwirtschaftliches Gebäude zu kennen und bloß 9,52 % einen Industriebau. Unter der Kategorie „Sonstiges“ gaben zwei Befragte an einen Museumsbau zu kennen. Insgesamt gaben nur acht Personen (19,05 %) an noch keinen Kontakt zu einem Lehmbau gehabt zu haben.

Abbildung 179: Kennen Sie ein Gebäude, das aus Lehm gebaut ist? Falls ja, welche Art von Gebäude?



Quelle: eigene Anfertigung 2022

Des Weiteren sollten die Teilnehmenden auf einer vierstufigen Likert-Skala (vgl. Abbildung 191) angeben, was sie mit dem Baustoff Lehm verbinden. Zur Auswahl standen dabei die Eigenschaften:

Recyclebar (1) ↔ Bauschutt (4),

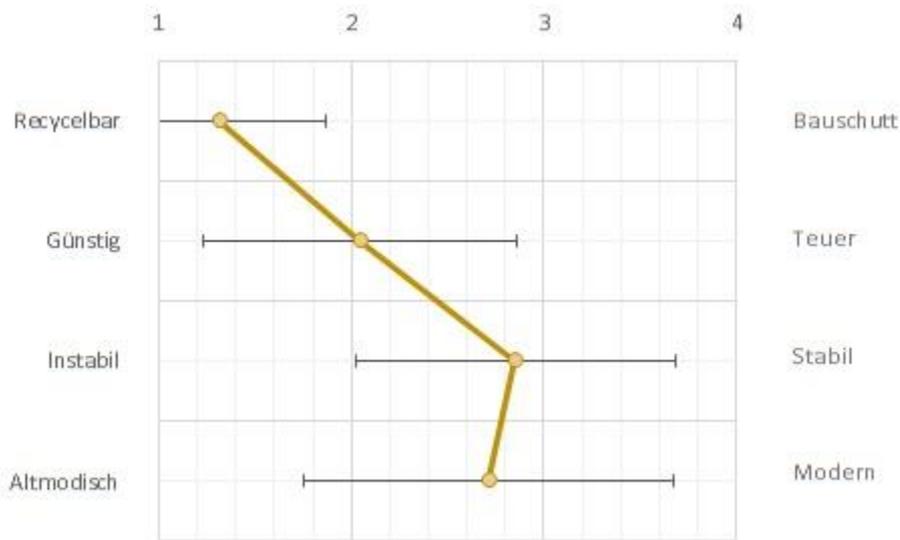
Günstig (1) ↔ Teuer (4),

Instabil (1) ↔ Stabil (4) und

Altmodisch (1) ↔ Modern (4).

Ein Großteil der Befragten hielt Lehm für recyclebar bis eher recyclebar (92,86 %). In Bezug auf die Kosten streuten die Ergebnisse etwas stärker. So gaben jeweils knapp ein Drittel der Teilnehmenden an, Lehm als günstigen (28,57 %), eher günstigen (35,71 %) und eher teuren (28,57 %) Baustoff zu empfinden. Ähnliche Tendenzen fanden sich bei den Punkten Stabilität und Modernität. Als stabilen Baustoff schätzte Lehm circa ein Viertel (23,81 %) der befragten ein, für „eher stabil“ stimmten 40,48 % und knapp ein Viertel gab an, dass Lehm eher instabil sei (28,57 %). Darüber hinaus gaben circa 26,19 % der Befragten an, dass sie Lehm als modernen oder eher modernen (28,57 %) Baustoff empfinden. Knapp ein Drittel der Befragten schätzten Lehmbauten als eher altmodisch (35,71 %) ein. Nur ein Zehntel (9,52 %) gab an Lehm als altmodischen Baustoff zu empfinden.

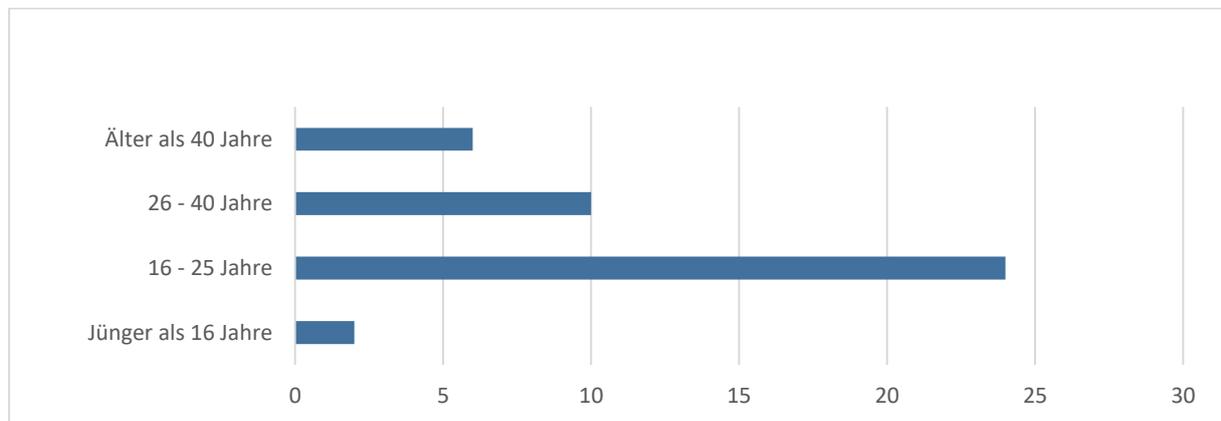
Abbildung 180: Was verbinden Sie mit Lehm als Baustoff?



Quelle: eigene Anfertigung 2022

Zum Abschluss wurden die Befragten noch gebeten sich einer Altersspanne zuzuordnen. Über diese Information sollen im nächsten Schritt Rückschlüsse darüber gezogen werden, inwiefern sich die Meinungen der verschiedenen Generationen unterscheiden. Dafür wurden vier Auswahlmöglichkeiten (vgl. Abbildung 181) geboten. Der Großteil war im Alter von 16-25 Jahre (57,14%), gefolgt von 26-40 Jahre (23,81%) und älter als 40 Jahre waren 14,29%. Jünger als 16 Jahre waren nur 2 der Teilnehmenden (4,76%).

Abbildung 181: Wie alt sind Sie?



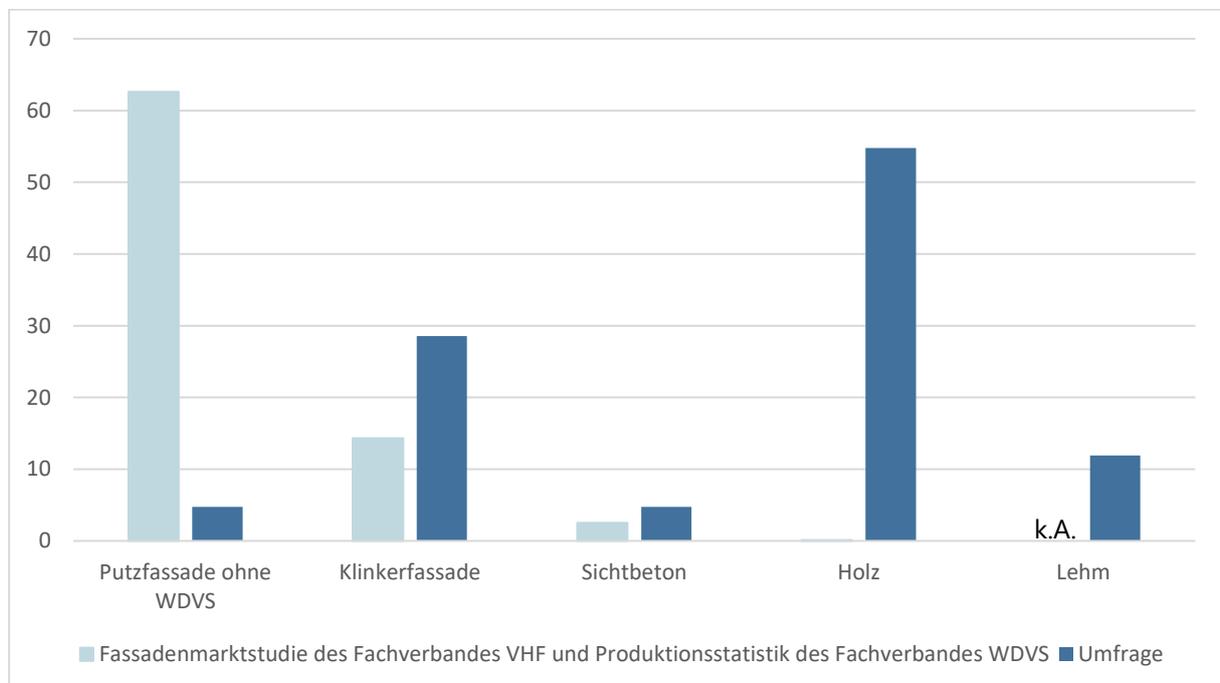
Quelle: eigene Anfertigung 2022

## Ergebnisse

Die Umfrage zeigt, dass bei der Wahl der Fassadengestaltung wohl überwiegend andere Faktoren als die reine Optik eine wesentliche Rolle spielen. Während laut der Fassadenmarktstudie des Fachverbandes VHF und Produktionsstatistik des Fachverbandes WDVS, rund 63 % der Fassadenflächen in Deutschland mit Putzfassade versehen sind, gaben nur knapp 5 % der Befragten an, diese Fassadengestaltung zu bevorzugen. Mögliche Gründe, die für eine Putzfassade sprechen, sind die potenziell günstigeren Anschaffungskosten.

Auch bei der Holzfassade lässt sich eine deutliche Diskrepanz zwischen tatsächlicher Verwendung und den Umfrageergebnissen erkennen. Während knapp 55 % der Befragten eine Holzfassade als optisch ansprechend empfanden, wurden im Jahr 2001 nur 0,1 % der Fassadenflächen mit Holz verkleidet. Auch wenn die natürliche Optik rund 55 % der befragten Personen (N = 42) zusagt, ist eine Holzfassade in der Regel mit relativ hohen Anschaffungskosten verbunden.

Abbildung 182: Flächenmäßiger Fassadenbestand in Deutschland nach Fassadensystemen in Prozent (2001).



Quelle: eigene Anfertigung 2023 in Anlehnung an BBSR 2017, S. 5

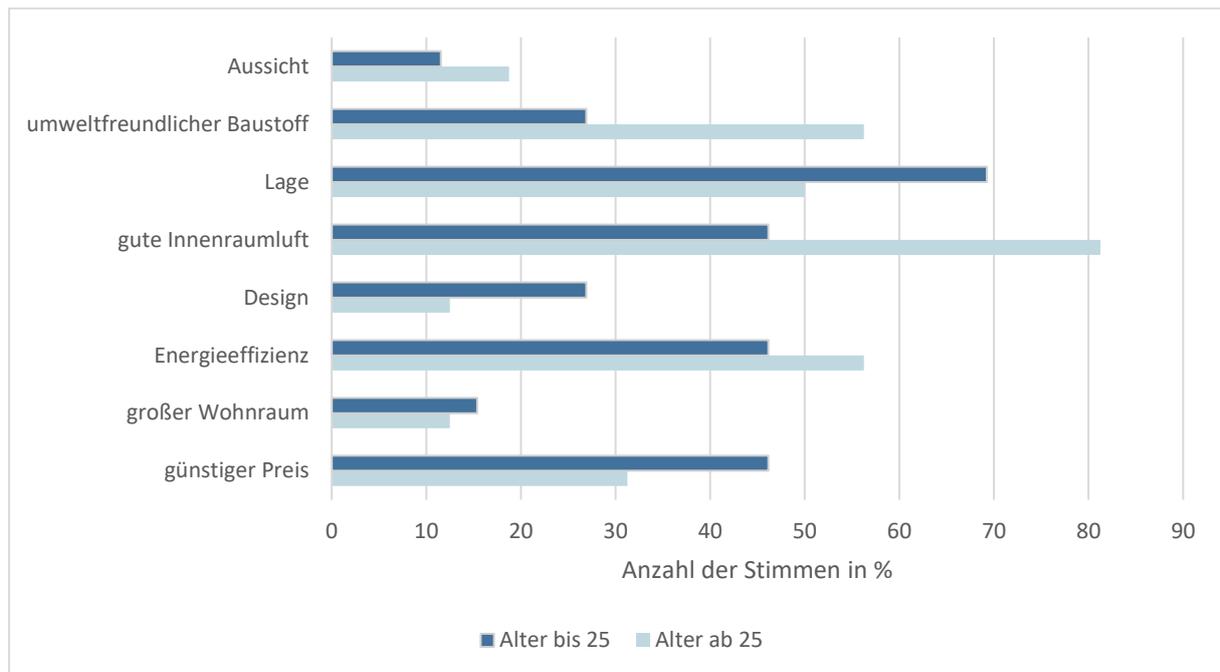
Die Ergebnisse zeigen, dass vermutlich vor allem monetäre Gründe für die Wahl einer Fassadenbekleidung ausschlaggebend sind. Demnach soll die Lehmtafelbauweise mit unterschiedlichen Fassadengestaltungen möglich sein. Dabei kommt neben einer Lehm-Sichtfassade, eine Holzfassade und eine Putzfassade in Frage. Wie im Kapitel „Forschungswand“ (ab Seite 260) beschrieben, ist eine Sichtfassade stets mit einem Witterungsschutz (Trasskalkmörtel- oder Ziegelleisten, Wachs, etc.) zu versehen. Auch eine Holzfassade (Rhombusschalung) wurde im Zuge dieses Kapitels erfolgreich erprobt. Eine Putzfassade aus Kalkputz ist ebenfalls gut realisierbar und würde zu einer optischen Unterordnung/Anpassung des Lehmbaus an sein Umfeld führen.

Bei der Frage nach den Anforderungen an den eigenen Wohnraum (vgl. Abbildung 183) fiel auf, dass jüngere Menschen (Teilnehmende einschließlich 25 Jahre) besonders großen Wert auf eine gute Lage (69 %) legen [n = 26]. Gute Innenraumluft, Energieeffizienz und ein günstiger Preis liegen mit jeweils 46 % an zweiter Stelle. Bei den Teilnehmenden in der Altersgruppe ab 26 Jahren [n = 16] gaben 81 % der Befragten an, dass eine gute Innenraumluft besonders wichtig ist. An zweiter Stelle mit jeweils knapp

56 % wurde ein umweltfreundlicher Baustoff und Energieeffizienz gewählt. Damit unterscheiden sich die Anforderungen der beiden Generationen deutlich.

Der Baustoff Lehm hat demnach das Potenzial gerade bei den über 25-Jährigen den Wunsch nach einer guten Innenraumluft zu erfüllen. Dies könnte beispielsweise in künftigen Werbekampagnen aufgegriffen werden, sodass gezielt die Wünsche von potenziellen Bauherren und Bauherrinnen angesprochen werden können.

Abbildung 183: Welche Anforderungen stellen Sie an Ihren Wohnraum? (Maximal 3).



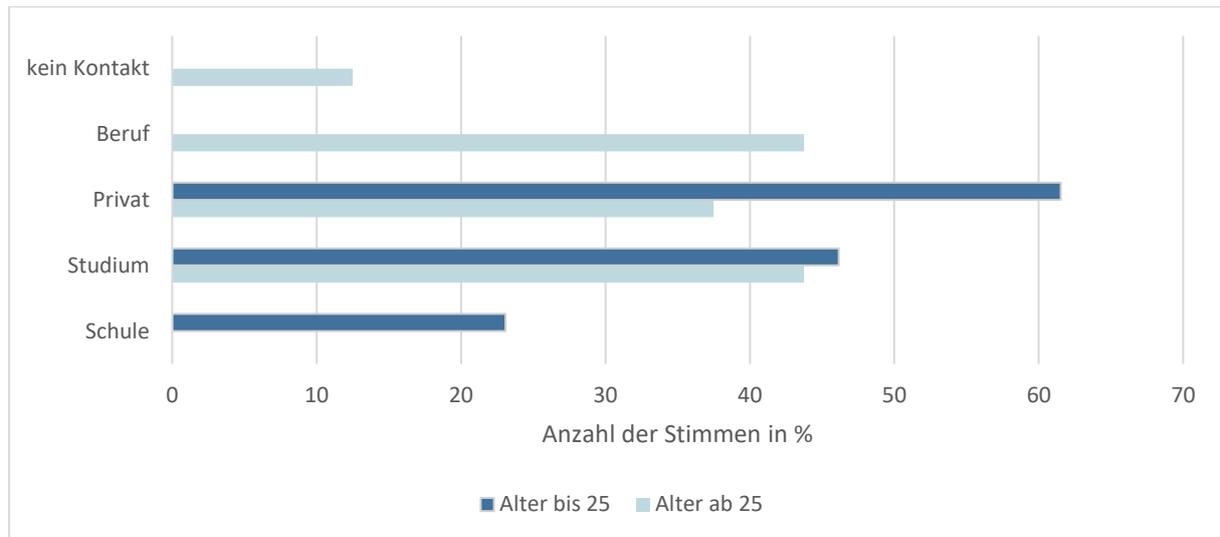
Quelle: eigene Anfertigung 2023

Während bereits 23 % [n = 26] der unter 25-Jährigen in der Schule Kontakt zum Thema Lehmabbau hatten (vgl. Abbildung 184), gab keiner der über 25-Jährigen an, in der Schule mit diesem Thema konfrontiert worden zu sein. Das zeigt, dass nachhaltige Baustoffe wie Lehm inzwischen einen höheren Stellenwert in der schulischen Bildung einnehmen. Dennoch besteht an dieser Stelle, aus Sicht der Forschung, noch Ausbaupotenzial, da gerade die Schulzeit ein prägendes Alter für Kinder und Jugendliche ist und hier für das Thema erfolgreich sensibilisiert werden kann. In der Stichprobe der unter 25-Jährigen [n = 26] hatten die meisten Befragten (61 %) privat Kontakt zum Thema Lehmabbau.

Bei den über 25-Jährigen [n = 16] hatten die meisten Befragten entweder durch ein Studium (43 %) oder beruflich (43 %) Kontakt zum Lehmabbau. 12,5 % dieser Stichprobe hatten noch keinen Kontakt zum Thema.

Die Ergebnisse zeigen, dass generationsübergreifend Aufklärungsarbeit notwendig ist, um das Thema mehr in den Fokus der Gesellschaft zu rücken. Ohne berufliche Orientierung und Spezialisierung hätten wesentlich weniger Menschen (auch im Studium) Kontakt zu dem nachhaltigen Baustoff gehabt. Dies ist aus Sicht der Forschung eine wesentliche Aufgabe der Politik und sollte in naher Zukunft umgesetzt werden.

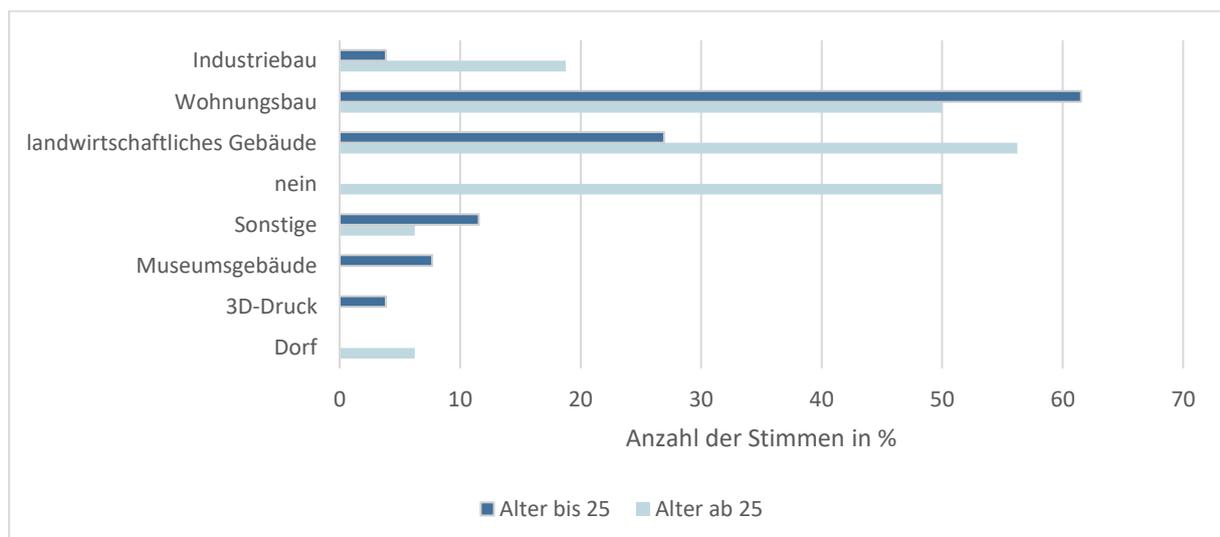
Abbildung 184: Wo hatten Sie Kontakt zum Lehmbau?



Quelle: eigene Anfertigung 2023

Die Auswertung der vierten Frage (vgl. Abbildung 185) zeigt, dass Menschen im Alter von unter 25 Jahren Lehmbauten vordergründig (61,5 %) aus dem Wohnungsbaukontext kennen [n = 26]. Bei der Stichprobe der über 25-Jährigen kannte die Mehrheit (56 %) einen Lehmbau aus dem landwirtschaftlichen Kontext [n = 16]. 50 % dieser Stichprobe [n = 16] gaben an, keinen Lehmbau oder einen Wohnungsbau aus Lehm zu kennen. Bei den unter 25-Jährigen [n = 26] gab keiner der Befragten an, keinen Lehmbau zu kennen. Gerade bei der Generation der über 25-Jährigen scheint der Kontakt zu zeitgenössischen Lehmbauten (Museumsbauten, Industriebauten oder Wohnbauten) zu fehlen. Gerade durch den großen Kontakt zu landwirtschaftlichen Bauten aus Lehm (vermutlich überwiegend Scheunen) könnte dem Lehm eine veraltete oder minderwertige Assoziation zugeordnet werden. Um dies zu überprüfen, wurde in der vorletzten Frage des Fragebogens abgefragt, mit welchen Attributen der Baustoff Lehm bei den Teilnehmenden verknüpft ist.

Abbildung 185: Kennen Sie ein Gebäude, das aus Lehm gebaut ist? Falls ja, welche Art von Gebäude?



Quelle: eigene Anfertigung 2023

In Abbildung 186 wird deutlich, dass viele der über 25-jährigen Teilnehmenden [n = 16] den Baustoff Lehm für sehr günstig (37,50 %) oder eher günstig (50,00 %) halten. Bei den bis 25-Jährigen [n = 26] wurde der Baustoff als weniger günstig eingeschätzt. Bei dieser Gruppe gaben insgesamt 50 % der

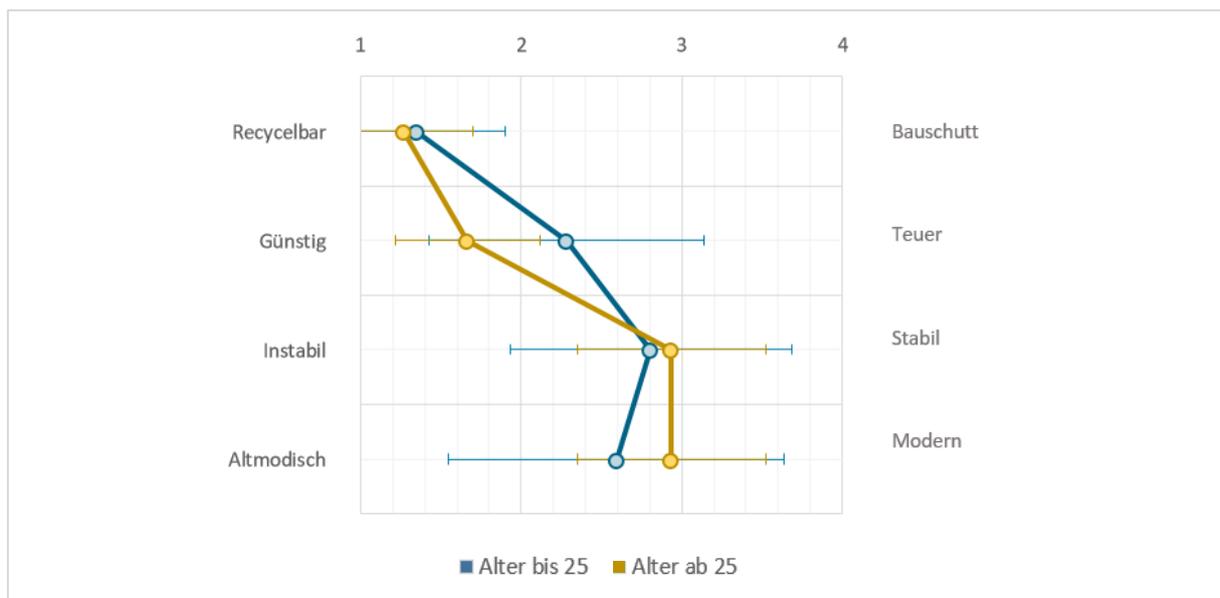
Befragten an, den Baustoff als günstig oder eher günstig einzuschätzen. Gleichzeitig gaben 42,31 % der Befragten an, Lehm als eher teuer einzuschätzen. Eine mögliche Ursache für diese Diskrepanz ist die unterschiedliche Prägung der beiden Stichproben, welche sich bereits bei der Frage nach bekannten Gebäuden (vgl. Abbildung 185) herauskristallisierte. So werden beispielsweise Scheunen eher aus günstigen Baumaterialien hergestellt, während repräsentative Industriebauten und Museumsbauten klassischerweise mit hochwertigen Bauprodukten verknüpft werden.

Eine weitere Diskrepanz lässt sich bei der Zuordnung zu den Eigenschaften „altmodisch“ und „modern“ feststellen. Anders als sich aus der Zuordnung der Attribute „teuer“ und „günstig“ hätte vermuten lassen, schätzte die Gruppe der bis 25-Jährigen [n = 26] Lehm als weniger modern ein als die Gruppe der über 25-Jährigen [n = 16]. So bewerteten ca. 15 % der unter 25-Jährigen [n = 26] Lehm als sehr altmodisch, ca. 38 % als eher altmodisch, ca. 23 % als eher modern und knapp 27 % als modern. Bei den über 25-Jährigen [n = 16] schätzte niemand Lehm als altmodisch ein. Etwa 31 % dieser Stichprobe gab an Lehm als eher altmodisch, fast 38 % als eher modern und 25 % als modern einzuschätzen.

Beide Stichproben tendierten gleichermaßen zu den Attributen „stabil“ und „recyclbar“.

Insgesamt zeigt die Auswertung dieser Frage, dass bei den Teilnehmenden ein recht inhomogenes Bild des Baustoffes, verbunden mit einer Unsicherheit bei der konkreten Bewertung, existiert. Daran anknüpfend ist erneut Aufklärungsarbeit notwendig. Gleichzeitig könnten mehr Leuchtturmprojekte zu einem besseren Verständnis führen.

Abbildung 186: Was verbinden Sie mit Lehm als Baustoff?



Quelle: eigene Anfertigung 2023

Grundsätzlich ist jedoch zu beachten, dass die Stichprobe der Umfrage sehr klein war und Menschen befragt wurden, die entweder in ihrer Freizeit einen Workshop zum Thema Lehmbau besucht haben oder die sich im Zuge ihres Studiums an der Bauhaus-Universität Weimar entschlossen haben „Nachhaltiges Bauen“ als Vorlesung zu besuchen. Die Umfrage stellt somit kein repräsentatives Bild für eine heterogene Gesellschaft dar.

Dennoch können die Erkenntnisse als sehr wertvoll eingestuft werden, da vermutlich ein Personenkreis abgedeckt wurde, der ein persönliches Interesse an Nachhaltigkeit und ökologischen Baustoffen hat und sich somit bereits vor einer erfolgreichen Etablierung auf dem Markt für ein Gebäude aus Lehm- und Holztafelbauweise interessieren würde.

## Auswertung

Zusammenfassend lässt sich anhand der Umfrage These 1 „Die meisten Menschen betrachten Lehm als eine veraltete Bauweise“ ablehnen. Es stellte sich jedoch heraus, dass Lehm nicht als moderner Baustoff angesehen wird, wodurch eine breite Anwendung zumindest ausgebremst wird.

Die zweite These „Die meisten Menschen halten Lehm für einen günstigen Krisenbaustoff“ lässt sich nur teilweise bestätigen. Gerade die Stichprobe der über 25-Jährigen hält Lehm für einen günstigen Baustoff, ob Lehm jedoch als Krisenbaustoff in den Köpfen der Befragten verankert ist, konnte anhand der Umfrage nicht validiert werden.

Die dritte These „Die Vorteile des Baustoffes Lehm sind weitestgehend unbekannt“ kann ebenfalls nur teilweise bestätigt werden. Während bei der Umfrage die Attribute „recyclbar“ und „stabil“ überwiegend realistisch eingeschätzt wurden, konnten im Zuge des Workshops und der Lehre noch große Wissenslücken festgestellt werden.

Die vierte These „Durch ansprechende und niederschwellige Workshop- und Lehrangebote ändert sich die Einstellung gegenüber dem Baustoff Lehm“ konnte einerseits durch die Lehrveranstaltungen als auch durch den Workshop im Rahmen der LNdW bestätigt werden. Aus Sicht der Forschung sollte ein ähnliches Aufklärungsangebot weiter etabliert werden.

Die fünfte These „Durch den alltäglichen Kontakt zum Baustoff Lehm, gewinnt dieser an Akzeptanz“ konnte mit den gewählten Methoden nur bedingt bestätigt werden. Im Zuge der Umfrage wurde deutlich, dass Lehm als Nischenbaustoff wahrgenommen wird und nur wenige Gebäude aus Lehm bekannt sind. Ob der alltägliche Kontakt zu Gebäuden aus Lehm zu einer größeren Akzeptanz führt, muss jedoch weiter untersucht werden.

Die letzte These „Durch eine gewohnte Oberflächenbeschaffenheit gewinnt Lehm an Akzeptanz“ konnte durch die Umfrage bestätigt werden. Dort schnitt die Stampflehmoberfläche vergleichsweise schlecht ab. Gleichzeitig empfanden viele Teilnehmer:innen eine Holzfassade als besonders ästhetisch. Da gerade beim Lehmhaus Sichtfassaden mit einem verhältnismäßig großen Aufwand verbunden sind, ist in diesem Bereich eine Fassadenbekleidung eine gute Option und eine wesentliche Stellschraube zur optischen Akzeptanz.

## Demonstrator

Um die Forschungsergebnisse zu überprüfen wird ein Demonstrator im großen Maßstab gebaut. Anhand des Demonstrators sollen bauphysikalische und baukonstruktive Langzeitversuche (z.B. Luftfeuchtigkeit, Innenraumklima, Witterungsbeständigkeit, Dauerhaftigkeit, Belastbarkeit, Oberflächenveredelung) durchgeführt werden und getätigte Aussagen der Forschung untermauern bzw. neue Ergebnisse liefern.

Der Entwurf und Bau des Demonstrators wurde zusammen mit 19 Studierenden der Fakultäten Architektur & Urbanistik und Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar geplant und durchgeführt. Dafür wurde im Sommersemester 2022 ein eigenes Seminar namens ClayLab ins Leben gerufen. Das Seminar wurde durch den Kreativfonds der Bauhaus-Universität Weimar mit 2.000 € gefördert.

## Bauort

Der Bauort liegt südlich des Hauptgebäudes der Bauhaus Universität Weimar (Geschwister-Scholl-Straße 8) und wird durch den Werkstatt- bzw. Arbeitsraumkubus (Belvederer Allee 1a), eine kleine Grünfläche und ein weiteres Universitäts-Gebäude (Belvederer Allee 1) begrenzt (vgl. Abbildung 187). Vor dem Bau des Demonstrators wies die beschriebene Kiesfläche keine Aufenthaltsqualitäten auf und wurde ausschließlich als Verkehrsfläche für Fußgänger:innen und Fahrradfahrer:innen genutzt.

Abbildung 187: Baufeld hinter der Belvederer Allee 1a in Weimar.

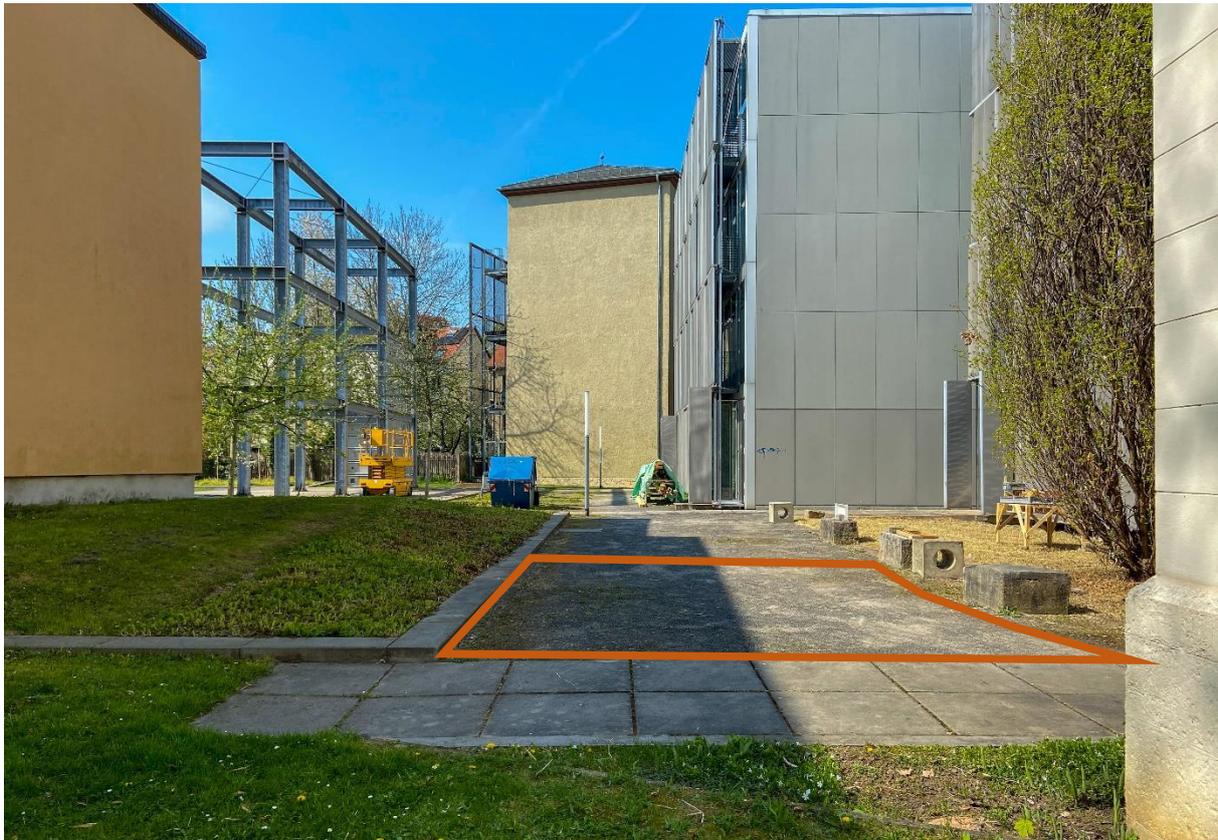


Foto: ClayLab 2022

## Entwurf

Im Zuge des Seminars wurden insgesamt sechs Entwürfe erarbeitet, welche durch ihre Form und Beschaffenheit Interesse am modernen Lehmbau wecken und darüber hinaus bauphysikalische und baukonstruktive Versuche zulassen.

Der Entwurf des Stampflehmbaus durfte eine Grundfläche von ca. 4,00 x 4,00 m bespielen. Die maximale Höhe des Entwurfs wurde auf 2,00 m festgesetzt.

Die Folgenden wesentlichen Eigenschaften sollte das ClayLab erfüllen:

1. Kleiner Innenraum für Messungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit)
2. Wandstärke 55cm (erprobte Trag- und Dämmschicht)
3. Sockel für Spritzwasserschutz
4. Schutz vor Witterung muss mitgeplant werden (z.B. Fassadenbekleidung, Dach, ...)
5. Demonstrator als Vermittler von Wissen
6. Bereicherung des Campusgeländes (Plattform für modernen Lehmbau)

Letztendlich wurde eine optimierte Mischung aus zwei Entwürfen (Clay4study und Spielort I Lernort) auf dem Campus realisiert.

Der Entwurf Clay4study (vgl. Abbildung 188) möchte seinen Besucher:innen die Möglichkeit geben, den Baustoff Lehm zu erforschen und auf eine ästhetisch ansprechende Art und Weise kennen zu lernen. Wesentlicher Bestandteil des Entwurfs sind vier Wandscheiben, welche unterschiedliche Arten eines Witterungsschutzes, in Form von Trasskalkmörtelleisten, Gesteinsscherben, einer Wachsbeschichtung und naturbelassenem Stampflehm als Referenz, präsentieren.

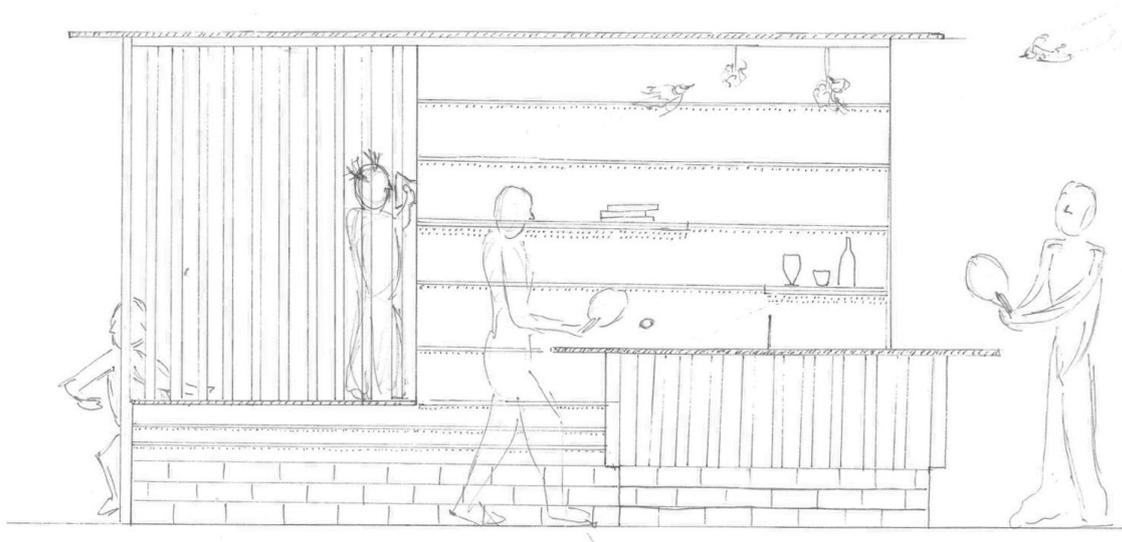
Abbildung 188: Entwurf Clay4study



Quelle: Engelke et al. 2022

Der Entwurf Spielort I Lernort (vgl. Abbildung 189) hatte zum Ziel Stampflehbau und Tischtennis zu kombinieren. Dafür sollte eine Kombination aus einer Tischtennisplatte und einer Experimentalwand den Bauort attraktiv bespielen und Besucher:innen spielerisch an das Thema Stampflehbau heranführen.

Abbildung 189: Entwurf Spielort I Lernort

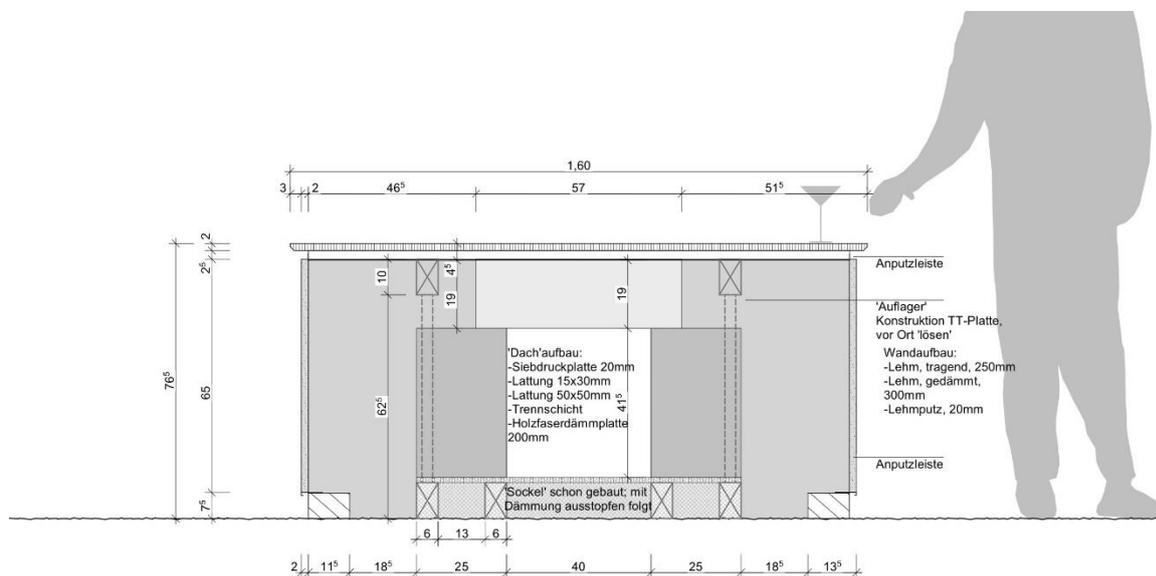


Quelle: Debertin et al. 2022

Letztendlich wurde eine Tischtennisplatte mit massiv anmutendem Stampflehmsockel und eine Demonstrator-Wand zur Erprobung von vier unterschiedlichen Oberflächenveredelungen geplant und realisiert.

Der geforderte Laborraum für Messungen wurde im Inneren der Tischtennisplatte geplant und weist Abmessungen von ca. 70 x 40 x 49 cm (l x b x h) auf (vgl. Abbildung 190). Der Hohlraum wird rund herum von 55 cm Stampflehm (25 cm Tragschicht und 30 cm außenliegende Dämmschicht) umgeben. Nach oben wird der Messraum durch 20 cm Holzweichfaserdämmung und nach unten durch eine 10 cm Schicht Korkgranulat und eine zusätzliche Schicht Holzfaserdämmung (5 cm) thermisch abgeschlossen. Dadurch weist der obere Abschluss einen U-Wert von 0,19 W/(m<sup>2</sup>K) und der untere Abschluss einen U-Wert von 0,28 W/(m<sup>2</sup>K) auf. Damit werden die Anforderungen für Dächer und Bodenplatten des GEGs erfüllt.

Abbildung 190: Querschnitt Tischtennisplatte ClayLab

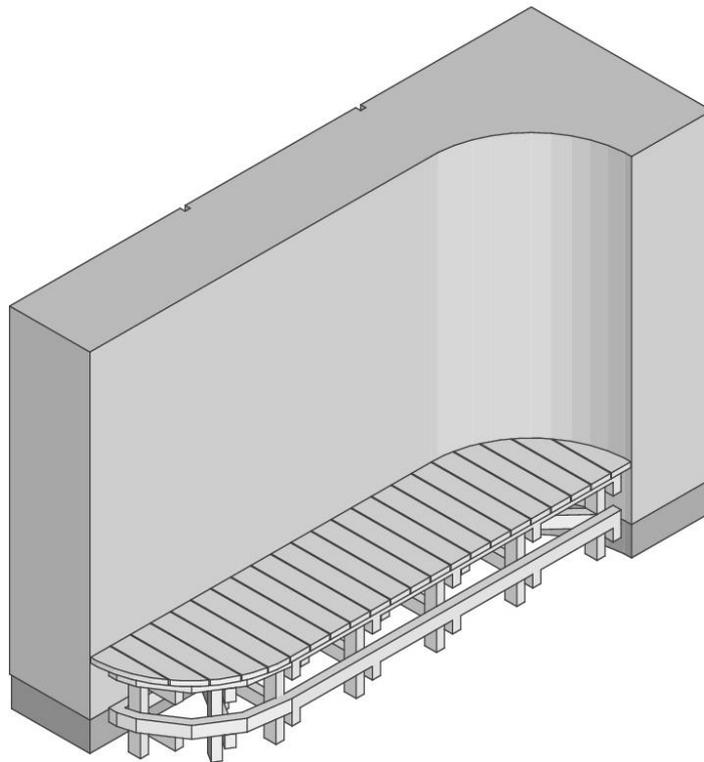


Quelle: Eigene Anfertigung (ClayLab) 2022

Die eigentliche Tischtennisplatte muss dabei weitaus mehr leisten, als eine reine Spielfläche zu bieten. Neben einem wasserdichten Abschluss und einer ausreichenden Hinterlüftung muss über eine Seite der Tischtennisplatte der Zugang zum innenliegenden Laborraum gewährleistet werden. Um den beschriebenen Anforderungen gerecht zu werden, wurde eine Platte mit einem speziellen Schiebemechanismus entworfen. Dadurch wird ein leichter Zugang zum Inneren gewährleistet, der auch von einer Person allein geöffnet und verschlossen werden kann.

Die Forschungswand (vgl. Abbildung 191) grenzt den Lehmbaubereich nach hinten hin ab und schafft damit einen wahrnehmbaren Raum. Die ursprünglich geplante Sitzbank wurde nicht realisiert.

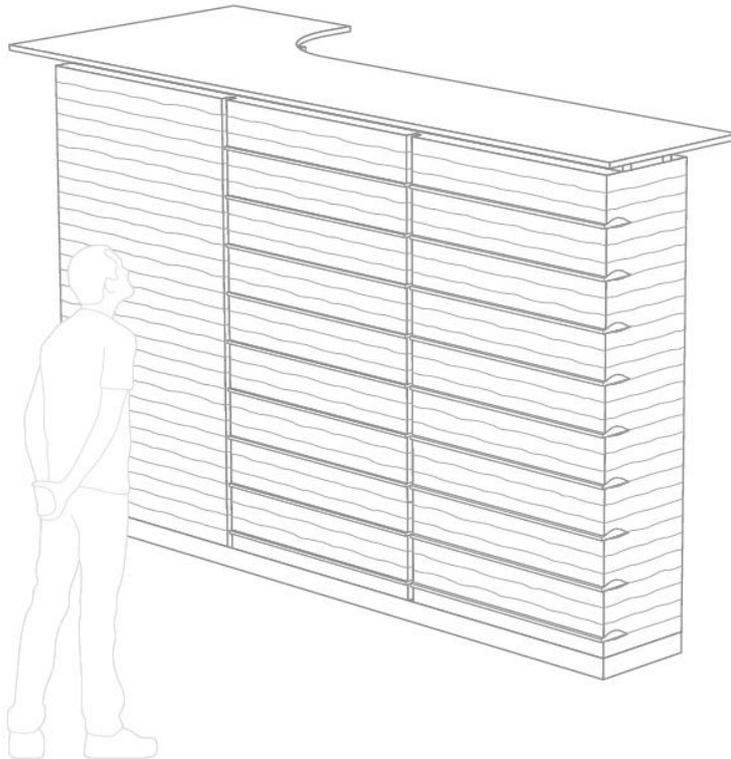
Abbildung 191: Perspektivische Darstellung der Forschungswand



Quelle: Eigene Anfertigung (ClayLab) 2022

Auf der Rückseite der Wand wurden unterschiedliche Möglichkeiten des Erosions- und Witterungsschutzes erprobt (vgl. Abbildung 192). Neben Leisten aus Trasskalkmörtel und Ziegel, wird eine Fläche gewachst und eine weitere Fläche mit einer Holzfassade versehen. Die gerundete Wand soll einerseits die Möglichkeiten des Stampflehmbaus aufzeigen, andererseits die Standfestigkeit der Wand erhöhen (Aussteifung).

Abbildung 192: Rückseite der Forschungswand



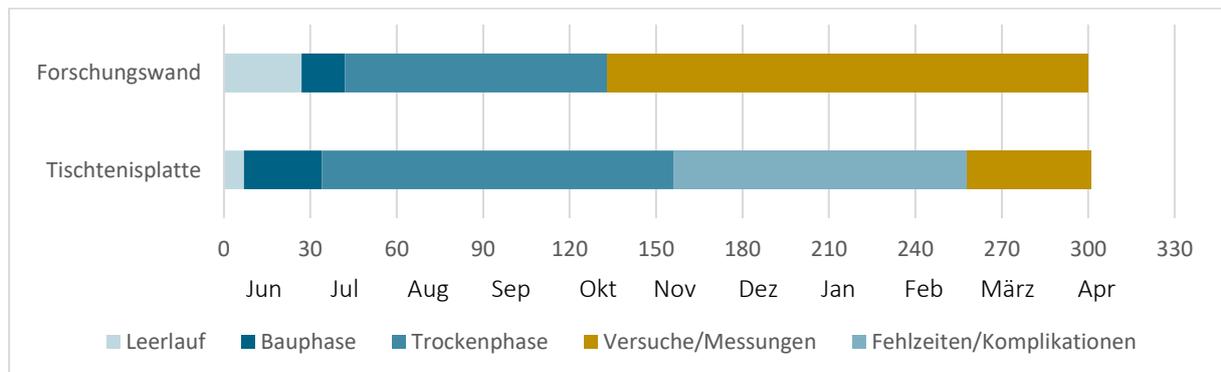
Quelle: Eigene Anfertigung (ClayLab) 2022

**Bau des Demonstrators**

Für den Bau des ClayLabs wurden insgesamt 7.000 kg Stampflehm und 270 kg Korkgranulat bestellt. Die benötigten Schalungen wurden aus Holzwerkstoff-Platten errichtet. Um den Demonstrator vor aufsteigender Feuchtigkeit zu schützen, wurde sowohl die Forschungswand als auch die Tischtennisplatte auf einer lose verlegten Bitumenbahn errichtet. Als Spritzwasserschutz fungiert eine 7,5 cm hohe Ziegelschicht, welche die Stampflehmkörper umfasst.

Abbildung 193 zeigt den Zeitplan des Demonstratorbaus. Baubeginn der Tischtennisplatte war am 08.06.2022, Baubeginn der Forschungswand war der 29.06.2022.

Abbildung 193: Zeitplan Demonstrator.



Quelle: eigene Anfertigung 2023

## Forschungsraum

Der Forschungsraum wurde als räumliche Aussparung in dem massiv anmutenden Sockel der Tischtennisplatte ausgeführt (Abbildung 194). Insgesamt hat der kleine Raum Abmessungen von 40 cm x 100 cm.

Um im Labor realistische Messergebnisse zu erzielen, wurden die Abschlüsse nach oben und unten so konzipiert, dass die im GEG geforderten U-Werte für Bodenplatten und Dächer erreicht werden.<sup>219</sup>

Die Bodenplatte besteht aus einer Kiste, die aus OSB-Platten gefertigt und mit derselben Korkschnitzung gefüllt ist, die auch in der Lehmmischung verwendet wurde. Da die Höhe der Kiste nicht ausreichte, um den angestrebten Wert von  $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  zu erreichen, wurde eine zusätzliche 50 mm starke Dämmung aus Holzwolle oberhalb des Deckels platziert.

Der obere Abschluss wird mit einer 200 mm starken Dämmplatte aus Holzwolle ausgeführt, die den geforderten U-Wert von  $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  einhält. Eine Auflagerbank dient als Auflage für die Dämmplatten und wurde durch einen Versatz in der Stampflehmwand realisiert. Um eine durchgehende Fuge an den Stößen der Dämmplatten (vgl. Abbildung 195 [1]) zu vermeiden, wurden diese manuell mit einem Stufenfalz versehen.

Abbildung 194: Forschungsraum in Tischtennisplatte.



Foto: ClayLab 2022

Um den Anforderungen des Laborraums gerecht zu werden, muss das Dach mehreren Funktionen gerecht werden. Einerseits muss es eine ausreichende Wasserdichtigkeit und Hinterlüftung gewährleisten, andererseits soll es den Zugang zum Inneren des Laborraums ermöglichen und zudem als Tischtennisplatte bespielbar sein.

<sup>219</sup> Vgl. Bundestag 08.08.2020, S. 57.

Um diesen heterogenen Anforderungen gerecht zu werden, wurde ein Flachdach mit einem speziellen Schiebemechanismus entworfen, der eine einfache Handhabung auch durch Einzelpersonen ermöglicht. Die Schienen [2], auf denen die Platten bewegt werden können, befinden sich auf zuvor in den Lehm eingestampften Holzbalken. Um eine reibungslose Bewegung zu gewährleisten, wurden unter den Platten ebenfalls Schienen montiert und an allen beweglichen Kontaktstellen geglättet.

Zur Verriegelung werden die Platten in der Mitte unter spezielle Winkel [3] geschoben (Bestandteil des „Metalltischtennisnetzes“ [4]) und eingehakt, sowie am Ende durch einen Bolzen fixiert.

Abbildung 195: Tischtennisplatte ClayLab.

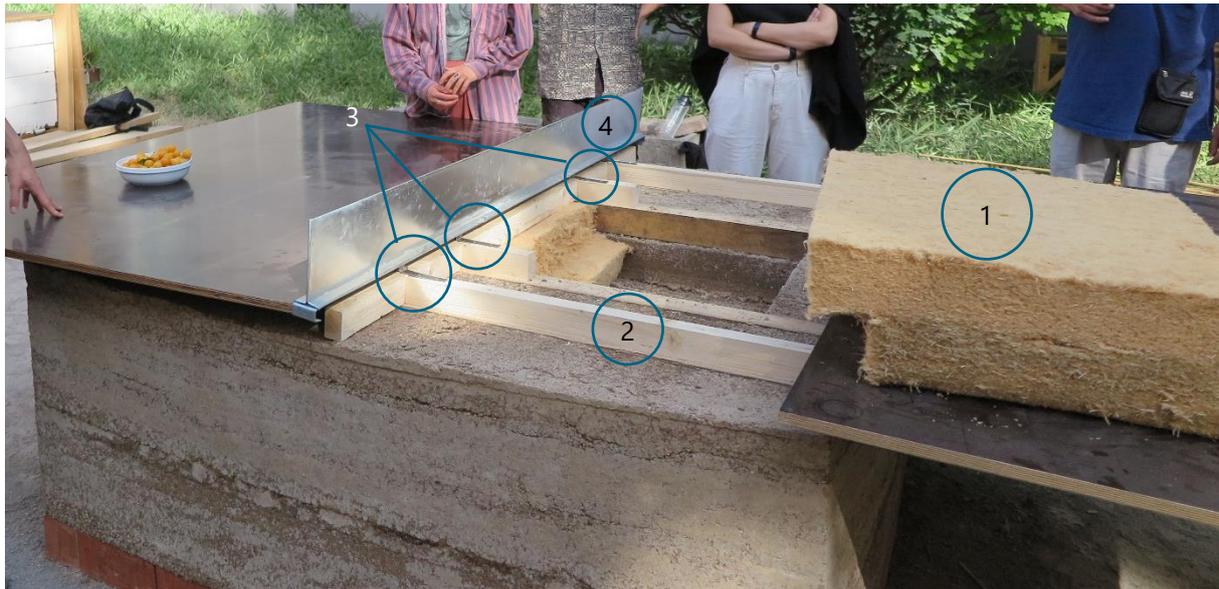


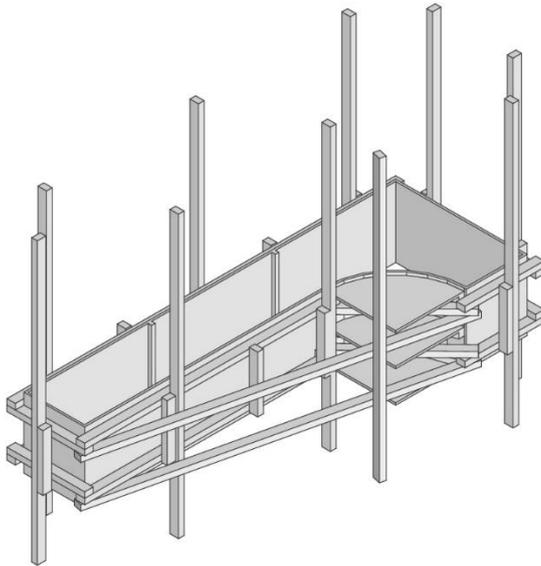
Foto: Daube 2022

## Forschungswand

Die Forschungswand soll einerseits unterschiedliche Oberflächenveredelungen auf rein ästhetischer/optischer Ebene zeigen, andererseits jedoch auch Erosionsschutzmaßnahmen hinsichtlich ihrer Eignung in der Praxis erproben. Dafür sind insgesamt vier Maßnahmen für einen Witterungsschutz verbaut worden.

Darüber hinaus wurde für den Bau der Forschungswand eine Kletterschalung konzipiert, welche an senkrechten Latten nach oben verschoben werden kann (vgl. Abbildung 196).

Abbildung 196: Schalungsplan Forschungswand



Quelle: Eigene Anfertigung (ClayLab) 2022

Durch die Verwendung einer Kletterschalung war vor allem die Herstellung der Rundung eine große Herausforderung. Einerseits nahm die Qualität der Schalung mit jedem klettern etwas ab, andererseits war das neue Ansetzen nie zu 100 % akkurat. Trotz dieser Herausforderung konnte eine zufriedenstellende Forschungswand erstellt werden (vgl. Abbildung 197).

Abbildung 197: Forschungswand kurz nach der Fertigstellung.



Foto: Daube 2022

Eine Möglichkeit des Witterungsschutzes ist die nachträgliche Versiegelung mit Naturwachs (vgl. Abbildung 198, links). Diese Technik wurde bisher nur an Innenwänden ausreichend erprobt. Das verwendete Wachs (Fino Naturwachs der Lesando GmbH)<sup>220</sup> wurde nach Gebrauchsanweisung auf die trockene Stampflehmwand aufgetragen. Eine Verwendung „[...] bei Untergrund- und Umgebungstemperaturen unterhalb von +5°C [wird laut technischem Datenblatt ausgeschlossen].“<sup>221</sup> Das Wachs wurde am 17. Oktober 2022 aufgetragen. In diesem Zeitraum lagen die Außentemperaturen bei über 5 °C, womit dem Wachsen nichts entgegenstand. Insgesamt konnte keine Veränderung des Wachses in den Wintermonaten aufgrund von Minustemperaturen festgestellt werden. Wie sich das Wachs im Sommer verhält, gilt es noch zu untersuchen. Bis zu diesem Punkt erfüllt das Wachs alle Anforderungen an einen Witterungsschutz.

Für die Erosionsbremse wurde dem Lehm-Kork-Gemisch unter anderem eine Schicht aus Ziegelscherben hinzugefügt. Die horizontalen Leisten dienen dazu die Fließgeschwindigkeit von Wasser zu reduzieren, sodass nur der Feinlehmanteil der obersten Schicht kontrolliert abgetragen werden kann.

Dadurch wird eine Stampflehmaußenwand ohne großen Dachüberstand ermöglicht, die der Witterung ausgesetzt ist. Darüber hinaus bilden die Erosionsbremsen ein starkes ästhetisches Gestaltungselement. Durch den Abstand der Scherben können Fassadenbereiche betont werden und der Fassade insgesamt eine horizontale Struktur verliehen werden (vgl. Abbildung 198, Mitte).

Darüber hinaus wurden Erosionsbremsen aus Trasskalkmörtel untersucht (vgl. Abbildung 198, rechts). Die Leisten funktionieren ähnlich wie die Tonscherben und sorgen dafür, dass nur der Feinlehmanteil der obersten Schicht abgetragen werden kann. Der Trasskalkmörtel fügt sich insgesamt unauffälliger in die Fassade ein und betont dabei die natürliche Stampflehmstruktur. Über die Dicke der Leisten und den Abstand dieser kann die optische Wirkung beeinflusst werden. Gleichzeitig ist es bei der Herstellung deutlich schwieriger, als bei den Tonscherben, ein gleichmäßiges Bild zu erzeugen.

Abbildung 198: Forschungswand Erosionsschutz.



Foto: ClayLab 2022

<sup>220</sup> Vgl. LESANDO GmbH 2014.

<sup>221</sup> LESANDO GmbH 2014, S. 3.

Als weitere Möglichkeit eines Witterungsschutzes wurde eine hinterlüftete Rhombusschalung [7] an der Wand realisiert (vgl. Abbildung 199). Dabei konnte die Konterlattung [6] mit einfachen Holzschrauben in dem noch nicht durchgetrockneten Lehm [5] verschraubt werden. Als zusätzliche Verankerung wurden in regelmäßigen Abständen Holzleisten [8] in den Lehm eingestampft. Diese bieten für die Schrauben eine zusätzliche Fixierung.

Für das Dach [2] wurde eine Unterkonstruktion [1] mit Dämmstoffdübeln [4] mit dem Lehm verschraubt. Die Dübel wurden, ohne vorbohren, in den noch feuchten Lehm eingedreht.

Durch die Holzfassade kann über die Schutzfunktion hinaus ein hoher ästhetischer Standard sichergestellt werden. Durch die Hinterlüftung kann der Lehm weiterhin Feuchtigkeit aufnehmen und abgeben, jedoch Schlagregen und Spritzwasser die Wand nicht abtragen. Aus der

Umfrage ab Seite 243 geht hervor, dass eine Holzfassade auch bezüglich ihrer Akzeptanz bei der Bevölkerung als geeignet zu bewerten ist.

Zum aktuellen Stand lässt sich die Rhombusschalung als guter Witterungsschutz einstufen.

Abbildung 199: Rhombusschalung der Forschungswand mit Detailschnitt.

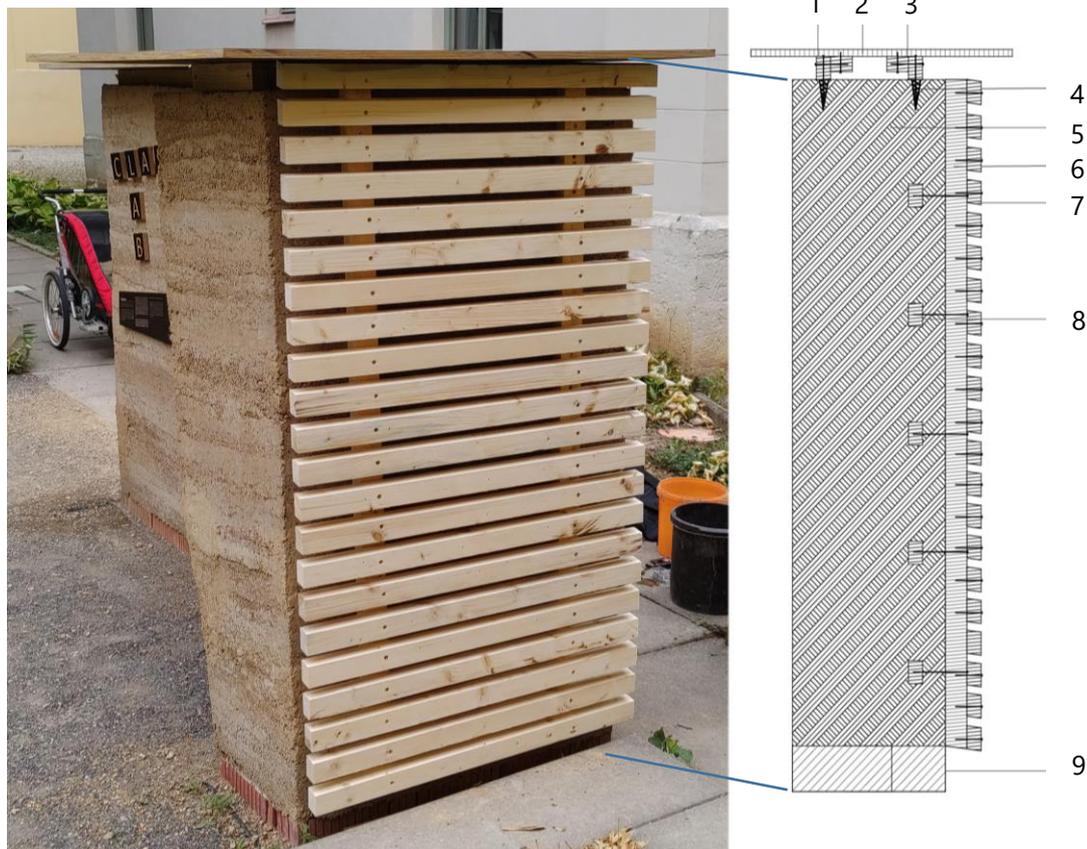


Foto: Zauke 2022

Abbildung 200 zeigt die Forschungswand am 03.12.2022. An der unteren rechten Ecke lässt sich erkennen, dass die unterschützte Stampflehmwand bereits durch Spritzwasser abgetragen wurde. Durch einen Faden, welcher an am Dach befestigt ist, konnte das Spritzwasser und somit der Abtrag der Wand signifikant verringert werden.

Abbildung 200: Foto der Forschungswand im Winter 2022.



Foto: Daube 2022

Insgesamt konnte durch die getroffenen Maßnahmen die Forschungswand vor Erosion geschützt werden. Die unterschiedlichen Techniken bieten dabei einen geeigneten Überblick über die ästhetische Gestaltung der Lehmtafelbauweise.

## Messungen

Der gebaute Laborraum soll als Grundlage für unterschiedliche Untersuchungen dienen. Einerseits soll über Temperatur- und Raumlufffeuchtemessungen eine Aussage bezüglich der Wärmedämmenden Wirkung der Lehmtafelbauweise getroffen werden, andererseits soll eine zusätzliche Analyse Auskunft über einen möglichen Schimmelbefall des Baustoffs geben.

## Temperatur

Als Witterungsschutz wurde bereits kurz nach der Fertigstellung des Lehmsockels, die Tischtennisplatte darauf montiert. Wegen der dadurch beschränkten Luftzirkulation verschob sich die Trockenzeit um ca. einen Monat nach hinten.

Im November sollten schließlich erste Messungen mit den Messgeräten testo 605i (Innenraumtemperatur, relative Luftfeuchte, Taupunkt und wet bulb temperatur (Feuchtetemperatur)) und testo 805i (Innenwandoberfläche Temperatur) und testo 440 (Datenlogger) gestartet werden. Aufgrund der niedrigen Außentemperaturen in diesem Zeitraum, kühlte auch der Innenraum des Demonstrators zu stark aus. Der Datenlogger testo 440 schaltete sich beim ersten Versuch einer Langzeitmessung (angesetzter Zeitraum waren 2 Wochen) voraussichtlich temperaturbedingt ab, wodurch alle aufgezeichneten Daten verloren gingen. Im Anschluss wurde der Datenlogger testo 440 durch ein Tablet ausgetauscht, wodurch dem Datenverlust vorgebeugt werden sollte.

In weiteren Messungen schalteten sich einzelne Messfühler vorzeitig ab, sodass kein vollständiger, verwertbarer Datensatz gewonnen werden konnte. Der zusätzliche Defekt einer Steckdose der verwendeten Powerstation (Jackery Explorer 240), verzögerte die Datenaufzeichnung weiter.

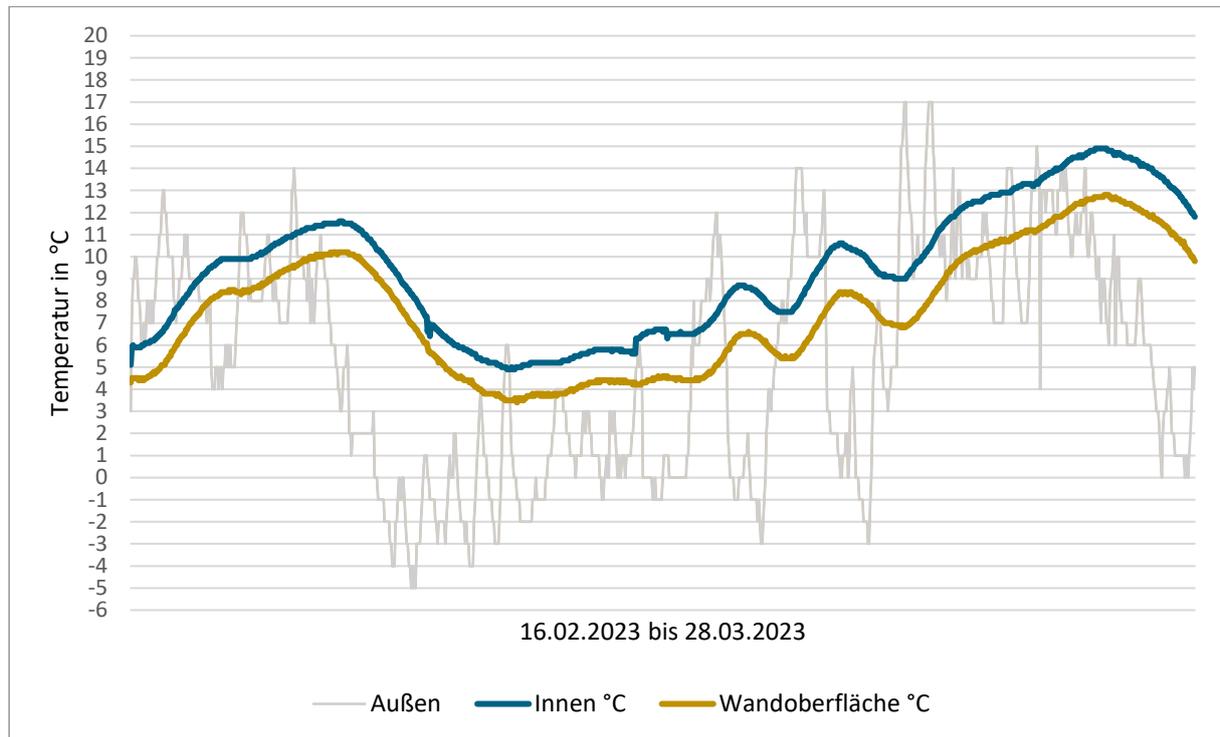
Seit 16. Februar laufen alle Geräte und Messfühler ordnungsgemäß und es werden Langzeit-Daten generiert (vgl. Abbildung 201). Die beiden verwendeten Messfühler zeichnen stündlich die Temperatur [°C] der Innenwand, der Innenraumluft und der Luftfeuchtigkeit [% RF] auf. Die Daten der Außentemperatur [°C] wurden der Wetterstation Weimar Schöndorf entnommen.<sup>222</sup>

Im Betrachteten Zeitraum wurde eine minimale Außentemperatur von -5 °C und eine maximale Außentemperatur von +17 °C aufgezeichnet. Im Mittel lag die Außentemperatur bei +5,26 °C. Die minimal aufgezeichnete Innenraumtemperatur beträgt +4,9 °C, die Maximale +14,9 °C. Im Mittel liegt die Innenraumtemperatur im betrachteten Zeitraum bei +9,38 °C. Bei der Innenwandtemperatur liegt der kleinste, aufgezeichnete Wert bei +3,4 °C, der Maximale bei +12,8 °C. Im Mittel betrug die Innenwandtemperatur +7,57 °C.

---

<sup>222</sup> Vgl. Wetterdienst 2023.

Abbildung 201: Daten der Langzeitmessung im Zeitraum 16.02.2023 bis 28.03.2023.



Quelle: eigene Anfertigung 2023

Anhand der erhobenen Daten sollen Rückschlüsse auf den Wärmedurchgangskoeffizienten der beiden verwendeten Lehm-Kork-Gemische (Trag- und Dämmschicht) gezogen werden.

Die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außentemperatur nimmt entsprechend den Wärmewiderständen jeder Bauteilschicht allmählich ab.<sup>223</sup> Der innere Wärmeübergangswiderstand [ $R_i$ ] zwischen der Raumtemperatur und der Wandoberflächentemperatur beträgt typischerweise  $0,13 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$  und die zugehörige Temperaturdifferenz wird als  $dT_i$  bezeichnet. Zwischen der Wandoberflächentemperatur und der Außentemperatur befindet sich der Rest des Wand-/Dämmungssystems, einschließlich des Wärmewiderstands [ $R_e$ ] und der entsprechenden Temperaturdifferenz ( $T_{\text{Wandoberfläche}} - T_{\text{Außen}}$ ), welche als  $dT_e$  bezeichnet wird.<sup>224</sup>

Es gelten die folgenden Formeln:

$$R = R_i \cdot \left(1 + \frac{dT_e}{dT_i}\right) \quad [\text{m}^2\text{K}/\text{W}] \quad (104)$$

$$U = \frac{1}{R} \quad [\text{W}/\text{m}^2\text{K}] \quad (105)$$

<sup>223</sup> Vgl. Plag 2023b.

<sup>224</sup> Vgl. Plag 2023b.

Mit den erhobenen Daten kann anhand der genannten Formeln der U-Wert des Bauteils berechnet werden. Es gilt jedoch zu beachten, dass für verlässliche Ergebnisse die Außentemperatur möglichst konstant sein muss, da sonst Temperaturänderungen im Bauteilinneren nur verzögert ankommen, wodurch die Werte letztendlich verfälscht werden.<sup>225</sup> Es wird empfohlen die Berechnung nach einer mindestens 24 Stunden anhaltenden, konstanten Außentemperatur durchzuführen, sodass die Wandoberflächentemperatur ihre Gleichgewichtstemperatur erreichen kann.<sup>226</sup>

Außerdem ist bei besonders gut gedämmten Wänden, wie sie bei einem angestrebten U-Wert von 0,20 W/m<sup>2</sup>K zu erwarten wären, eine geringe Temperaturdifferenz [dT<sub>i</sub>] zu erwarten, wodurch kleine Messungenauigkeiten schwerer zur Last fallen.<sup>227</sup>

Andererseits wird die Wandtemperatur auch durch Wärmestrahlung beeinflusst, die in dieser Rechnung nicht berücksichtigt wird.<sup>228</sup> Das Ergebnis wird unmittelbar vom inneren Wärmeübergangswiderstand [ $R_i$ ] beeinflusst. Wie stark dieser im Einzelfall vom Rechenwert 0,13 abweicht, ist schwer zu sagen, da dies von der Luftbewegung an der Wandoberfläche (Konvektion) abhängt.<sup>229</sup>

Abbildung 201 zeigt eine stark schwankende Temperaturkurve, weshalb die Ergebnisse der folgenden Berechnungen mit Vorsicht zu genießen sind. Eine 55 cm starke Wand aus reinem Stampflehm hat einen U-Wert von ca. 1,86 W/m<sup>2</sup>K.<sup>230</sup> Insgesamt können im Zeitraum vom 16.02.2023 bis 28.03.2023 U-Werte im Bereich von -184,62 W/m<sup>2</sup>K bis 192,31 W/m<sup>2</sup>K. Diese Extremwerte zeigen bereits, dass viele Werte für eine realistische Betrachtung gestrichen werden müssen. Tabelle 65 zeigt eine Auswahl an ermittelten U-Werten, welche in einem realistischen Bereich liegen [ $U \leq 1,86$ ].

Tabelle 65: Ermittelte U-Werte

Datum, Uhrzeit	Außentemp. [°C]	Innenraumtemp. [°C]	Innenwandtemp. [°C]	R-Wert [m <sup>2</sup> K/W]	U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]
24.02.2023, 01:00	6,00	11,50	10,20	0,55	1,82
24.02.2023, 04:00	5,00	11,50	10,20	0,65	1,54
24.02.2023, 06:00	4,00	11,50	10,20	0,75	1,33
24.02.2023, 08:00	3,00	11,60	10,20	0,80	1,25
24.02.2023, 16:00	2,00	11,50	10,10	0,88	1,13

<sup>225</sup> Vgl. Plag 2023b.

<sup>226</sup> Vgl. Plag 2023b.

<sup>227</sup> Vgl. Plag 2023b.

<sup>228</sup> Vgl. Plag 2023b.

<sup>229</sup> Vgl. Plag 2023b.

<sup>230</sup> Vgl. ubakus 2023.

Datum, Uhrzeit	Außentemp. [°C]	Innenraumtemp. [°C]	Innenwandtemp. [°C]	R-Wert [m²K/W]	U-Wert [W/m²K]
24.02.2023, 18:00	1,00	11,50	10,10	0,98	1,03
25.02.2023, 01:00	2,00	11,20	10,00	1,00	1,00
25.02.2023, 15:00	0,00	10,50	9,20	1,05	0,95
25.02.2023, 16:00	0,00	10,40	9,20	1,13	0,89
26.02.2023, 00:00	-2,00	10,00	8,70	1,20	0,83
26.02.2023, 02:00	-2,00	9,80	8,60	1,28	0,78
26.02.2023, 05:00	-3,00	9,60	8,40	1,37	0,73

Quelle: eigene Anfertigung 2023

Der kleinste berechnete U-Wert liegt bei 0,73 W/m²K. Da dieser Wert zunächst wenig repräsentativ ist, sollen im Folgenden weitere Untersuchungen zur Bestimmung des U-Wertes vorgenommen werden.

Auch anhand der Temperaturamplitudendämpfung (TAD) und des Temperaturamplitudenverhältnisses (TAV) kann eine Aussage zur dämmenden Wirkung der Lehmtafelbauweise getroffen werden. Dabei wird beschrieben, „wie stark die Temperatur der inneren Oberfläche [eines Bauteils] im Vergleich zur äußeren Oberfläche schwankt.“<sup>231</sup> Üblicherweise bezieht sich diese Untersuchung auf die täglichen Temperaturschwankungen im Sommer (Hitze am Tag und kühlere Temperaturen in der Nacht). Dennoch kann diese Untersuchung auch bei Untersuchungen im Winter und Frühling eine grobe Einordnung zur Bauteilqualität liefern.

Es wird die TAD über den gesamten Messzeitraum im 24-Stunden-Takt, jeweils von 10:00 Uhr morgens bis 09:00 Uhr morgens des Folgetags, erhoben (vgl. Abbildung 202).

So schwankte die Außentemperatur im Zeitintervall 05.03.2023, 10:00 Uhr, bis 06.03.2023, 09:00 Uhr, von -1 °C bis +3 °C und die Innenraumtemperatur von +5,6 °C bis +5,8 °C Die Temperaturdifferenz im Außenraum ( $\Delta T_A$ ) beträgt somit 4°C und im Innenraum ( $\Delta T_I$ ) 0,2 °C.

$$TAD = \frac{\Delta T_A}{\Delta T_I} \quad (106)$$

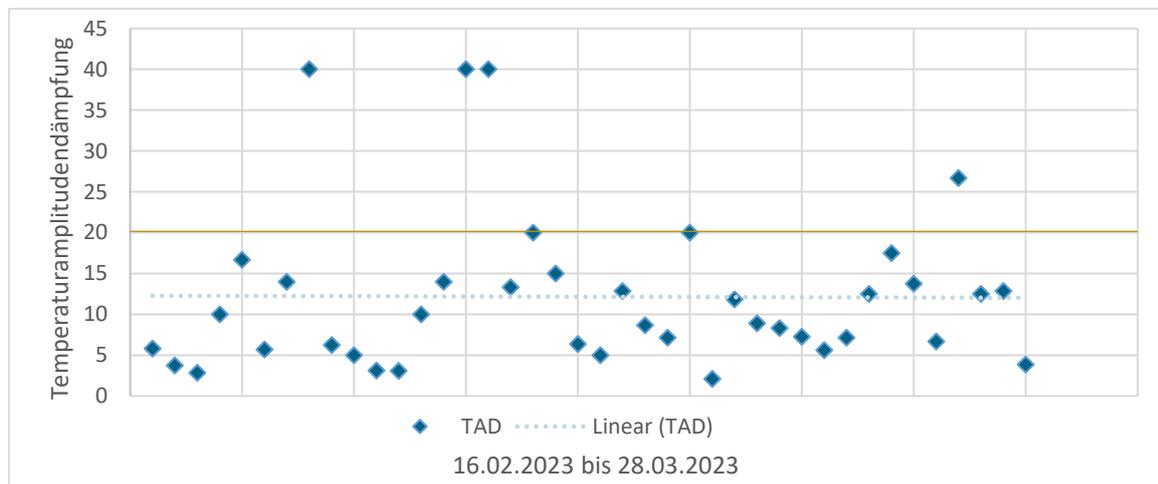
<sup>231</sup> Plag 2023a.

$$\frac{4\text{ }^{\circ}\text{C}}{0,2\text{ }^{\circ}\text{C}} = 20$$

Eine TAD von 20 bedeutet, dass die Amplitude der Temperaturschwankung an der äußeren Oberfläche 20-mal größer ist, als an der inneren Oberfläche. Grundsätzlich gilt, je höher der Wert der TAD, desto besser dämmt die Wand. Werte ab 20 gelten dabei als gut.<sup>232</sup>

Aus Abbildung 202 wird deutlich, dass die TAD im betrachteten Zeitraum deutlich schwankt, während Einzelwerte eine TAD von 40 ergeben, liegt das Minimum bei 2,11. Der Durchschnitt liegt bei 12,15 (hellblaue Linie). Optimal wäre eine Durchführung dieser Berechnung nach einer möglichst konstanten Außentemperatur, sodass starke Temperaturschwankungen vor dem Betrachtungszeitraum die Innenraumtemperatur möglichst wenig beeinflussen. Eine TAD von über 20 wurden stets in Zeiträumen erreicht, in welchen die Temperaturen vor Messbeginn keinen großen Schwankungen ausgesetzt waren.

Abbildung 202: Temperaturamplitudendämpfung im Zeitraum vom 16.02.2023 bis 28.03.2023.



Quelle: eigene Anfertigung 2023

Das Temperaturamplitudenverhältnis (TAV) wird aus dem Kehrwert der TAD gebildet.<sup>233</sup> Das TAV liegt immer zwischen 0 und 1 und ist ebenfalls ein Indiz für den Temperaturunterschied der Inneren Oberflächentemperatur eines Bauteils im Vergleich zur Außentemperatur. Je kleiner der Wert des TAV, desto geringer wirken sich Temperaturschwankungen im Außenbereich auf den Innenraum aus.

$$TAV = \frac{1}{TAD} \quad (107)$$

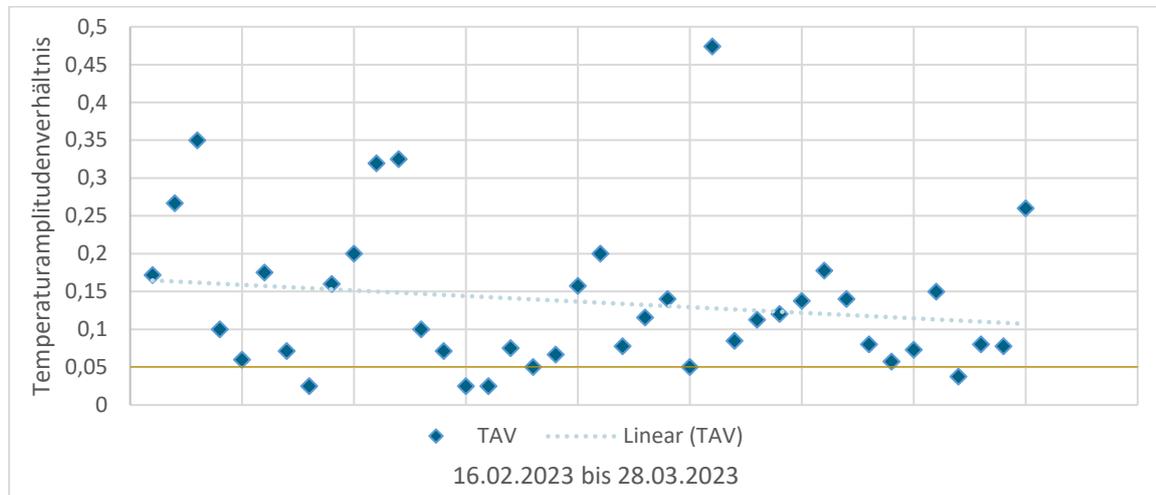
Die zugehörigen Werte des TAV sind in Abbildung 203 dargestellt. Die Ermittelten Werte sollen im nächsten Schritt in Bezug zu bekannten Baustoffen gesetzt werden, sodass eine grobe Einschätzung des U-Wertes stattfinden kann. Da die maximalen Werte der TAD in Zeiträumen aufgezeichnet werden

<sup>232</sup> Vgl. Plag 2023a.

<sup>233</sup> Vgl. Plag 2023a.

konnten, denen keine großen Temperaturschwankungen vorausgingen, sollen diese Werte für den Vergleich herangezogen werden ( $TAV = 0,025$ ). Dieser Vergleich befindet sich in Tabelle 66.

Abbildung 203: Temperaturamplitudenverhältnis im Zeitraum vom 16.02.2023 bis 28.03.2023.



Quelle: eigene Anfertigung 2023

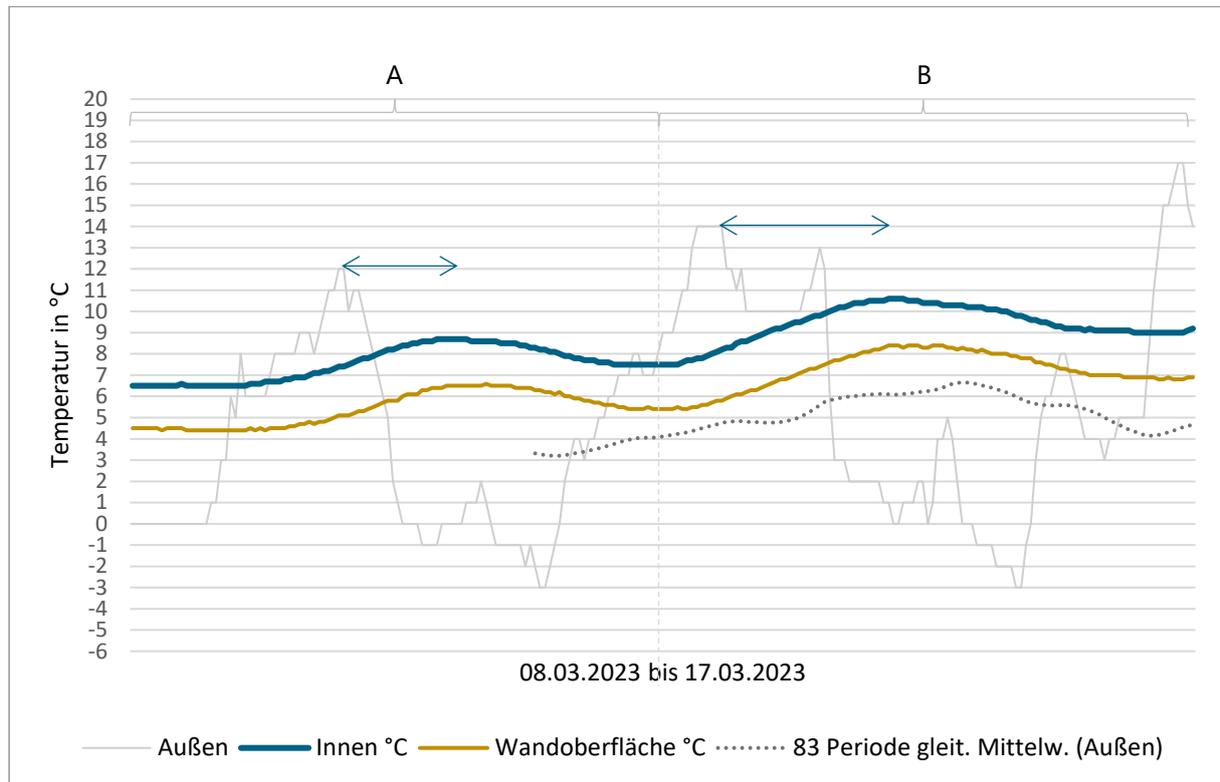
Die zeitliche Verzögerung zwischen der äußeren und inneren Oberfläche einer Struktur in Bezug auf ihre Temperaturamplituden kann durch die Phasenverschiebung charakterisiert werden.<sup>234</sup> Diese Phasenverschiebung wird in Stunden angegeben und beschreibt die Differenz zwischen der Zeit, zu der die maximale Temperatur auf der äußeren Oberfläche erreicht wird und der Zeit, zu der die maximale Temperatur auf der inneren Oberfläche erreicht wird. Eine Phasenverschiebung von 10-12 Stunden gilt dabei, in Bezug auf den sommerlichen Wärmeschutz, als Ideal.<sup>235</sup>

Für diese Untersuchung müssen einzelne Temperaturkurven aus dem Gesamtgraphen herausgenommen und einzeln betrachtet werden. Da gerade in der zweiten Messhälfte (vgl. Abbildung 201) zwei starke wellenförmige Temperaturverläufe aufgezeichnet wurden (03.03.2023 bis 17.03.2023), sollen diese im Folgenden genauer betrachtet werden (vgl. Abbildung 204).

<sup>234</sup> Vgl. Plag 2023a.

<sup>235</sup> Vgl. Plag 2023a.

Abbildung 204: Temperaturverlauf im Bereich des 08.03.2023 bis 17.03.2023.



Quelle: eigene Anfertigung 2023

Im betrachteten Zeitraum schwanken die Temperaturen Außen von +17 °C bis -3 °C und Innen von +10,6 °C bis +6,5 °C (vgl. Abbildung 204).

Die beiden Pfeile kennzeichnen die Zeitpunkte, in welchen die Außen- und Innenwandtemperaturen ihre Höchstwerte erreichen. Der horizontale Abstand der beiden Pfeile voneinander wird als Phasenverschiebung bezeichnet und kann in Stunden gemessen werden.<sup>236</sup>

Im Bereich A schwankte die Außentemperatur von -3 °C bis +12 °C und die Innenraumtemperatur von +6,5 °C bis +8,7 °C. Der Maximalwert der Außentemperatur wurde zuletzt am 10.03.2023 um 13:00 Uhr gemessen. Im Innenraum wurde die Maximaltemperatur von 8,7 °C am 11.03.2023 um 8:00 Uhr erstmalig erfasst. Die erfasste Phasenverschiebung beträgt somit 19 Stunden.

Im Bereich B schwankte die Außentemperatur von +17 °C bis -3 °C und die Innenraumtemperatur von +7,5 °C bis +10,6 °C. Der letzte Maximalwert der Außentemperatur wurde am 13.03.2023 um 18:00 Uhr aufgezeichnet. Im Innenraum wurde die Maximaltemperatur von 10,6 °C am 15.03.2023 um 04:00 Uhr nachts dokumentiert. Die erfasste Phasenverschiebung beträgt somit 10 Stunden.

Der Durchschnitt der Phasenverschiebung liegt mit 14,5 h knapp über dem Idealbereich.

Tabelle 66 setzt die gewonnenen Erkenntnisse in einen größeren Kontext. Alle angegebenen Werte beziehen sich auf eine Bauteilstärke von 55 cm. Die Untersuchungen weisen darauf hin, dass der U-Wert des betrachteten Bauteils zwischen 0,31 W/m<sup>2</sup>K und 0,36 W/m<sup>2</sup>K liegen könnten.

<sup>236</sup> Vgl. Plag 2023a.

Tabelle 66: Wärmetechnische Einordnung der LTBw.

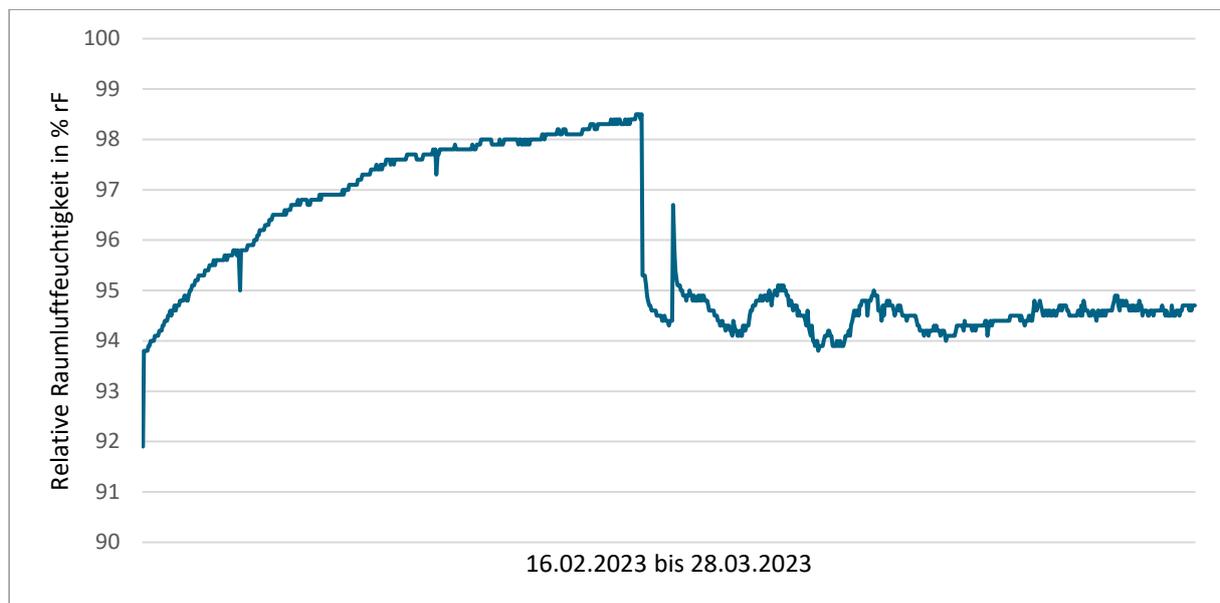
Baustoff mit 550 mm dicke	TAV	Phasenverschiebung	Amplitudendämpfung	U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]
Stahlbeton	0,030	15,3	33,8	2,10
Stampflehm (CLAYTEC)	0,030	15,3 h	33,9	1,86
Porit Porenbeton	0,025	16,0 h	40,5	0,36
<b>LTBw</b>	<b>0,025</b>	<b>14,5 h</b>	<b>40,0</b>	
Hochlochziegel POROTHERM PLAN	0,001	Nicht relevant	> 100	0,31
Stroh- Leichtlehm	0,003	Nicht relevant	> 100	0,21

Quelle: eigene Anfertigung 2023 mit Daten von ubakus 2023

## Schimmelbildung

Die Messergebnisse der relativen Raumlufffeuchtigkeit zeigen extrem erhöhte Werte von weit über 90 %rF (Abbildung 205). Die Messungen der Raumlufffeuchte wurden mit dem testo 605i Thermo-Hygrometer<sup>237</sup> durchgeführt. Dies lässt sich einerseits mit den hygroskopischen Eigenschaften von Lehm, andererseits aber auch mit der schlechten Lüftungssituation im Demonstrator und den kalten Temperaturen während der Wintermonate erklären. Grundsätzlich ist bei kalten Temperaturen die Raumlufffeuchtigkeit oft hoch, weil kalte Luft weniger Feuchtigkeit aufnehmen kann als warme Luft und somit schneller gesättigt ist.

Abbildung 205: Relative Raumlufffeuchtigkeit im Messraum.



Quelle: eigene Anfertigung 2023

Am 08.03.2023 gab es beim Öffnen des Messraums zum Datenauslesen einen drastischen Abfall der Luftfeuchtigkeit. Grund dafür war vermutlich der schlagartige Luftaustausch. Gleichzeitig lässt sich erkennen, dass durch die gestiegenen Temperaturen die Luftfeuchtigkeit allgemein in einem etwas niedrigeren Bereich verbleibt als in den besonders kalten Phasen vom 16.02.2023 bis 08.03.2023.

Wenn die Raumlufffeuchtigkeit dauerhaft viel zu hoch ist, kann dies zu einer Reihe von Problemen führen:

1. Schimmelbildung
2. Geruchsprobleme
3. Gesundheitliche Probleme
4. Schäden an der Bausubstanz

Für die Überprüfung der Schimmelpilzbelastung auf der Wandoberfläche beziehungsweise damit einhergehend der Sporen in der Raumluff wurden insgesamt drei Schimmelpilzschnelltests der Marke airself im Messraum aufgestellt. Als Referenz wurde eine Petrischale außerhalb des Messraums

<sup>237</sup> testo 2023.

aufgestellt. „Wenn die Konzentration der Schimmelpilzsporen in der Außenluft hoch ist, ist diese in der Raumluft [...] in der Regel ebenfalls höher.“<sup>238</sup>

*„Schimmelpilze sind ein ubiquitärer Bestandteil unserer Biosphäre. Sie sind in den gemäßigten Breiten in Gebäuden, in der Stadt- oder Landluft allgegenwärtig. „Schimmelpilze“ stellen keine taxonomisch klar definierte Einheit von Pilzen dar, sondern einen Sammelbegriff für hyphen- und sporenbildende Pilze, die zu den Abteilungen der Zygomycota, Ascomycota, Basidiomycota und Fungi imperfecti gehören.“<sup>239</sup>*

Die Entstehung von Schimmel in Gebäuden hängt von verschiedenen Faktoren ab, einschließlich Feuchtigkeit, Temperatur und Nährstoffen.<sup>240</sup> Feuchtigkeit ist der wichtigste Faktor für Schimmelwachstum, da Schimmel Feuchtigkeit benötigt, um zu keimen und zu wachsen. Grundsätzlich gelten eine relative Raumluftfeuchtigkeit von über 65 %, Temperaturen von unter 17 °C [...] und ein hohes Nährstoffangebot von organischen Materialien als optimale Wachstumsbedingungen.<sup>241</sup>

Die Petrischalen mit Nährboden werden zur Sporensammlung für zwei Stunden in den Demonstrator gestellt. Nach erfolgreicher Sporensammlung werden die Petrischalen in einen Schutzbeutel gelegt und die zehntägige Bebrütung beginnt. Nach drei, sechs und zehn Tagen werden schließlich die sichtbaren Schimmelpilzkolonien gezählt und dokumentiert. Dabei gilt, dass ausschließlich Kolonien mitgezählt werden, welche mindestens 3 mm groß sind. „Weiße Kolonien und solche mit schleimiger Oberfläche werden nicht mitgezählt“<sup>242</sup>

Da das Schimmelpilzwachstum nach zehn Tagen als abgeschlossen gilt, kann an diesem Tag (09.03.2023) die abschließende Auswertung vorgenommen werden.

Tabelle 67: Dokumentation und Auswertung der Schimmelpilzkolonien im Demonstrator.

Probenbezeichnung	Auszählung	Datum	Koloniezahl	Auswertung
P <sub>1</sub>	Nach 3 Tagen	02.03.2023	0	Geringe Belastung
	Nach 6 Tagen	05.03.2023	> 52	Sehr hohe Belastung
	Nach 10 Tagen	09.03.2023	> 52	Sehr hohe Belastung
P <sub>2</sub>	Nach 3 Tagen	02.03.2023	1	Geringe Belastung
	Nach 6 Tagen	05.03.2023	> 52	Sehr hohe Belastung

<sup>238</sup> airself, S. 5.

<sup>239</sup> RKI 2007, S. 1308.

<sup>240</sup> Vgl. RKI 2007, 1309; 1317.

<sup>241</sup> Vgl. airself, S. 16.

<sup>242</sup> airself, S. 4.

Probenbezeichnung	Auszählung	Datum	Koloniezahl	Auswertung
P <sub>3</sub>	Nach 10 Tagen	09.03.2023	> 52	Sehr hohe Belastung
	Nach 3 Tagen	02.03.2023	1	Geringe Belastung
	Nach 6 Tagen	05.03.2023	> 52	Sehr hohe Belastung
	Nach 10 Tagen	09.03.2023	> 52	Sehr hohe Belastung
P <sub>Ref</sub>	Nach 3 Tagen	02.03.2023	1	Geringe Belastung
	Nach 6 Tagen	05.03.2023	51	hohe Belastung
	Nach 10 Tagen	09.03.2023	> 52	Sehr hohe Belastung

Quelle: eigene Anfertigung 2023

Bereits nach drei Tagen ließ sich bei den Proben aus dem Messraum eine sehr hohe Schimmelpilzbelastung feststellen. Die Referenzprobe, welche mit etwas Abstand zum Demonstrator platziert wurde, zeigte ebenfalls eine sehr hohe Schimmelpilzbelastung an.

Dennoch lässt sich zwischen der Referenzprobe und der Probe aus dem Innenraum (vgl. Abbildung 206) ein deutlicher Unterschied erkennen.

Abbildung 206: Schimmelpilz-Kolonien an Tag 10 (09.03.2023).



Foto: Daube 2023

## Zusammenfassung Messungen

Die Messungen haben gezeigt, dass die Lehmtafelbauweise womöglich einen U-Wert von unter 0,52 W/m<sup>2</sup>K aufweist. Für verlässlichere Werte sollten die durchgeführten Messungen weitergeführt werden und nach einer längeren Aufzeichnungsdauer erneut ausgewertet werden.

Es hat sich außerdem gezeigt, dass die Schimmelpilzbelastung im Inneren des Demonstrators in einem kritischen Bereich liegt. Es sollten Maßnahmen zur besseren Trocknung des Materials vorgenommen werden, um die Schimmelpilzbelastung zu reduzieren. Ist der Lehm vollständig durchgetrocknet, ist für die Pilzkulturen kein passender Nährboden mehr vorhanden, sodass diese als Konsequenz absterben. Ob der Schimmelbefall primär die Wandoberflächen oder gegebenenfalls die Holzfaserdämmung betrifft, gilt zu überprüfen. Auch ein Leck im Bereich des Tischtennisnetzes muss ausgeschlossen werden, sodass der Messraum dauerhaft trocken gehalten werden kann.

## Ergebnisse

### Zusammenführung der Zwischenergebnisse zum Endergebnis

Die Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens haben gezeigt, dass die Lehmtafelbauweise eine vielversprechende Alternative zu herkömmlichen Bauweisen darstellt.

Durch die Verwendung von vorgefertigten Massivlehmwänden können Bauzeiten und -kosten reduziert werden, während gleichzeitig ökologische und energetische Anforderungen erfüllt werden. Ein wichtiger Faktor bei der Entwicklung der Lehmtafelbauweise war die Einhaltung des Gebäudeenergiegesetzes (GEG), welches einen U-Wert von mindestens  $0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$  vorschreibt.

Ob die entwickelte Wand diesen Wert einhält, konnte nur näherungsweise bestimmt werden. In diesem Bereich sind weitere Tests notwendig. Die hierzu durchgeführten Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass die Einhaltung eines U-Werts von unter  $0,36 \text{ W/m}^2\text{K}$  zu erwarten ist (vgl. Kapitel Messungen, ab Seite 265). Eine durchgeführte Simulation kam zu dem Ergebnis, dass der U-Wert wohl schlechter als  $0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$  ist (vgl. Kapitel Simulation, ab Seite 59). An dieser Stelle sollte erwähnt werden, dass Bauteile, welche nicht gänzlich durchgetrocknet sind (vgl. Kapitel Schimmelbildung, ab S. 273) einen schlechteren U-Wert aufweisen als vollständig getrocknete Bauteile. Somit ist die Einhaltung eines U-Wertes von  $0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$  weiterhin als realistisch einzustufen.

Die Erfüllung dieser Anforderungen wurde durch eine Kombination aus einer Trag- und einer Dämmschicht erreicht. Die Tragschicht der Wand besteht aus einer 25 cm starken Lehm-Kork-Schicht, die mit 30 Vol. % Korkgranulat, 3 Vol. % Tonmehl und einem Hochleistungsflachsgewebe als Geogitter versehen ist. Durch diese Mischung wird eine hohe Druckfestigkeit von über  $2,20 \text{ N/mm}^2$  erreicht. Darüber hinaus konnte eine mittlere Biegezugfestigkeit von  $0,74 \text{ N/mm}^2$  und ein mittlerer E-Modul von  $2.128 \text{ N/mm}^2$  nachgewiesen werden.

Im Zuge der Forschung konnte die Verwendung der Lehmtafelbauweise für ein zweigeschossiges Gebäude nachgewiesen werden (vgl. Kapitel Bemessung LTBw, ab Seite 212).

Die Dämmschicht ist 30 cm stark und enthält 60 Vol. % Korkgranulat, 1 Vol. % Tonmehl und ebenfalls ein eingelegtes Geogitter aus Flachs. Diese Schicht ist selbsttragend und muss keine Lasten aufnehmen, weshalb eine Druckfestigkeit von  $1 \text{ N/mm}^2$  genügt.

Die Verbindung der einzelnen Lehmtafeln erfolgt über eine Falz-Verbindung, die eine kraftschlüssige Verbindung der Bauteile auf der Baustelle ermöglicht.

Jede Lehmtafel hat eine Breite von 2,00 m, eine Höhe von 1,50 m und ist 0,55 m stark. Durch die Stapelung von zwei Lehmtafeln kann eine angenehme Raumhöhe für den privaten Wohnungsbau erreicht werden. Für repräsentative Bauten wie Museen empfiehlt sich eine Stapelung von drei Elementen.

Die Herstellung der vorgefertigten Massivlehmwände erfolgt in einem zentralen Werk. So wird ermöglicht, die Bauteile mit einer hohen Genauigkeit und gleichbleibenden Qualität herzustellen. Dazu werden zunächst kubische Körper maschinell gestampft und benötigte Falzen erst nachträglich mit einer Steinsäge herausgeschnitten (vgl. Kapitel Vorfertigung, Transport und Einbau, ab Seite 233).

Für die äußere Erscheinung der Lehmbautafeln wurden unterschiedliche Oberflächenveredelungen erprobt. So sind Sichtoberflächen mit Erosionsbremsen aus Tonscherben oder Trasskalkmörtel und gewachste Tafeln möglich (vgl. Kapitel Demonstrator, ab Seite 253). Alternativ können die Tafeln verputzt oder mit einer Holzfassade versehen werden. Durch die beschriebenen Maßnahmen kann ein Witterungsschutz im Bauteil sichergestellt werden, sodass die Wand unabhängig der baulichen Gegebenheiten sicher eingebaut werden kann.

Vereinfachte Brandversuche wiesen für die Lehmtafelbauweise einen Feuerwiderstand von 90 Minuten nach (vgl. Kapitel Brandschutz, ab Seite 148). Für die Einordnung in eine Baustoffklasse konnte anhand dieser Versuche für die Tragschicht A1 (nicht brennbar) und für die Dämmschicht B1 (schwerentflammbar) festgestellt werden.

Um dem großen Ressourcenverbrauch und dem Abfallaufkommen der Baubranche entgegenzuwirken wurde mit Versuchen die Recyclingfähigkeit der Lehmtafelbauweise sichergestellt (vgl. Rezyklierbarkeit, ab Seite 140).

### Bewertung/Diskussion/Zielerreichung – Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext inkl. möglicherweise bekannt gewordener Ergebnisse von dritter Seite

Die wesentlichen Ziele der Forschungsarbeit wurden erreicht. Es wurde eine vorgefertigte, lasttragende und wärmedämmende Lehmbauweise entwickelt, welche den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck und das Abfallaufkommen der Baubranche drastisch reduzieren kann (Arbeitshypothese 1 und 2, vgl. S. 18). Jedoch konnte die Zielsetzung einer Wandstärke von insgesamt lediglich 25 cm nicht realisiert werden. Die erreichten 55 cm befinden sich jedoch im üblichen Bereich für mineralische Baustoffe mit zusätzlicher Dämmung.

Zu Beginn der Forschungsarbeit wurden sehr hohe Anforderungen an den ökologischen Fußabdruck der zu entwickelnden Bauweise gestellt. Diese erforderten, dass die Lehmtafeln konsequent recyclebar sein sollten und möglichst nur aus natürlichen Materialien bestehen. Aus diesem Grund wurde ein Geogitter aus Flachshochleistungsgewebe als Stabilisator gewählt, da es den hohen ökologischen Standard erfüllen und gleichzeitig die Druckfestigkeit des Lehms deutlich erhöhen konnte. Auch die Verwendung von Kork hat sich als gute Alternative zu anderen organischen Leichtzuschlägen herausgestellt. Durch dieses Vorgehen können wertvolle Ressourcen geschont werden, wodurch die anfangs formulierte Arbeitshypothese: Durch das regionale Vorkommen und die gute Rezyklierbarkeit können durch Lehmbau Ressourcen geschont werden, angenommen werden kann (vgl. Kapitel Arbeitshypothesen, S. 18). Auch die regionale Verfügbarkeit von Lehm und somit die Option zur Flächendeckenden Anwendung der Lehmtafelbauweise kann bestätigt werden.

Es bleibt unklar, ob die Lehmtafelbauweise den angestrebten Wärmedurchgangskoeffizienten von 0,20 W/m<sup>2</sup>K erreicht. Die Ergebnisse aus den Messungen (ab S. 265) lassen jedoch insgesamt auf einen guten Wärmedurchgangskoeffizienten schließen. Allerdings konnte im Rahmen der Forschung nur eine kurze Zeitperiode thermisch aufgezeichnet werden. Eine längere Aufzeichnung hätte belastbarere Ergebnisse geliefert, da davon auszugehen ist, dass bei einer längeren Aufzeichnungsdauer auch konstantere Temperaturverläufe hätten aufgezeichnet werden können. Die Arbeitshypothese, dass durch die Zugabe von organischen Zuschlagstoffen die Lehmwand den aktuellen Anforderungen an Wärmeschutz, bei vergleichsweise schlanken Bauteilquerschnitten, gerecht wird, kann demnach unter Vorbehalt angenommen werden. Gleichzeitig bleiben durch das konsequente ökologische Handeln die gesundheitsfördernden Eigenschaften in Gänze vorhanden, wodurch die Arbeitshypothese: Die gesundheitsfördernden Eigenschaften von Lehm können durch die Lehmtafelbauweise erhalten bleiben, bestätigt werden kann.

Im Rahmen des „New European Bauhaus“ (NEB), initiiert von der Präsidentin der Europäischen Kommission – Ursula von der Leyen – wurde das Projekt „ERDEN PURE Walls“ von der Firma Lehm Ton Erde Baukunst GmbH (Martin Rauch) eingereicht.<sup>243,244</sup> Dabei handelt es sich um vorgefertigte

---

<sup>243</sup> Vgl. Lehm Ton Erde Baukunst GmbH 2023.

<sup>244</sup> Vgl. Bundesministerium für Bildung und Forschung 2023.

Lehmbauelemente, welche laut Aussage der Entwickler zu 100 % aus Naturerde hergestellt sind.<sup>245</sup> Eine wesentliche Besonderheit des Projektes ist die lasttragende Eigenschaft dieser Wände.<sup>246</sup> Laut der Projektbeschreibung haben die ERDEN PURE Walls auch eine wärmedämmende Wirkung.<sup>247</sup> Wie genau diese dämmende Wirkung im Bauteil erreicht wird – und welcher energetische Standard angestrebt wurde – geht aus der Beschreibung jedoch nicht hervor.

Laut der Lehm Ton Erde Baukunst GmbH kann durch die Vorfertigung eine Kostenersparnis von 50 % und eine Reduktion der Produktionszeit um 65 % erreicht werden.<sup>248</sup> Eine ähnliche Reduktion von Zeit- und Kostenaufwand ist auch für die Lehmtafelbauweise zu erwarten. Somit können die Folgenden Arbeitshypothesen bestätigt werden:

1. Durch das Vorfertigen von Lehmtafeln können die Kosten minimiert werden.
2. Eine robotik-gestützte Herstellung könnte den Zeit- und Kostenaufwand weiter minimieren und würde darüber hinaus komplexe Schichtungen erlauben.
3. Die Tragfähigkeit von Lehm lässt sich weiter optimieren.
4. Durch die Lehmtafelbauweise kann der Lehm auch für Laien leichter zugänglich gemacht werden.

Ob die Nutzung eines Baustoffs in Deutschland im Wesentlichen von monetären Faktoren abhängig ist, konnte im Zuge der Forschung nicht abschließend geklärt werden. Die Ergebnisse der durchgeführten Umfrage legen jedoch nahe, dass monetäre Faktoren eine große Rolle spielt (vgl. Kapitel Umfrage, S. 243).

Insgesamt ähnelt das Projekt stark der Lehmtafelbauweise. Die Entwicklung zeigt auch, dass der Bedarf nach einer solchen Bauweise bereits von anderen Stellen erkannt wurde. Aus Sicht der Forschung ist dies eine sehr wertvolle Erkenntnis. Erst durch die Forschungsarbeit von verschiedenen Stellen kann der Baustoff Lehm aus seiner verdrängten Position gehoben werden und so nach und nach in den Fokus des Bausektors finden.

## Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

Die im Zuge der Forschung durchgeführten Untersuchungen wurden im vorliegenden Bericht detailliert dokumentiert. Dadurch soll sichergestellt werden, dass Leser:innen alle getätigten Schritte nachvollziehen können. Im größeren Kontext bedeutet dies, dass die Forschungsarbeit wie ein Leitfaden genutzt werden kann und labortechnische Versuche so untereinander besser vergleichbar werden.

Aktuell gibt es für den Stampflehmbau noch keine Norm, die Versuchsaufbauten und -durchführungen regelt. So müssen Wissenschaftler:innen derzeit Parameter wie beispielsweise die Belastungsgeschwindigkeit bei Druckversuchen, aufbauend auf persönliche Erfahrung, wählen. Die beiden Untersuchungsreihen Untersuchungsreihe 7 – weggeregelt (S. 114) und Untersuchungsreihe 7 – kraftgeregelt (S. 116) haben jedoch gezeigt, dass die Parameter der Versuchsdurchführung durchaus einen messbaren Einfluss auf die Ergebnisse haben können.

---

<sup>245</sup> Vgl. Lehm Ton Erde Baukunst GmbH 2023.

<sup>246</sup> Vgl. Lehm Ton Erde Baukunst GmbH 2023.

<sup>247</sup> Lehm Ton Erde Baukunst GmbH 2023.

<sup>248</sup> Lehm Ton Erde Baukunst GmbH 2023.

Neben der Entwicklung einer lasttragenden Lehmbauweise wurden daher viele wichtige Parameter, unter Anderem zu Versuchsaufbauten und -durchführungen, dokumentiert. Auch die detaillierte Dokumentation der vereinfachten Brandversuche (vgl. Kapitel Brandschutz, S. 148ff) könnte in künftigen Forschungsarbeiten ein nützliches Instrument zur brandschutztechnischen Ersteinschätzung einer Leichtlehmbauweise sein. Diese Versuche ersetzen keinen Brandversuch nach DIN 4102, können jedoch gerade zu Beginn einer Forschungs- oder Entwicklungsarbeit einen guten Überblick über die voraussichtliche Baustoff- und Feuerwiderstandsklasse liefern. Abschließende Versuche nach DIN 4102 können diese Ergebnisse dann validieren.

## Mitwirkende

### Autorinnen und Autoren

M.Sc. Daube, Larissa (Bauhaus-Universität Weimar)

### Weitere Mitwirkende

Bieganski, Cedric (Bauhaus-Universität Weimar)

- Mithilfe Vorbereitung und Durchführung Workshop

Dr. Linne, Katrin (Bauhaus-Universität Weimar)

- Beratung bei Versuchsdurchführungen
- Mitarbeit bei Planung von Versuchsaufbauten

Mokharpour Khanghah, Fariba (Bauhaus-Universität Weimar)

- ANSYS Simulation

Plattner, Paul Felix (Bauhaus-Universität Weimar)

- Hilfe bei Versuchsdurchführungen

Prof. Dr.-Ing. Ruth, Jürgen (Bauhaus-Universität Weimar)

- Beratung bei Versuchsdurchführungen
- Mitarbeit bei Planung von Versuchsaufbauten

Raj Das, Rohan (Bauhaus-Universität Weimar)

- Vorbereitung ANSYS Simulation

Schlegel, Simon (Bauhaus-Universität Weimar)

- Hilfe bei Versuchsdurchführungen

Zauke, Claudia Christine (Bauhaus-Universität Weimar)

- Kapitel Referenzbaustoff Beton, S. 212.
- Kapitel Numerische Herleitung innerer Kräfte von Verbundquerschnitten aus Stahlbeton, S. 130
- Kapitel Brandschutz, S. 148

## Projektpartner und weitere Fördermittelgeber

Alte Feuerwache Weimar e.V., Erfurter Str. 37 - 99423 Weimar

Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar, Coudraystraße 4/9 - 99423 Weimar

Dachverband Lehm e.V., Friedrich-Naumann-Str. 16 - 99423 Weimar

ZRS Architekten Ingenieure, Schlesische Str. 26 – 10997 Berlin

Planungsgruppe Geburtig, Humboldtstr. 21 – 99423 Weimar

CLAYTEC e. K., Nettetal Str. 113 – 41751 Viersen

## Betreuung

Wöffen, Daniel

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumforschung (BBR), Deichmanns Aue 31-37 - 53179 Bonn

Der Bericht stellt in Teilen eine Vorveröffentlichung zur Dissertation von Frau Larissa Daube dar. Dies wurde mit dem Erstprüfer Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ruth abgestimmt und durch die Graduerungskommission der Fakultät Architektur und Urbanistik der Bauhaus-Universität Weimar genehmigt.

---

## Kurzbiographien

**M.Sc. Larissa Daube**

ist wissenschaftliche Mitarbeiterin in Forschung und Lehre sowie Doktorandin am Lehrstuhl Konstruktives Entwerfen & Tragwerkslehre sowie Massivbau II der Bauhaus-Universität Weimar (BUW), Masterabschluss in Architektur (Vertiefungsrichtung archineering) an der BUW. Ihre Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich nachhaltige Baustoffe und Lehm- und Holzbau.

## Literaturverzeichnis

airself: Schimmelpilz Schnelltest. Anleitung & Auswertung. Online verfügbar unter <https://www.airself.de/anleitung-schimmeltest>.

Albert, Andrej (Hg.) (2014): Bautabellen für Ingenieure. Mit Berechnungshinweisen und Beispielen. 21., Aufl. Köln: Werner.

Alnefaie, Khaled A.; Abu-Hamdeh, Nidal H. (2020): Specific Heat and Volumetric Heat Capacity of Some Saudian Soils as affected by Moisture and Density. In: *International Journal of Materials* 7. DOI: 10.46300/91018.2020.7.8.

Al-Sanea, Sami A. (2000): Evaluation of Heat Transfer Characteristics of Building Wall Elements. In: *Journal of King Saud University - Engineering Sciences* 12 (2), S. 285–312. DOI: 10.1016/S1018-3639(18)30720-7.

Balke, Herbert (2010): Einführung in die Technische Mechanik. Statik. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (Springer-Lehrbuch). Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1531573>.

Baubiologie Magazin (16.06.2020): Pionier des Ökologischen Bauens. Interview mit Gernot Minke.

baubook Zentrale (2023): Ökologische Bauprodukte deklarieren. Unter Mitarbeit von Paul Schmidinger. Hg. v. Paul Schmidinger. Online verfügbar unter <https://www.baubook.at/zentrale/>, zuletzt aktualisiert am 14.02.2023, zuletzt geprüft am 14.02.2023.

BBSR (2017): BBSR-Analysen Kompakt 11/2017. Unter Mitarbeit von Claus Asam. Hg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR). BBSR. Bonn, zuletzt geprüft am 22.03.2023.

Bcomp (2016): powerRibs\_5020. Unter Mitarbeit von Julien. Hg. v. Bcomp.

Belhadj, B.; Bederina, M.; Dheilily, R. M.; Mboumba-Mamboundou, L. B.; Quéneudec, M. (2020): Evaluation of the thermal performance parameters of an outside wall made from lignocellulosic sand concrete and barley straws in hot and dry climatic zones. In: *Energy and Buildings* 225, S. 110348. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110348.

BKI (2023): Aktueller Baupreisindex & Daten aus vorherigen Jahren. Hg. v. Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH. Online verfügbar unter <https://bki.de/baupreisindex.html>, zuletzt aktualisiert am 09.02.2023, zuletzt geprüft am 09.02.2023.

Bodaghi, Masoud; Delfrari, Doriane; Lucas, Margot; Senoussaoui, Noha-Lys; Koutsawa, Yao; Uğural, Burcu Karaca; Perrin, Henri (2023): On the relationship of morphology evolution and thermal conductivity of flax reinforced polypropylene laminates. In: *Front. Mater.* 10. DOI: 10.3389/fmats.2023.1150180.

DIN 4102-2, 09. 1977: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, zuletzt geprüft am 01.03.2023.

DIN 4102-1, Mai 1998: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, zuletzt geprüft am 14.02.2023.

DIN 4102-4, Mai 2016: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, zuletzt geprüft am 14.02.2023.

Bundesministerium der Justiz; Bundesamt für Justiz (24.02.2012): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz). KrWG, vom 56. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/BJNR021210012.html>, zuletzt geprüft am 31.03.2023.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (2023): New European Bauhaus (NEB). Online verfügbar unter <https://www.nks-dit.de/weitere-foerdermoeglichkeiten/new-european-bauhaus>, zuletzt aktualisiert am 03.04.2023, zuletzt geprüft am 03.04.2023.

Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) (Hg.) (2023): ÖKOBAUDAT. Informationsportal Nachhaltiges Bauen. Unter Mitarbeit von Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR). Online verfügbar unter [https://www.oekobaudat.de/no\\_cache/datenbank/suche.html](https://www.oekobaudat.de/no_cache/datenbank/suche.html), zuletzt aktualisiert am 27.03.2023, zuletzt geprüft am 27.03.2023.

Bundestag (08.08.2020): Gebäudeenergiegesetz. GEG, vom 2020. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/geg/GEG.pdf>, zuletzt geprüft am 09.02.2023.

CAALA (2023): Nicht-erneuerbarer Primärenergiebedarf (PENRT). Online verfügbar unter <https://www.caala.de/lexikon/penrt>, zuletzt aktualisiert am 09.02.2023, zuletzt geprüft am 09.02.2023.

Claytec (2022): Produktdatenblatt. Stampflehm. Online verfügbar unter [https://www.claytec.de/Produkte/Bilder-und-Dokumente/6\\_Mauerwerk-Stampflehm-Lehm-Terrazzo/Stampflehm/Produktblatt-Stampflehm/02-004.pdf](https://www.claytec.de/Produkte/Bilder-und-Dokumente/6_Mauerwerk-Stampflehm-Lehm-Terrazzo/Stampflehm/Produktblatt-Stampflehm/02-004.pdf), zuletzt geprüft am 09.02.2023.

Cointeraux, François (2002): Der Lehmbau. oder die Pisé-Baukunst. 3. Reprintaufl. der Orig.-Ausg. Leipzig, Baumgärtner, 1803. Holzminden: Reprint-Verl. Leipzig.

Dachverband Lehm e.V. (Hg.) (2008): Lehm 2008. Tagungsbeiträge der 5. Internationalen Fachtagung für Lehmbau. Unter Mitarbeit von Julian Reisenberger und Stephan Jörchel. Weimar: Eigenverlag Dachverband Lehm e.V.

Deutsches Klima Konsortium (DKK) (2021): Briefing zur COP 26 | Deutsches Klima Konsortium. Online verfügbar unter <https://www.deutsches-klima-konsortium.de/de/briefing-cop26.html>, zuletzt aktualisiert am 27.03.2023, zuletzt geprüft am 27.03.2023.

Die Bundesregierung (2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050.

Die Bundesregierung (2022): Klimaschutzgesetz. Generationenvertrag für das Klima. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672>, zuletzt aktualisiert am 27.03.2023, zuletzt geprüft am 27.03.2023.

Die Bundesregierung (2023): Nachhaltigkeit – ein Thema von internationaler Bedeutung. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/nachhaltigkeitspolitik/nachhaltigkeit-ein-thema-von-internationaler-bedeutung-464732>, zuletzt aktualisiert am 27.03.2023, zuletzt geprüft am 27.03.2023.

Dierks, Klaus; Stein, Robert (2002): Moderner Lehmbau 2002. Ein Bemessungskonzept für tragende Lehmwände, S. 37–49, zuletzt geprüft am 24.10.2022.

DIN EN 1991-1-1/NA, 12.2010: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke.

DIN EN 1991-1-3, 03.2023: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke.

DIN EN 1995-1-1, 12.2010: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten.

Evans, Paul (2016): Specific heat capacity of materials. In: *The Engineering Mindset*, 16.10.2016. Online verfügbar unter <https://theengineeringmindset.com/specific-heat-capacity-of-materials/>, zuletzt geprüft am 30.03.2023.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (2019): Broschüre Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen.

Fölster, Thomas; Michaeli, Walter (1993): Flachs – eine nachwachsende Verstärkungsfasern für Kunststoffe? <München> / Deutsche Ausgabe. In: Kunststoffe, Bd. 83.

Hichem, Necib; Noureddine, Settou; Nadia, Saifi; Djamilia, Damene (2013): Experimental and Numerical Study of a Usual Brick Filled with PCM to Improve the Thermal Inertia of Buildings. In: *Energy Procedia* 36, S. 766–775. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.07.089.

IBU (2018): Umwelt-Produktdeklaration. Beton der Druckfestigkeitsklasse C 20/25. nach /ISO 14025/ und /EN 15804/. Hg. v. Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU). Berlin. Online verfügbar unter [https://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Wissen/Beton-Bautechnik/Nachhaltigkeit/Beton\\_der\\_Druckfestigkeitsklasse\\_C\\_2025.pdf](https://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Wissen/Beton-Bautechnik/Nachhaltigkeit/Beton_der_Druckfestigkeitsklasse_C_2025.pdf), zuletzt geprüft am 22.03.2023.

Institut für Bauen und Umwelt e.V. (2014): UMWELT-PRODUKTDEKLARATION nach ISO 14025 und EN 15804. Fortrac® T HUESKER Synthetic GmbH. Unter Mitarbeit von Robert Spang. Hg. v. Institut für Bauen und Umwelt e.V. Berlin. Online verfügbar unter [https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/resource/sources/0efd307d-0c7c-4555-ab04-e77edff604a4/Fortrac\\_T.pdf?version=00.01.000](https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/resource/sources/0efd307d-0c7c-4555-ab04-e77edff604a4/Fortrac_T.pdf?version=00.01.000), zuletzt geprüft am 06.03.2023.

IpeG - Institut GmbH (2014a): Schüttdämmstoffe. IpeG - Institut GmbH. Paderborn.

IpeG - Institut GmbH (2014b): Sonderprodukte. IpeG - Institut GmbH. Paderborn.

IpeG Institut (2023): Dämmlexikon. Online verfügbar unter [https://www.ipeg-institut.de/index.php?article\\_id=63](https://www.ipeg-institut.de/index.php?article_id=63), zuletzt aktualisiert am 09.02.2023, zuletzt geprüft am 09.02.2023.

Katwala, Amit (2021): This 3D-printed house is made entirely from mud. In: *WIRED UK*, 10.06.2021. Online verfügbar unter <https://www.wired.co.uk/article/tecla-3d-printed-house>, zuletzt geprüft am 27.03.2023.

KFW (2020): Anlage zu den Merkblättern: Energieeffizient Sanieren - Kredit und Investitionszuschuss, 2020.

Kloft, Harald (2019): Robotergestützte Fabrikation von Bauteilen aus Stampflehm. Unter Mitarbeit von 10.08.18.7-18.45. Hg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR). TU Braunschweig, Institut für Tragwerksentwurf. Online verfügbar unter <https://www.zukunftbau.de/projekte/forschungsfoerderung/1008187-1845>, zuletzt aktualisiert am 27.03.2023, zuletzt geprüft am 27.03.2023.

Kloft, Harald; Gosslar, Joschua; Ciftci, Can (2020): Rückblick 15. Projektstage der Bauforschung. Robotergestützte Fabrikation von Bauteilen aus Stampflehm. TU Braunschweig, Institut für Tragwerksentwurf. Online verfügbar unter <https://vimeo.com/510357041>, zuletzt aktualisiert am 29.03.2023, zuletzt geprüft am 29.03.2023.

Kloft, Harald; Loccarini, Federica; Delille, Charlotte; Oechsler, Johannes; Gosslar, Joschua (2019): Robotische Fabrikation von Bauteilen aus Stampflehm. In: *DBZ Deutsche BauZeitschrift* (7/8/2019), S. 54–59.

Klotz, Karlhorst (06.05.2022): Recyclingbeton wird ausgebremst | VDI. Interview mit Peter Jehle.

Köhler, Michael (2021): Überarbeitung der natureplus-Richtlinie 5010 – Emissionsarme Bauprodukte. Bewertung der Emissionen aus Holz- und Holzwerkstoffen. Bremer Umweltinstitut GmbH. Online verfügbar unter [https://www.ibo.at/fileadmin/ibo/meldungen/np\\_Ueberarbeitung\\_RL\\_5010-2.pdf](https://www.ibo.at/fileadmin/ibo/meldungen/np_Ueberarbeitung_RL_5010-2.pdf), zuletzt geprüft am 31.03.2023.

Kork-Deko (2023): Schüttdämmung. Hg. v. AB Kork-Handel GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter <https://www.kork-deko.de/korkgranulat/nach-anwendung/schuettdaemmung/>, zuletzt aktualisiert am 09.02.2023, zuletzt geprüft am 09.02.2023.

- Kumar Thota, Sannith; Duc Cao, Toan; Vahedifard, Farshid (2021): Poisson's Ratio Characteristic Curve of Unsaturated Soils. In: *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 147 (1). DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002424.
- Läpple, Volker (2016): Einführung in die Festigkeitslehre. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Lehm Ton Erde (2023): Kennwerte. Unter Mitarbeit von Martin Rauch. Online verfügbar unter <https://www.lehmtonerde.at/de/lehm/lehm.php?alD=43>, zuletzt aktualisiert am 31.03.2023, zuletzt geprüft am 31.03.2023.
- Lehm Ton Erde Baukunst GmbH (2023): ERDEN PURE Walls | NEW EUROPEAN BAUHAUS. Online verfügbar unter <https://2021.prizes.new-european-bauhaus.eu/de/node/268216>, zuletzt aktualisiert am 03.04.2023, zuletzt geprüft am 03.04.2023.
- LESANDO GmbH (2014): FINO Naturwachs. Technisches Merkblatt. Online verfügbar unter <https://docplayer.org/135394569-Fino-ist-im-abgetoenten-wie-nicht-abgetoenten-zustand-lasierend.html>.
- Maaloufa, Youssef; Mounir, Soumia; Khabbazi, Abdelhamid; Kettar, Jalal; Khaldoun, Asmae (2015): Thermal Characterization of Materials based on Clay and Granular: Cork or Expanded Perlite. In: *Energy Procedia* 74, S. 1150–1161. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.757.
- Minke, Gernot (1995): Lehm- und Lehmputz. Der Baustoff Lehm und seine Anwendung. 2. überarbeitete Auflage, zuletzt geprüft am 20.12.2022.
- Müller, Anette (2018): Baustoffrecycling. Entstehung - Aufbereitung - Verwertung. Wiesbaden: Springer Vieweg (SpringerLink Bücher).
- DIN EN 1991-1-1-4/NA, 02.2023: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter. Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke.
- Niemeyer, Richard (1982): Der Lehm- und Lehmputz. Freiburg/ Breisgau: ökobuch Verlag, zuletzt geprüft am 20.12.2022.
- Nierobis, Lars (2002): Dämmstoff: Kork, Backkork, Korkplatten, Korkschüttung, Korkschrot für die Wärmedämmung. Online verfügbar unter <http://www.waermedaemmstoffe.com/htm/kork.htm>, zuletzt aktualisiert am 17.08.2007, zuletzt geprüft am 16.02.2023.
- Plag, Ralf (2023a): Berechnung des Hitzeschutzes. Online verfügbar unter <https://www.ubakus.de/berechnung-des-hitzeschutzes/>, zuletzt aktualisiert am 02.04.2023, zuletzt geprüft am 02.04.2023.
- Plag, Ralf (2023b): U-Wert messen? Online verfügbar unter <https://www.ubakus.de/u-wert-messen/>, zuletzt aktualisiert am 01.04.2023, zuletzt geprüft am 01.04.2023.
- DIN EN 12390-13, 09.2021: Prüfung von Festbeton.
- DIN EN 12390-5, Oktober 2019: Prüfung von Festbeton, zuletzt geprüft am 13.12.2022.
- DIN 1048 Teil 5, 06.1991: Prüfverfahren für Beton.
- Rauch, Martin (2013): Fertigbauteile aus Lehm. Online verfügbar unter <https://www.espazium.ch/de/aktuelles/fertigbauteile-aus-lehm>, zuletzt aktualisiert am 30.10.2015, zuletzt geprüft am 29.03.2023.
- Rauch, Martin (2023): Lehm Ton Erde. Kapelle der Versöhnung |. Online verfügbar unter <https://www.lehmtonerde.at/de/projekte/projekt.php?pid=28>, zuletzt aktualisiert am 23.02.2023, zuletzt geprüft am 23.02.2023.

Rauch, Peter (2021): Herstellung und Eigenschaften von Lehmputz sowie Lehmestrich. Online verfügbar unter <https://www.ib-rauch.de/okbau/lehmbau1.html>, zuletzt aktualisiert am 13.11.2022, zuletzt geprüft am 10.01.2023.

RKI (2007): Schimmelpilzbelastung in Innenräumen--Befunderhebung, gesundheitliche Bewertung und Massnahmen. Mitteilung der Kommission "Methoden und Qualitätssicherung in der Umweltmedizin". In: *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz* 50 (10), S. 1308–1323. DOI: 10.1007/s00103-007-0339-y.

Röhlen, Ulrich; Ziegert, Christof (Hg.) (2020): *Lehmbau-Praxis. Planung und Ausführung*. Deutsches Institut für Normung; Beuth Verlag. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin, Wien, Zürich: Beuth (Beuth Praxis). Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6128477>.

S., C. (2014): Lebenszyklus Lehm. Ricola Kräuterzentrum, Laufen/CH. In: *DBZ Deutsche BauZeitschrift* (09/2014).

Schäfer, Inga (2019): Alnatura Arbeitswelt Darmstadt. Konsequenz klimagerecht konstruiert. In: *DBZ Deutsche BauZeitschrift* (09/2019), S. 80–85.

Schamoni, Wilfriede Renate (Hg.) (2021): *GEG 2020. Anforderungen, Planung, Umsetzung*. Kissing: WEKA Media GmbH & Co. KG (WEKA Praxislösungen).

Schroeder, Horst (2019): *Lehmbau*. 3. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Stadt Weimar (2022): *LANGE NACHT DER WISSENSCHAFTEN\_18.11.2022*. WEIMAR | WEIMARER LAND. Online verfügbar unter <https://www.weimar.de/fileadmin/Redaktion/Wirtschaft/Dokumente/Indwprogramm2022.pdf>, zuletzt geprüft am 01.04.2023.

Statistisches Bundesamt (2022): Bauen und Wohnen. Baugenehmigungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden nach überwiegend verwendetem Baustoff - Lange Reihen ab 1980 - 2021. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/Publikationen/Downloads-Bautatigkeit/baugenehmigungen-baustoff-pdf-5311107.html>, zuletzt geprüft am 23.02.2023.

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2021): Von Januar bis November 2020 genehmigte Wohnungen: 59 % in Mehrfamilienhäusern. Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/02/PD21\\_N015\\_44.html#:~:text=Von%20den%20insgesamt%20288%20000,entspricht%20einem%20Anteil%20von%2059%20%25,](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/02/PD21_N015_44.html#:~:text=Von%20den%20insgesamt%20288%20000,entspricht%20einem%20Anteil%20von%2059%20%25,) zuletzt aktualisiert am 19.08.2021, zuletzt geprüft am 27.03.2023.

testo (2023): Thermo-Hygrometer testo 605i mit Smartphone-Bedienung. Online verfügbar unter <https://www.testo.com/de-DE/testo-605i/p/0560-2605-02>, zuletzt aktualisiert am 24.03.2023, zuletzt geprüft am 24.03.2023.

Thoma, Erwin (2017): Bauteilkatalog. System Thoma Holz100. Ing. Erwin Thoma Holz GmbH. Online verfügbar unter [https://www.pdfprof.com/PDF\\_Image.php?id=17751&t=14](https://www.pdfprof.com/PDF_Image.php?id=17751&t=14), zuletzt geprüft am 31.03.2023.

Tuschinski, Melita (2023): GebäudeEnergieGesetz GEG 2020 tritt am 1. November 2020 in Kraft! Melita Tuschinski, Dipl.-Ing.UT, Freie Architektin + Fachautorin. Online verfügbar unter [https://geg-info.de/geg\\_news/200811\\_bauvorhaben\\_geg\\_oder\\_enev.htm](https://geg-info.de/geg_news/200811_bauvorhaben_geg_oder_enev.htm), zuletzt aktualisiert am 01.02.2023, zuletzt geprüft am 09.02.2023.

ubakus (2023): U-Wert-Rechner. Online verfügbar unter <https://www.ubakus.de/u-wert-rechner/>, zuletzt aktualisiert am 29.03.2023, zuletzt geprüft am 29.03.2023.

Umweltbundesamt (2020): Dekarbonisierung der Zementindustrie. Hg. v. Umweltbundesamt. Fachgebiet III 2.2, zuletzt geprüft am 20.01.2023.

United Nations Environment Programme (2021): 2021 GLOBAL STATUS REPORT FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION. Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector. Online verfügbar unter [www.globalabc.org](http://www.globalabc.org), zuletzt geprüft am 27.03.2023.

Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hg.) (2008): Zement-Taschenbuch. Verein Deutscher Zementwerke. 51. Aufl. Düsseldorf: Verlag Bau + Technik (Zement-Taschenbuch, 51).

Volhard, Franz (2012): Bauen mit Leichtlehm. Handbuch für das Bauen mit Holz und Lehm. 7th ed. Wien: Ambra Verlag. Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=5117553>.

Volhard, Franz; Röhlen, Ulrich (2009): Lehmbau Regeln. Begriffe - Baustoffe - Bauteile. Unter Mitarbeit von Christof Ziegert. 3. überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Vieweg.

OENORM B 8110-7, 15.03.2013: Wärmeschutz im Hochbau.

DIN 4108-2, Februar 2013: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, zuletzt geprüft am 14.02.2023.

DIN 4108-3, Oktober 2018: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, zuletzt geprüft am 14.02.2023.

Weimann, Karin; Matyschik, Jan; Adam, Christian; Schulz, Tabea; Linß, Elske; Müller, Anette (2013): Optimierung des Rückbaus/Abbaus von Gebäuden zur Rückgewinnung und Aufbereitung von Baustoffen unter Schadstoffentfrachtung (insbes. Sulfat) des RC-Materials sowie ökobilanzieller Vergleich von Primär- und Sekundärrohstoffeinsatz inkl. Wiederverwertung. sowie ökobilanzieller Vergleich von Primär- und Sekundärrohstoffeinsatz inkl. Wiederverwertung. Hg. v. Umweltbundesamt. BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung; Bauhaus-Universität Weimar. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4430.pdf>, zuletzt geprüft am 31.03.2023.

Wetterdienst (2023): Wetterstation Weimar-Schöndorf. Online verfügbar unter [https://www.wetterdienst.de/Deutschlandwetter/Weimar\\_Thueringen/Aktuell/](https://www.wetterdienst.de/Deutschlandwetter/Weimar_Thueringen/Aktuell/), zuletzt aktualisiert am 01.04.2023, zuletzt geprüft am 01.04.2023.

Willems, Wolfgang M.; Schild, Kai (2019): Materialtechnische Grundlagen. Dämmstoffe im Bauwesen. In: Nabil A. Fouad (Hg.): Energieeffizienz Kommentar DIN V 18599. Berlin: Ernst & Sohn (Bauphysik-Kalender, 19. Jahrgang (2019)), S. 45–120. Online verfügbar unter <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epub/10.1002/9783433609842>.

Wolf, Gerrit (2021): E-Mail.

Ziegert, Christof; Röhlen, Ulrich (2014): Lehmbau-Praxis. Planung und Ausführung. 2. Aufl. Berlin: Beuth Verlag GmbH, zuletzt geprüft am 02.11.2022.

Ziegert, Christof; Röhlen, Ulrich (2020): Lehmbau-Praxis. Planung und Ausführung. 2. Aufl. Berlin: Beuth Verlag GmbH, zuletzt geprüft am 02.11.2022.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Baumaterialien in Bezug auf Baugenehmigungen von Wohngebäuden (Neubau) in Deutschland (2021) in Verbindung mit Abfallaufkommen und CO <sub>2</sub> -Fußabdruck von 1m <sup>3</sup> des Baustoffs.	11
Abbildung 2: Kostenentwicklung Dämmstoffe in €/m <sup>2</sup> bei einem U-Wert von 0,20 W/m <sup>2</sup> K	26
Abbildung 3 : Vergleich der Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ von Leichtzuschlägen in W/(mK).	27
Abbildung 4: Vergleich der Umwelteinwirkung von Leichtzuschlägen bezogen auf 1 m <sup>2</sup> Dämmfläche bei einem U-Wert von 0,2 W/(m <sup>2</sup> K).	30
Abbildung 5: Wasserabweisende Wirkung von Leichtzuschlägen.	31
Abbildung 6: Evaluation der Eignung für Lehmtafelbauweise	33
Abbildung 7: Schematische Skizze einschichtiges Bauteil.	36
Abbildung 8: Einschichtiges Bauteil - Tauwasser.	36
Abbildung 9: Mindestbauteilstärke eines monolithischen Bauteils in cm in Abhängigkeit seines Korkgehalts bei einem U-Wert von 0,28 W/(m <sup>2</sup> K).	37
Abbildung 10: Diagramm zur vereinfachten Darstellung des prozentualen Korkanteils in einem einschichtigen Bauteil mit 60 cm Stärke und einem U-Wert von 0,28 W/(m <sup>2</sup> K).	39
Abbildung 11: Mindestwandstärke eines monolithischen Bauteils in Abhängigkeit seines Korkgehalts bei einem U-Wert von 0,20 W/(m <sup>2</sup> K).	40
Abbildung 12: Schematische Skizze zweischichtiges Bauteil.	41
Abbildung 13: Zweischichtiges Bauteil - Tauwasser.	42
Abbildung 14: Mindestwandstärke eines zweischichtigen Bauteils in Abhängigkeit des Korkgehalts der Dämmschicht bei einem U-Wert von 0,28 W/(m <sup>2</sup> K).	43
Abbildung 15: Diagramm zur vereinfachten Darstellung des prozentualen Korkanteils in einem zweischichtigen Bauteil mit 44 cm Stärke und einem U-Wert von 0,28 W/(m <sup>2</sup> K).	44
Abbildung 16: Diagramm zur vereinfachten Darstellung des prozentualen Korkanteils in einem zweischichtigen Bauteil mit 44 cm Stärke, einer Übergangsschicht und einem U-Wert von 0,28 W/(m <sup>2</sup> K).	45
Abbildung 17: Mindestwandstärke eines zweischichtigen Bauteils in Abhängigkeit des Korkgehalts der Dämmschicht bei einem U-Wert von 0,20 W/(m <sup>2</sup> K).	46
Abbildung 18: Diagramm zur vereinfachten Darstellung des prozentualen Korkanteils in einem zweischichtigen Bauteil mit 56 cm Stärke und einem U-Wert von 0,20 W/(m <sup>2</sup> K).	47
Abbildung 19: Diagramm zur vereinfachten Darstellung des prozentualen Korkanteils in einem zweischichtigen Bauteil mit 56 cm Stärke, einer Übergangsschicht und einem U-Wert von 0,20 W/(m <sup>2</sup> K).	48
Abbildung 20: Schematische Skizze dreischichtiges Bauteil.	49
Abbildung 21: Dreischichtiges Bauteil - Tauwasser.	50
Abbildung 22: Mindestwandstärke eines dreischichtigen Bauteils in Abhängigkeit des Korkgehalts der Dämmschicht bei einem U-Wert von 0,28 W/(m <sup>2</sup> K).	51

---

Abbildung 23: Diagramm zur vereinfachten Darstellung des prozentualen Korkanteils in einem dreischichtigen Bauteil mit 51 cm Stärke und einem U-Wert von 0,28 W/(m <sup>2</sup> K).	52
Abbildung 24: Diagramm zur vereinfachten Darstellung des prozentualen Korkanteils in einem zweischichtigen Bauteil mit 51 cm Stärke, einer Übergangsschicht und einem U-Wert von 0,28 W/(m <sup>2</sup> K).	53
Abbildung 25: Mindestwandstärke eines dreischichtigen Bauteils in Abhängigkeit des Korkgehalts der Dämmschicht bei einem U-Wert von 0,20 W/(m <sup>2</sup> K).	54
Abbildung 26: Diagramm zur vereinfachten Darstellung des prozentualen Korkanteils in einem dreischichtigen Bauteil mit 63 cm Stärke und einem U-Wert von 0,20 W/(m <sup>2</sup> K).	55
Abbildung 27: Diagramm zur vereinfachten Darstellung des prozentualen Korkanteils in einem zweischichtigen Bauteil mit 63 cm Stärke, einer Übergangsschicht und einem U-Wert von 0,20 W/(m <sup>2</sup> K).	56
Abbildung 28: Exemplarische Darstellung Flachsgewebe (Gitterelement).	57
Abbildung 29: thermische Simulation eines Lehm-Kork-Gemisches mit 12,6 °C Starttemperatur.	61
Abbildung 30: thermische Simulation eines Lehm-Kork-Gemisches mit -5 °C Starttemperatur.	62
Abbildung 31: Korkgranulat mit einer Korngröße von 1,00 - 2,00 mm.	69
Abbildung 32: Vergleich herkömmliches Geogitter mit Flachs-Hochleistungsgewebe.	69
Abbildung 33: PowerRIBS Hochleistungs-Flachsgewebe der Firma Bcomp.	70
Abbildung 34: Probekörper mit 30 % Korkgehalt.	72
Abbildung 35: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG70K30W4.	73
Abbildung 36: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG70K30W5.	74
Abbildung 37: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG70K30W5S.	74
Abbildung 38: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG70K30W7.5.	75
Abbildung 39: Probekörper mit 40 % Korkgehalt.	76
Abbildung 40: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG60K40W5.	77
Abbildung 41: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG60K40W7.5 und LG60K40W7.5S.	78
Abbildung 42: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG60K40W10.	78
Abbildung 43: Verdichtungswerkzeug mit Stampflehm-Anhaftungen.	80
Abbildung 44: Probekörper mit 50 % Korkgehalt.	80
Abbildung 45: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG50K50W7.5.	81
Abbildung 46: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG50K50W10 und LG50K50W10S.	82
Abbildung 47: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG50K50W12.5.	82
Abbildung 48: Probekörper mit 60 % Korkgehalt.	84
Abbildung 49: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG40K60W10.	85
Abbildung 50: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG40K60W12.5 und LG40K60W12.5S.	85
Abbildung 51: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG40K60W15.	86
Abbildung 52: Druckfestigkeitsprüfung LG30K70W10.	87

---

Abbildung 53: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG30K70W15S.	87
Abbildung 54: Flachsgewebe in Probewürfel (Einlege-Schema).	90
Abbildung 55: Lage des Flachsgewebes im unverdichteten Probekörper.	90
Abbildung 56: Probekörper mit 30 % Korkgehalt.	91
Abbildung 57: Prüfkörper vor- und nach Druckfestigkeitsprüfung.	92
Abbildung 58: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG70K30W5S.	93
Abbildung 59: Probekörper mit 60 % Korkgehalt.	94
Abbildung 60: Prüfkörper bei Druckfestigkeitsprüfung.	95
Abbildung 61: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG40K60W12.5S.	96
Abbildung 62: Probekörper mit 25 % Korkanteil.	98
Abbildung 63: Probekörper bei Druckfestigkeitsprüfung	99
Abbildung 64: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG75K25W4.	99
Abbildung 65: Probekörper nach Druckfestigkeitsprüfung.	101
Abbildung 66: Spannungs-Dehnungsdiagramm LG70K30W5T3.	102
Abbildung 67: Verbundprobekörper mit eingelegtem Flachsgitter	103
Abbildung 68: Verbundprobekörper vor der Prüfung	104
Abbildung 69: Verbundkörper nach der Druckfestigkeitsprüfung.	105
Abbildung 70: Spannungs-Dehnungsdiagramm Verbundprobekörper.	106
Abbildung 71: Probekörper A vor dem Nivellieren.	107
Abbildung 72: Probekörper A nach dem Druckversuch.	109
Abbildung 73: Spannungs-Dehnungsdiagramm weggeregelt.	109
Abbildung 74: Probekörper D vor dem Nivellieren.	110
Abbildung 75: Probekörper D nach dem Druckversuch.	111
Abbildung 76: Spannungs-Dehnungsdiagramm kraftgeregelt.	112
Abbildung 77: Bezeichnung der Probekörper	113
Abbildung 78: Probekörper 7o vor der Druckfestigkeitsprüfung	114
Abbildung 79: Weggeregelter Spannungs-/Verformungsverlauf	116
Abbildung 80: Kraftgeregelter Spannungs-/Verformungsverlauf	118
Abbildung 81: Prüfkörper 1o nach dem Bruch	119
Abbildung 82: Probekörper Biegezugfestigkeit.	124
Abbildung 83: Probekörper kurz nach dem Ausschalen.	126
Abbildung 84: PK3 vor der Belastung.	128
Abbildung 85: PK3 nach der Belastung.	128
Abbildung 86: Schwerpunktlagen des Vollquerschnitts und des ideellen Querschnitts, sowie deren innere Hebelarme.	131

---

---

Abbildung 87: statisches System, 2-Punkt-Lastangriff	132
Abbildung 88: Spannungs- und Dehnungsverteilung im Querschnitt vor der Rissbildung.	133
Abbildung 89: Spannungs- und Dehnungsverteilung im Querschnitt nach der Rissbildung	134
Abbildung 90: Seitenansicht der Lehmprobe nach dem Versuch; rechts: Ansicht derselben Probe von unten.	139
Abbildung 91: Blick in Innere eines Prüfkörpers nach erfolgter Belastung.	139
Abbildung 92: links: Schematische Darstellung der Endverankerung eines Bewehrungsstabes; rechts: Schematische Darstellung eines Durchhanges im Geogitter.	139
Abbildung 93: Schematische Zeichnung des Setzvorgangs.	143
Abbildung 94: Schematische Zeichnung eines Schrägradscheiders.	145
Abbildung 95: Schematische Zeichnung eines Leichtstoffabscheiders.	145
Abbildung 96: Rezyklierprozess Einsumpfen.	146
Abbildung 97: Rezykliertes Korkgranulat.	147
Abbildung 98: geplanter Versuchsaufbau zur Einordnung der Baustoffklasse.	153
Abbildung 99: Versuchsaufbau der Brandversuche vom 08.03.2023.	155
Abbildung 100: Probekörper 1 (1-LG70K30W5ST3) während der Beflammung.	156
Abbildung 101: Verlauf der Abgastemperatur in ° C, gemessen auf einer Höhe t = 1,00 m (t= 0 = Probekörpermitte), PK1.	157
Abbildung 102: Probekörper 2 (2-LG70K30W5ST3) vor und während der Beflammung	158
Abbildung 103: Vergleich der Erwärmung auf der Rückseite mit dem Abkühlverhalten auf der Vorderseite, PK2.	158
Abbildung 104: Probekörper 3 (LG70K30W5ST3) nach der Beflammung.	159
Abbildung 105: Verlauf der Abgastemperatur in ° C, gemessen auf einer Höhe t = 1,00 m (t= 0 = Probekörpermitte) PK3.	160
Abbildung 106: Probekörper 4 (LG40K60W12.5ST1.5) während der Beflammung.	161
Abbildung 107: Vergleich gemessener Temperaturverläufe von PK4.	162
Abbildung 108: Probekörper 5 (LG40K60W12.5ST1.5) während der Beflammung.	163
Abbildung 109: Vergleich gemessener Temperaturverläufe PK5.	163
Abbildung 110: Probekörper 6 (LG40K60W12.5ST1.5) während der Beflammung.	164
Abbildung 111: Vergleich gemessener Temperaturverläufe PK6.	165
Abbildung 112: Verlauf der Abgastemperatur der Probe 1 und der Proben 3 bis 6 in °C.	166
Abbildung 113: Verlauf der Oberflächentemperatur (hinten) der Probe 2 und der Proben 4 bis 6 in °C.	167
Abbildung 114: Verlauf der Oberflächentemperatur (vorne) während der Abkühlphase in °C.	167
Abbildung 115: Vergleich der verkohlten Oberflächen von einem Tragschicht- und einem Dämmschichtwürfel.	168
Abbildung 116: Blick in das Innere der Proben 3 und 6.	169

---

Abbildung 117: Geplanter Versuchsaufbau zur Einordnung der Feuerwiderstandsklasse.	170
Abbildung 118: Versuchsaufbau der Brandversuche am 22.03.2023.	171
Abbildung 119: Lehmtafel 1 nach 30 Minuten Beflammung (links) und während der Beflammung (rechts).	172
Abbildung 120: Temperaturverlauf in °C bei Vorderseitiger Beflammung der Probe 1, gemessen auf der Rückseite des Probekörpers.	173
Abbildung 121: Wandelement 2 während der Beflammung (links) und während der Abkühlphase (rechts).	173
Abbildung 122: Verlauf der Abgastemperatur sowie der Oberflächentemperatur von Probe 2 in °C.	174
Abbildung 123: Lehmtafel 3 während der Beflammung (links) und während der Abkühlphase (rechts).	175
Abbildung 124: Verlauf der Abgastemperatur sowie der Oberflächentemperatur in °C von Probe 3.	175
Abbildung 125: Verlauf der Abgastemperatur für die Lehmtafeln 2 und 3 in °C.	176
Abbildung 126: Verlauf der Oberflächentemperatur (hinten) für die Lehmtafeln 1, 2 und 3 in °C.	177
Abbildung 127: Probe 1 (LG70K30W5ST3) Links vor der Belastung, rechts nach der Belastung.	178
Abbildung 128: Spannungs-/ Dehnungskurve von Probekörper 1 (1-LG70K30W5ST3) nach dem Brandversuch.	179
Abbildung 129: Probe 2 (2-LG70K30W5ST3) Links vor der Belastung, rechts nach der Belastung.	180
Abbildung 130: Spannungs-/ Dehnungskurve von Probekörper 2 (2-LG70K30W5ST3) nach dem Brandversuch.	180
Abbildung 131: Probe 4 (1-LG40K60W12.5ST1.5). Links vor der Belastung, rechts nach der Belastung.	181
Abbildung 132: Spannungs-/ Dehnungskurve von Probekörper 4 (1-LG40K60W12.5ST1.5) nach dem Brandversuch.	182
Abbildung 133: Probe 5 (2-LG40K60W12.5ST1.5). Links vor der Belastung, rechts nach der Belastung.	182
Abbildung 134: Spannungs-/ Dehnungskurve von Probekörper 4 (2-LG40K60W12.5ST1.5) nach dem Brandversuch.	183
Abbildung 135: Lage der Untersuchten Proben in den Lehmtafeln 1,2 und 3.	184
Abbildung 136: Probe 1.2 aus Lehmtafel 1 vor der Belastung (links) und nach der Belastung (rechts).	185
Abbildung 137: Spannungs-/ Dehnungsdiagramm von Probe 1.2 nach dem F30 Feuerwiderstandsversuch.	185
Abbildung 138: Probe 1.5 aus Lehmtafel 1 vor der Belastung (links) und nach der Belastung (rechts).	186
Abbildung 139: Spannungs-/ Dehnungsdiagramm von Probe 1.5 nach dem F30 Feuerwiderstandsversuch.	186
Abbildung 140: Probe 2.2 aus Lehmtafel 2 vor der Belastung (links) und nach der Belastung (rechts).	187
Abbildung 141: Spannungs-/ Dehnungsdiagramm von Probe 2.2 nach dem F60 Feuerwiderstandsversuch.	187
Abbildung 142: Probe 2.5 aus Lehmtafel 2 vor der Belastung (links) und nach der Belastung (rechts).	188

---

Abbildung 143: Spannungs-/ Dehnungsdiagramm von Probe 2.5 nach dem F60 Feuerwiderstandsversuch.	188
Abbildung 144: Probe 3.2 aus Lehmtafel 3 vor der Belastung (links) und nach der Belastung (rechts).	189
Abbildung 145: Spannungs-/ Dehnungsdiagramm von Probe 3.2 nach dem F90 Feuerwiderstandsversuch.	189
Abbildung 146: Probe 3.5 aus Lehmtafel 3 vor der Belastung (links) und nach der Belastung (rechts).	190
Abbildung 147: Spannungs-/ Dehnungsdiagramm von Probe 3.5 nach dem F90 Feuerwiderstandsversuch.	190
Abbildung 148: Vergleich der Spannungs-/ Dehnungskurven aus der Druckfestigkeitsprüfung vom 17.03.2023 nach dem Brandversuch (blau) mit einem Referenzprobekörper (gold) aus einer ähnlichen Mischung aus der Druckfestigkeitsprüfung vom 31.03.2022.	191
Abbildung 149: Vergleich der Spannungs-/ Dehnungskurven aus der Druckfestigkeitsprüfung vom 17.03.2023 nach dem Brandversuch (blau) mit einem Referenzprobekörper (gold) ähnlichen Mischung aus Druckversuchen vom 18.01.2022.	192
Abbildung 150: Zusammenfassung der Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung.	193
Abbildung 151: Probekörper für E-Modulprüfung kurz nach dem Ausschalen.	198
Abbildung 152: Probekörper nach Ausbesserung und Nivellierung.	199
Abbildung 153: Eingefärbte Messfelder für die VideoXtense Aufnahme.	199
Abbildung 154: Belastungs-Zeit Diagramm für Elastizitätsmodulprüfung.	200
Abbildung 155: Dokumentation der Prüfparameter für E-Modul.	201
Abbildung 156: Gegenüberstellung der Dehnungen MX; VX.	203
Abbildung 157: Fixierte Unterseite des Probekörpers.	206
Abbildung 158: Zerlegtes Modell (meshing).	207
Abbildung 159: Richtungsabhängige Verformung des simulierten Probekörpers.	208
Abbildung 160: Maximale Spannung in [MPa].	208
Abbildung 161: Rissbildung am PK D.	209
Abbildung 162: Spannungs-Dehnungsdiagramm ANSYS.	209
Abbildung 163: Spannungs-Dehnungsdiagramm PK A.	210
Abbildung 164: Maximale Dehnung.	210
Abbildung 165: Diagramm zur maximalen Dehnung.	211
Abbildung 166: links: Bruchbild von Betonprüfkörpern im Druckversuch eigene Darstellung 2022 nach Holcim 2022, S. 5; rechts: Bruchbild von zylindrischen Stampflehmprüfkörpern im Druckversuch.	212
Abbildung 167: Einteilung der Dachflächen bei Flachdächern	220
Abbildung 168: Abmessungen Lehmtafelbauweise	233
Abbildung 169: Lage der Falz.	235
Abbildung 170: Variante A - durchgehende Falz.	236
Abbildung 171: Variante B - unterbrochene Falz.	237

---

Abbildung 172: Vertikale Aussparung im Fertigbauteil.	238
Abbildung 173: Fertigteil Lehmtafelbauweise.	238
Abbildung 174: Skalierter Prototyp der LTBw.	242
Abbildung 175: Experimentiertisch.	243
Abbildung 176: Welche Fassadengestaltung sagt Ihnen optisch am meisten zu?	244
Abbildung 177: Welche Anforderungen stellen Sie an Ihren Wohnraum? (Maximal 3)	245
Abbildung 178: Wo hatten Sie schon Kontakt zum Thema Lehmbau?	245
Abbildung 179: Kennen Sie ein Gebäude, das aus Lehm gebaut ist? Falls ja, welche Art von Gebäude?	246
Abbildung 180: Was verbinden Sie mit Lehm als Baustoff?	247
Abbildung 181: Wie alt sind Sie?	247
Abbildung 182: Flächenmäßiger Fassadenbestand in Deutschland nach Fassadensystemen in Prozent (2001).	248
Abbildung 183: Welche Anforderungen stellen Sie an Ihren Wohnraum? (Maximal 3).	249
Abbildung 184: Wo hatten Sie Kontakt zum Lehmbau?	250
Abbildung 185: Kennen Sie ein Gebäude, das aus Lehm gebaut ist? Falls ja, welche Art von Gebäude?	250
Abbildung 186: Was verbinden Sie mit Lehm als Baustoff?	251
Abbildung 187: Baufeld hinter der Belvederer Allee 1a in Weimar.	253
Abbildung 188: Entwurf Clay4study	255
Abbildung 189: Entwurf Spielort I Lernort	255
Abbildung 190: Querschnitt Tischtennisplatte ClayLab	256
Abbildung 191: Perspektivische Darstellung der Forschungswand	257
Abbildung 192: Rückseite der Forschungswand	258
Abbildung 193: Zeitplan Demonstrator.	258
Abbildung 194: Forschungsraum in Tischtennisplatte.	259
Abbildung 195: Tischtennisplatte ClayLab.	260
Abbildung 196: Schalungsplan Forschungswand	261
Abbildung 197: Forschungswand kurz nach der Fertigstellung.	261
Abbildung 198: Forschungswand Erosionsschutz.	262
Abbildung 199: Rhombusschalung der Forschungswand mit Detailschnitt.	263
Abbildung 200: Foto der Forschungswand im Winter 2022.	264
Abbildung 201: Daten der Langzeitmessung im Zeitraum 16.02.2023 bis 28.03.2023.	266
Abbildung 202: Temperaturamplitudendämpfung im Zeitraum vom 16.02.2023 bis 28.03.2023.	269
Abbildung 203: Temperaturamplitudenverhältnis im Zeitraum vom 16.02.2023 bis 28.03.2023.	270
Abbildung 204: Temperaturverlauf im Bereich des 08.03.2023 bis 17.03.2023.	271

---

Abbildung 205: Relative Raumlufffeuchtigkeit im Messraum.	273
Abbildung 206: Schimmelpilz-Kolonien an Tag 10 (09.03.2023).	275

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zeitliche Einordnung der Arbeitspakete	21
Tabelle 2: Vergleich der Wasserdiffusionswiderstände von unterschiedlichen Leichtzuschlägen.	28
Tabelle 3: Übersicht Baustoffklassen nach DIN 4102-1.	29
Tabelle 4: Zusammenfassende Übersicht der Materialeigenschaften von ausgewählten Leichtzuschlägen	32
Tabelle 5: Physikalische Kenngrößen Stampflehm (Claytec).	34
Tabelle 6: Physikalische Kenngrößen Korkgranulat Dämmung.	35
Tabelle 7: Thermische Eigenschaften für ANSYS-Modell.	60
Tabelle 8: Zusammenfassung Wärmedurchgangswiderstand.	63
Tabelle 9: Zulässige Druckspannungen von Bauteilen aus Stampflehm.	65
Tabelle 10: Übersicht Probekörper 100 mm.	72
Tabelle 11: Ergebnisse Druckfestigkeitsprüfung Untersuchungsreihe 1 - 30 % Korkanteil.	73
Tabelle 12: Übersicht Probekörper 100 mm.	75
Tabelle 13: Ergebnisse Druckfestigkeitsprüfung Untersuchungsreihe 1 - 40 % Korkanteil.	77
Tabelle 14: Übersicht Probekörper 100 mm.	79
Tabelle 15: Ergebnisse Druckfestigkeitsprüfung Untersuchungsreihe 1 - 50 % Korkanteil.	81
Tabelle 16: Übersicht Probekörper 100 mm.	83
Tabelle 17: Ergebnisse Druckfestigkeitsprüfung Untersuchungsreihe 1 - 60 % Korkanteil.	84
Tabelle 18: Übersicht Probekörper 100 mm.	86
Tabelle 19: Ergebnisse Druckfestigkeitsprüfung Untersuchungsreihe 1 - 70 % Korkanteil.	87
Tabelle 20: Übersicht Probekörper 200 mm.	91
Tabelle 21: Ergebnisse Druckfestigkeitsprüfung Untersuchungsreihe 2 - 30 % Korkanteil.	92
Tabelle 22: Übersicht Probekörper 200 mm.	94
Tabelle 23: Ergebnisse Druckfestigkeitsprüfung Untersuchungsreihe 2 - 60 % Korkanteil.	95
Tabelle 24: Übersicht Probekörper 100 mm.	97
Tabelle 25: Ergebnisse Druckfestigkeitsprüfung Untersuchungsreihe 3 - 25 % Korkanteil.	98
Tabelle 26: Probekörper LG70K30W5T3.	100
Tabelle 27: Ergebnisse Druckfestigkeitsprüfung Untersuchungsreihe 4 - 30 % Korkanteil.	101
Tabelle 28: Probekörper Verbund.	104
Tabelle 29: Ergebnisse Druckfestigkeitsprüfung Untersuchungsreihe 4 - Verbundkörper.	105
Tabelle 30: Probekörper weggeregelt.	108
Tabelle 31: Ergebnisse Druckfestigkeitsprüfung Untersuchungsreihe 6 - weggeregelt.	108
Tabelle 32: Probekörper kraftgeregelt.	110

---

Tabelle 33: Ergebnisse Druckfestigkeitsprüfung Untersuchungsreihe 6 - kraftgeregelt.	111
Tabelle 34: Ergebnisse der weggeregelten Druckfestigkeitsprüfungen	115
Tabelle 35 Ergebnisse der kraftgeregelten Druckfestigkeitsprüfungen	117
Tabelle 36: Vergleich der Druckfestigkeiten von kraft- und weggeregelten Versuchen.	119
Tabelle 37: Kenngrößen Biegezugfestigkeit.	125
Tabelle 38: Übersicht Probekörper Biegezug.	127
Tabelle 39: Ergebnisse Druckfestigkeitsprüfung Untersuchungsreihe 2 - 30 % Korkanteil.	127
Tabelle 40: Ergebnisse der im Labor ermittelten Bruchkraft in [kN] und der Biegezugfestigkeit in [N/mm <sup>2</sup> ].	136
Tabelle 41: Vergleich der Berechnungen mit ideellen Querschnittswerten, Querschnittswerten des Vollquerschnitts und den Ergebnissen der Laboruntersuchung.	137
Tabelle 42: Ergebnisse aus dem Zugversuch der Flachfasern.	138
Tabelle 43: Baustoffklassen nach DIN 4102-1.	148
Tabelle 44: Zusammenstellung des Brandverhaltens verschiedener Lehmbaustoffe nach DIN und Forschungsergebnissen.	149
Tabelle 45: Feuerwiderstandsklassen nach DIN 4102-2.	149
Tabelle 46: Übersicht zu Feuerwiderstandsklassen von Wänden aus Lehmbaustoffen.	150
Tabelle 47: Rezeptur der verwendeten Mischungen für die Probekörper.	151
Tabelle 48: Übersicht zu den Eigenschaften der untersuchten Probekörper.	153
Tabelle 49: Zusammenfassung der Messungen und Beobachtungen.	169
Tabelle 50: Übersicht zu den Eigenschaften der untersuchten Lehmtafeln.	170
Tabelle 51: Zusammenfassung der Messungen und Beobachtungen.	177
Tabelle 52: Übersicht zu den Eigenschaften der untersuchten Proben sowie der Referenzprobekörper.	179
Tabelle 53: Zusammenfassung der Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung nach dem Brandversuch.	183
Tabelle 54: Eigenschaften der Probekörper aus den Lehmtafeln.	184
Tabelle 55: Übersicht zu Gewicht, max. Druckkraft, Druckfestigkeit und Größe der Prüffläche der untersuchten Probekörper sowie der Referenzproben.	192
Tabelle 56: Zusammenfassung der Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung nach dem Brandversuch.	194
Tabelle 57: Ergebnisse der E-Modulprüfung LG70K30W3.5T3.	202
Tabelle 58: Ergebnisse der E-Modulprüfung LG40K60W10T0.01.	204
Tabelle 59: Materialeigenschaften LG70K30W5S als Parameter für Simulation.	206
Tabelle 60: Reaktionsgleichungen der Klinkerphasen beim Abbinden von Portlandzement, sowie die Reaktionsgleichung beim Trocknen von Lehm	213
Tabelle 61: Übersicht zu Gemeinsamkeiten und Unterschieden zwischen Stampflehm und Beton.	213
Tabelle 62: Schneelastzonen nach Gebieten/Städten und zugehörige Werte für Schneelast.	221

---

Tabelle 63: Inhalte der Untersuchungs- und Themengebiete.	239
Tabelle 64: Übersicht der verwendeten Methoden.	240
Tabelle 65: Ermittelte U-Werte	267
Tabelle 66: Wärmetechnische Einordnung der LTBw.	272
Tabelle 67: Dokumentation und Auswertung der Schimmelpilzkolonien im Demonstrator.	274

## Bildnachweis

Titelbild: (Daube)

Daube: 70, 90, 98, 101, 103, 104, 124, 128, 128, 139, 139, 158, 159, 164, 172, 242, 243, 260, 261, 264, 275

Munnes: 156, 161, 163, 164

Plattner: 99, 105, 107, 109, 110, 111, 114, 119, 126, 198, 199, 199, 209

Schlegel: 69, 72, 76, 80, 80, 84, 87, 91, 92, 94, 95, 146, 147

Zauke: 155, 156, 158, 161, 168, 169, 171, 172, 173, 175, 178, 180, 181, 182, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 263

ClayLab: 253, 259, 262

## Anlagen

■ Anlage 1: Prüfprotokoll vom 25.11.2021	303
■ Anlage 2: Prüfprotokoll vom 18.01.2022	305
■ Anlage 3: Prüfprotokoll vom 04.03.2022	306
■ Anlage 4: Prüfprotokoll vom 31.03.2022	307
■ Anlage 5: Prüfprotokoll D70 vom 28.07.2022	308
■ Anlage 6: Prüfprotokoll W150 28.07.2022	332
■ Anlage 7: Prüfprotokoll vom 02.12.2022	340
■ Anlage 8: Prüfprotokoll vom 02.12.2022	347
■ Anlage 9: Prüfprotokoll vom 17.03.2023	353
■ Anlage 10: Prüfprotokoll vom 30.03.2023	354
■ Anlage 11: Prüfprotokoll vom 21.04.2022	355
■ Anlage 12: Daube und Bieganski 2022	356



**Statistik:**

Serie n = 18	Proben-Nr.	F <sub>c</sub> N	R <sub>c</sub> N/mm <sup>2</sup>	a <sub>0</sub> mm	b <sub>0</sub> mm
x	10	11797,7	1,2	100,3	99,94
s	5	4332,8	0,4	0,7156	0,6022
v	56,20	36,73	36,86	0,71	0,60





Anlage 4: Prüfprotokoll vom 31.03.

Zwick / Roell

31.03.22

### Prüfprotokoll

Kunde : Herstellung :  
 Auftrags-Nr. : Lagerung : 20/65  
 Prüfnorm : DIN EN 196-1 Alter der Prüfkörper :  
 Art und Bezeichnung : Bemerkung :  
 Prüfer : Maschinendaten :  
 Masseanteile :

Vorkraft : 250 N  
 Prüfungsgeschwindigkeit : 400 N/s

#### Prüfergebnisse:

Nr	Proben-Nr.	Probenbezeichnung	F <sub>c</sub> N	R <sub>c</sub> N/mm <sup>2</sup>	a <sub>0</sub> mm	b <sub>0</sub> mm
1	1	LG70K30W5T0,06	22715,1	2,3	101,2	99,47
2	2	Verbundwürfel	23674,9	2,4	100	100

#### Seriengrafik:

The graph shows two stress-strain curves. The x-axis is 'Verformung in %' (0 to 6) and the y-axis is 'Spannung in N/mm²' (0.0 to 2.0). The green curve (sample 1) shows a higher yield strength and ultimate strength compared to the red curve (sample 2). Both curves show a typical stress-strain behavior with an initial elastic region, a yield point, and a strain hardening region.

#### Statistik:

Serie n = 2	Proben-Nr.	F <sub>c</sub> N	R <sub>c</sub> N/mm <sup>2</sup>	a <sub>0</sub> mm	b <sub>0</sub> mm
x	2	23195,0	2,3	100,6	99,74
s	1	678,7	0,1	0,8485	0,3748
v	47,14	2,93	3,39	0,84	0,38

Anlage 5: Prüfprotokoll D70 vom 28.07.

Zwick / Roell

Druckdatum: 28.07.22

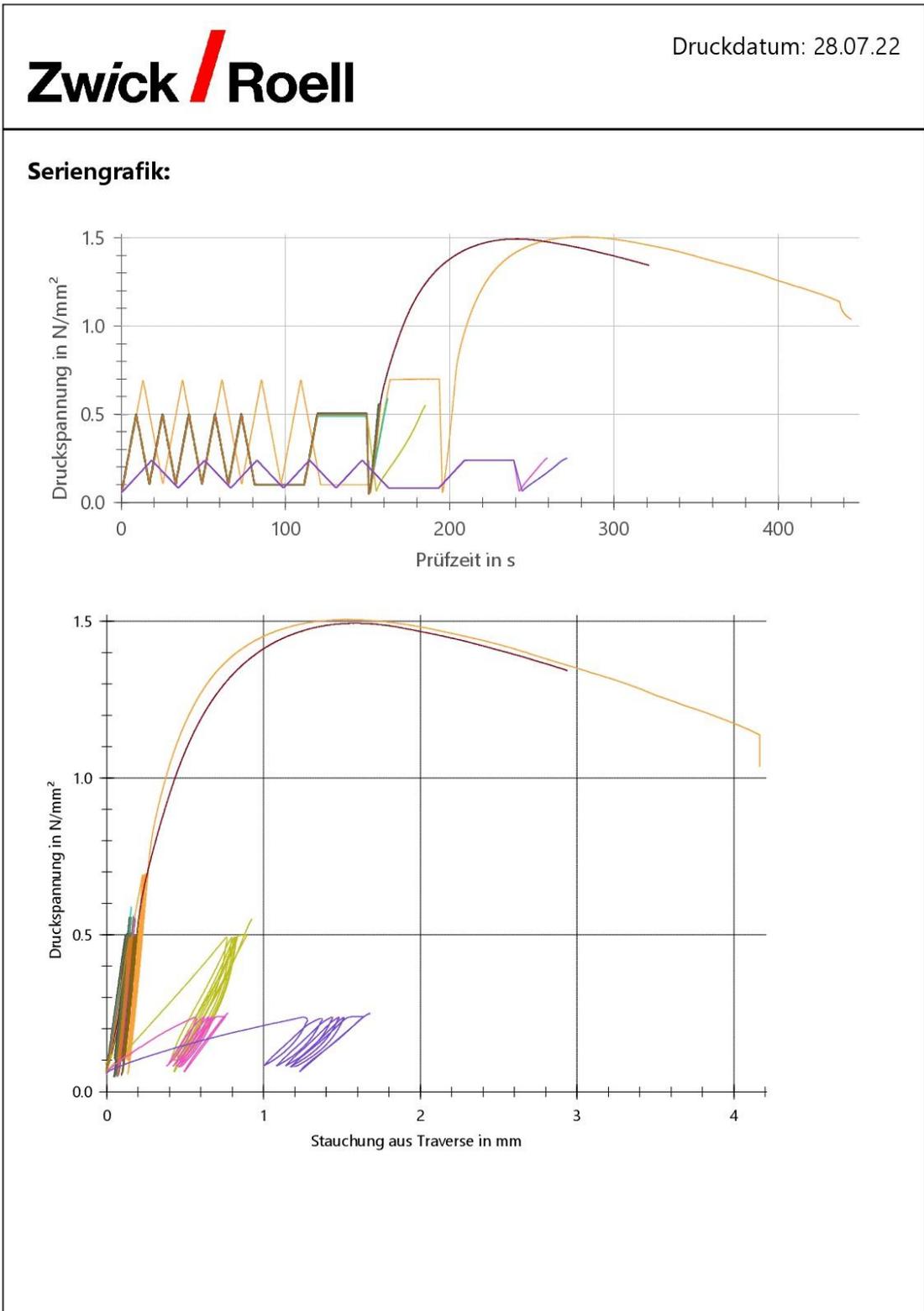
  

### Prüfprotokoll

Kunde : UNI Frau Daube  
 Auftrags-Nr. :  
 Prüfnorm : i.A.a. DIN 1048-5  
 Baustelle :  
 Art und Bezeichnung : Stampflehm Tragschicht o GeoGitter  
 Werkstoff : Korklehm  
 Probentyp : Zylinder D70  
 Herstelldatum : 10.06.2022  
 Probenentnahme :  
 Vorbehandlung : LEF abgeglichen  
 Angestrebte Eigenschaften :  
 Probendimensionen :  
 Rohdichte :  
 Prüfer : MKr  
 Bemerkung :  
 Maschinendaten : runde Druckplatte; VX L0=122,5mm; MX L0=130mm  
 Vorkraft : 250 N  
 Geschwindigkeit bis Prüfungsende : 1 mm/min

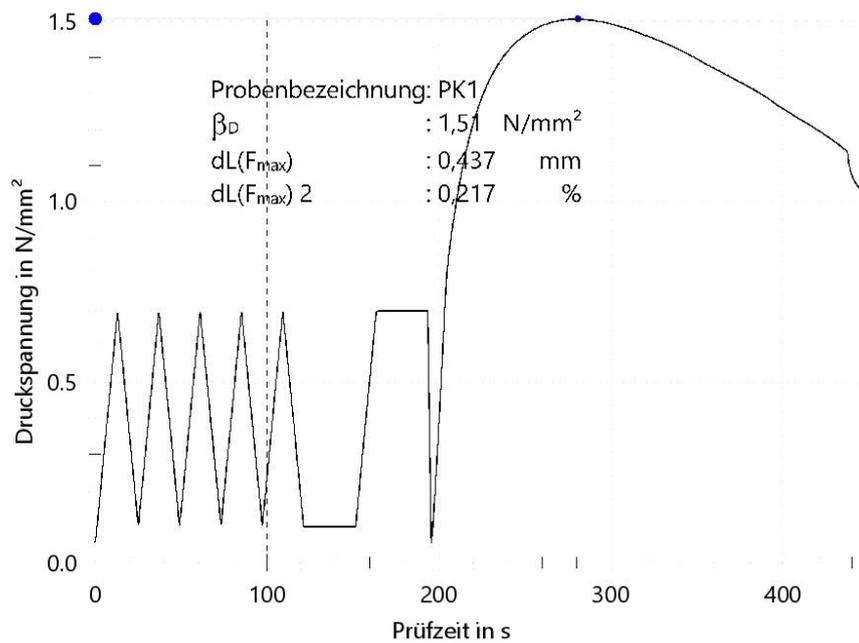
### Prüfergebnisse:

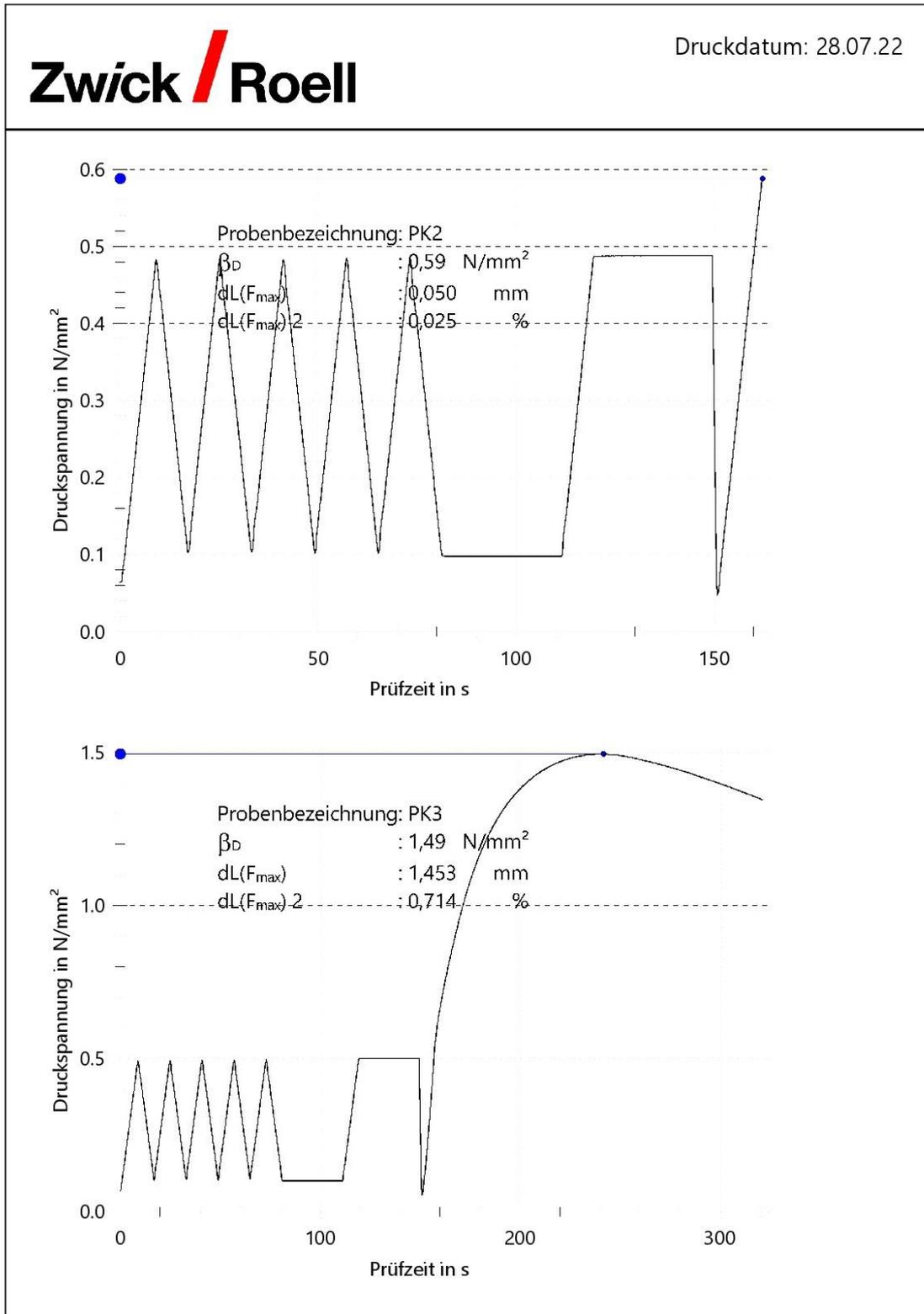
Legende	Probenbezeichnung	d <sub>0</sub> mm	L <sub>c</sub> mm	L <sub>0</sub> SW mm	L <sub>e</sub> Fein mm	F <sub>max</sub> N	β <sub>D</sub> N/mm <sup>2</sup>	dL(F <sub>max</sub> ) mm	dL(F <sub>max</sub> ) <sup>2</sup> %
	PK1	69,7	201,3	130	122,2	5750	1,51	0,437	0,217
	PK2	70,45	199,2	130	122,4	2290	0,59	0,050	0,025
	PK3	70	203,4	130	122,4	5750	1,49	1,453	0,714
	PK3 Wdh	70	202,2	130	122,4	2120	0,55	0,985	0,487
	PK4	70,5	203,1	130	122,4	2150	0,55	0,055	0,027
	PK5	70,3	196,5	130	122,4	2140	0,55	0,077	0,039
	PK6	69,7	198,6	130	122,4	2140	0,56	0,056	0,028
	PK7	70	197,0	130	122,4	2140	0,56	0,091	0,046
	PK8	70	198,0	130	122,4	2140	0,56	0,059	0,030
	PK9	70,05	202,7	130	122,4	253	0,07	0,000	0,000
	PK9 Wdh	70,05	202,7	130	122,4	2140	0,56	0,054	0,027
	PK10	70,5	194,6	130	122,4	2140	0,55	0,098	0,051
	PKI	70	206,0	130	122,4	962	0,25	0,484	0,235
	PKII	70	204,1	130	122,4	961	0,25	1,377	0,675

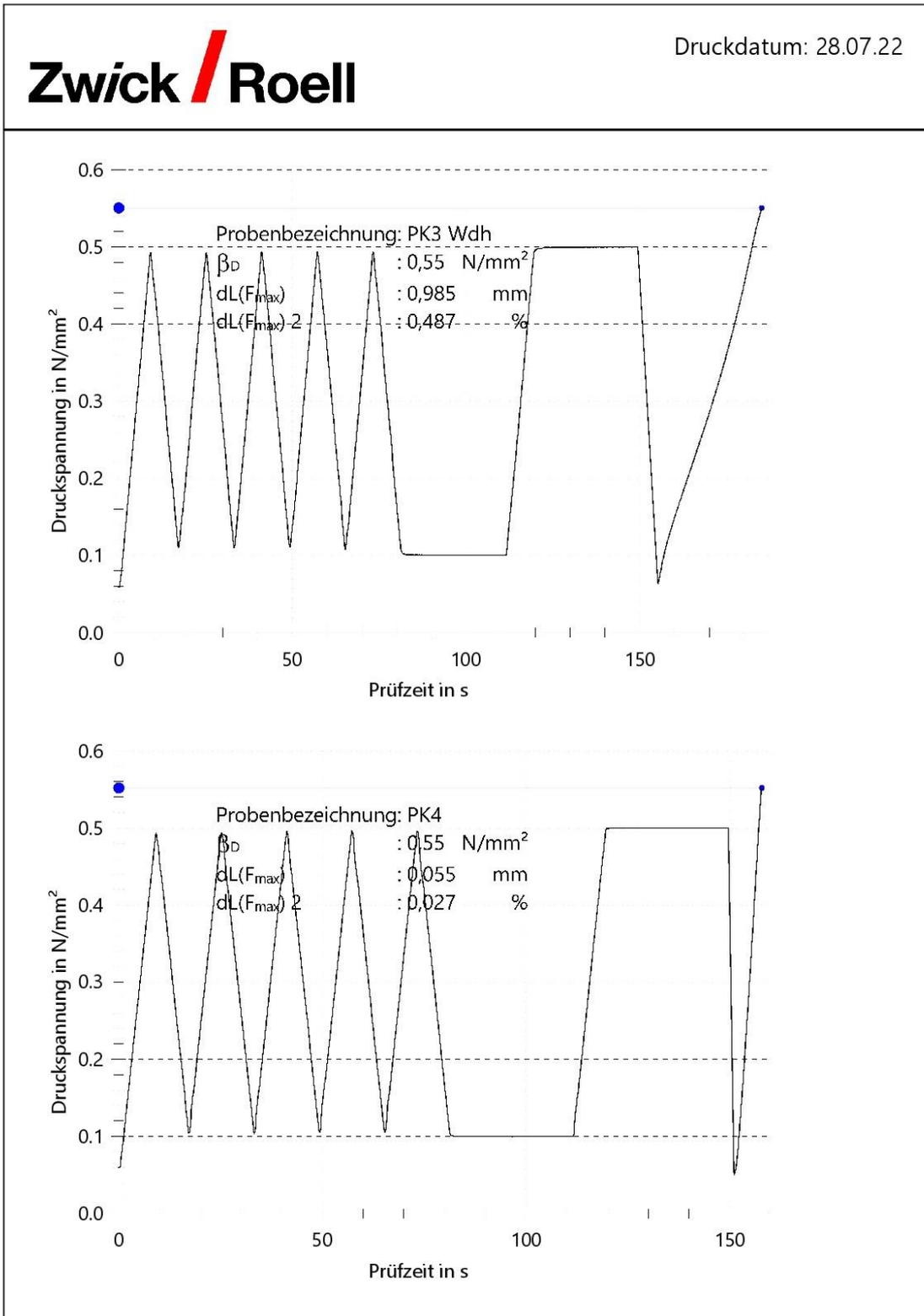


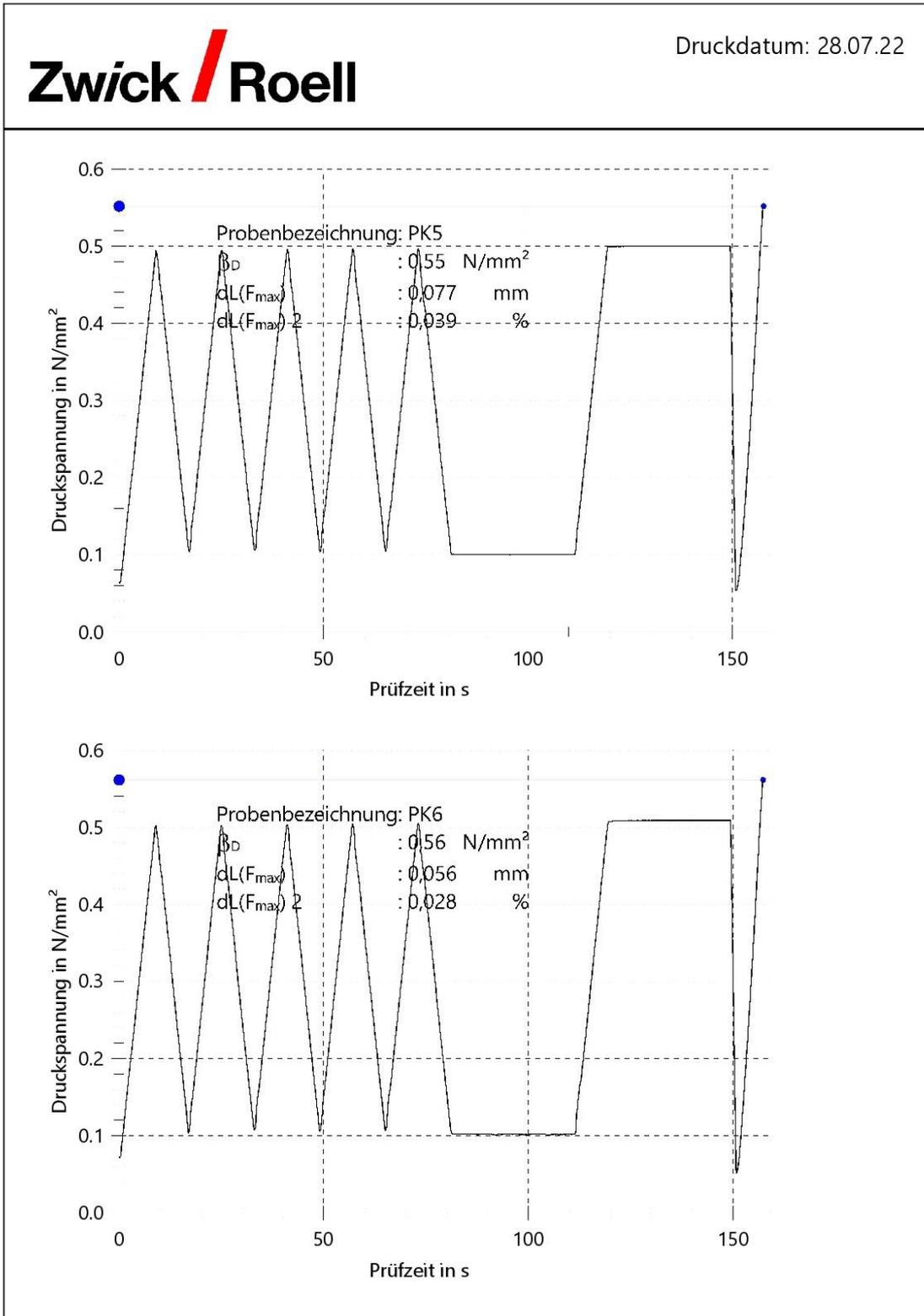
## Statistik:

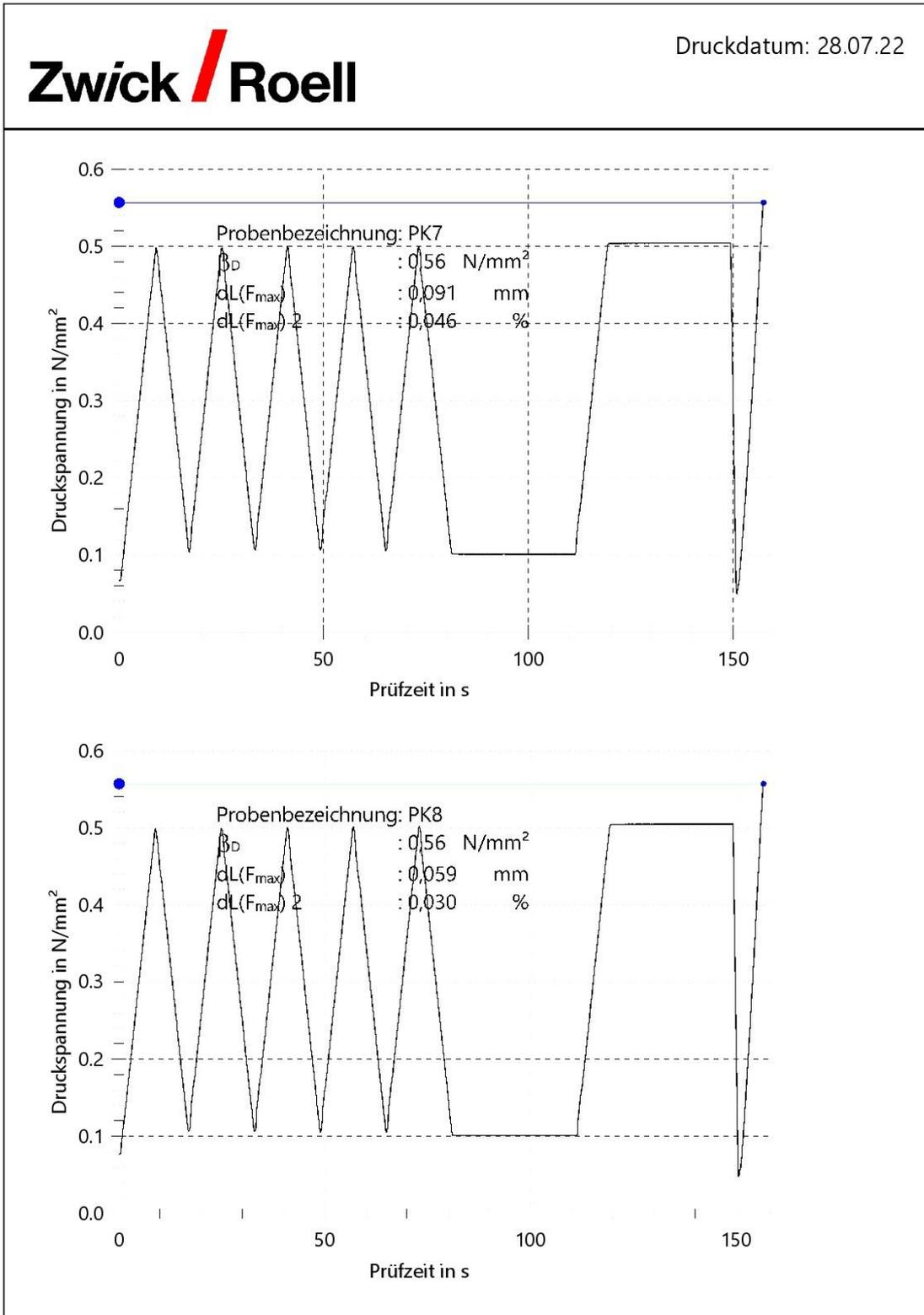
Serie	$\beta_D$	dL(F <sub>max</sub> )	dL(F <sub>max</sub> ) 2	L <sub>c</sub>
n = 14	N/mm <sup>2</sup>	mm	%	mm
$\bar{x}$	0,61	0,377	0,186	200,7
s	0,41	0,515	0,253	3,4
v [%]	66,58	-	-	1,67

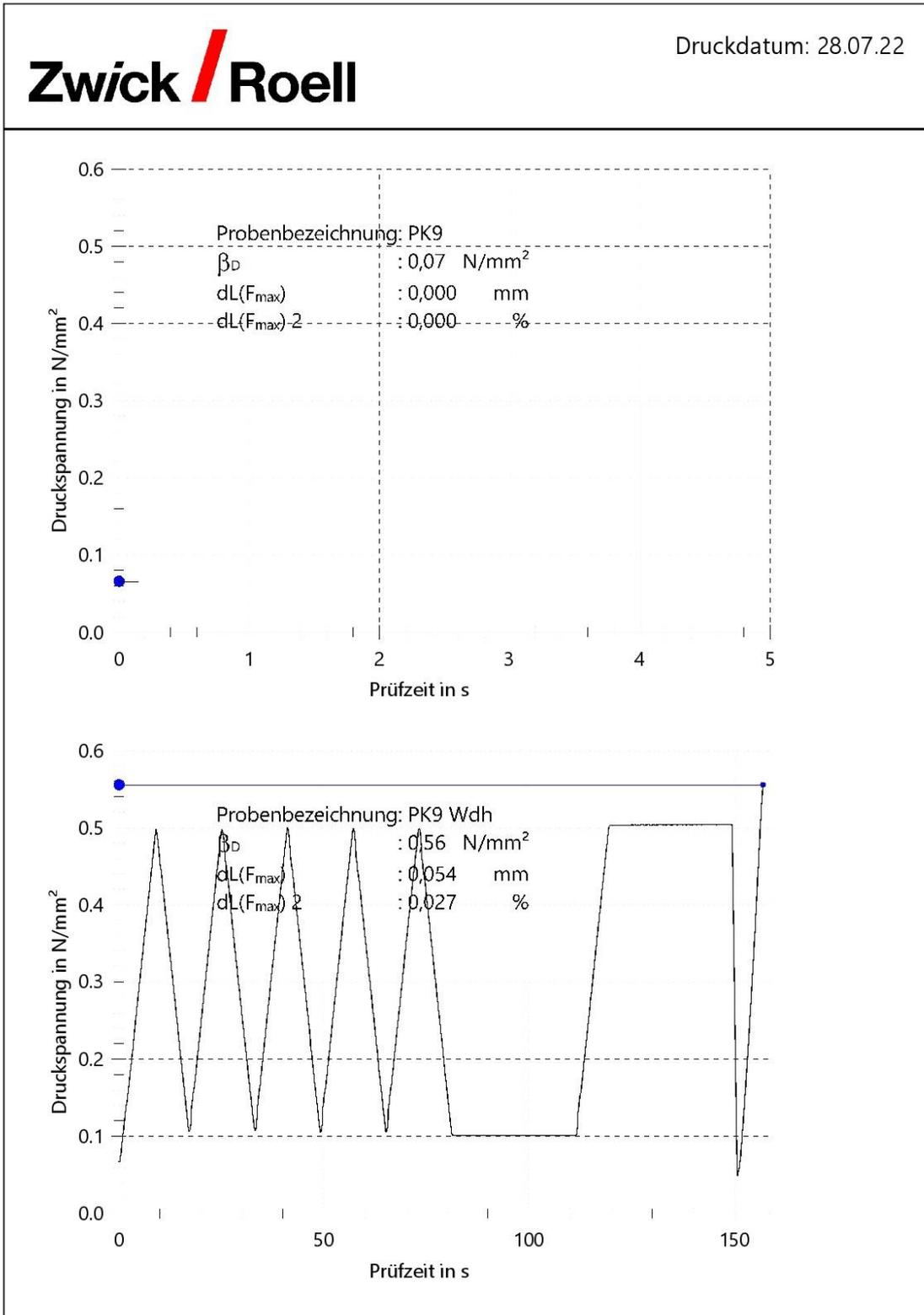


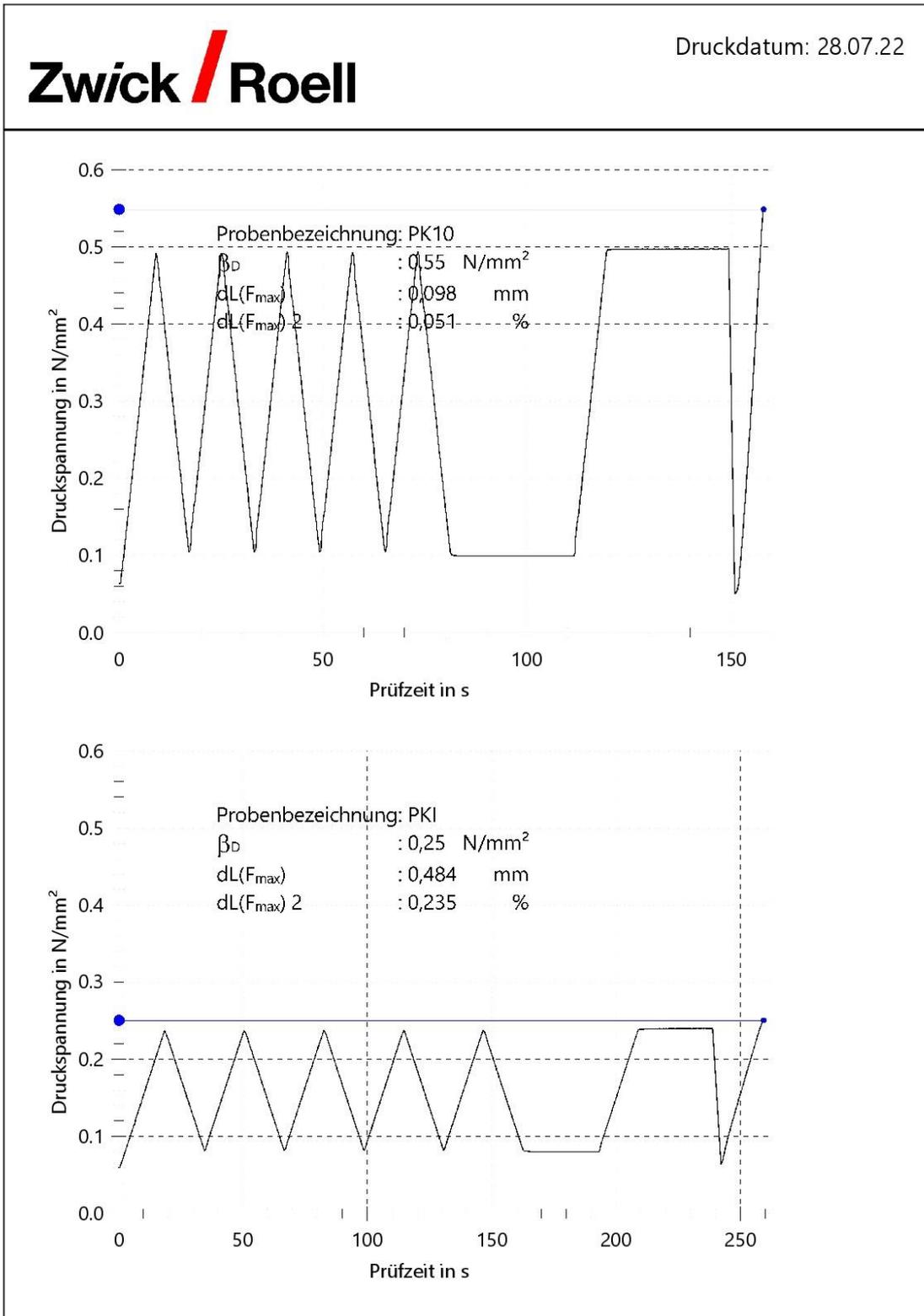


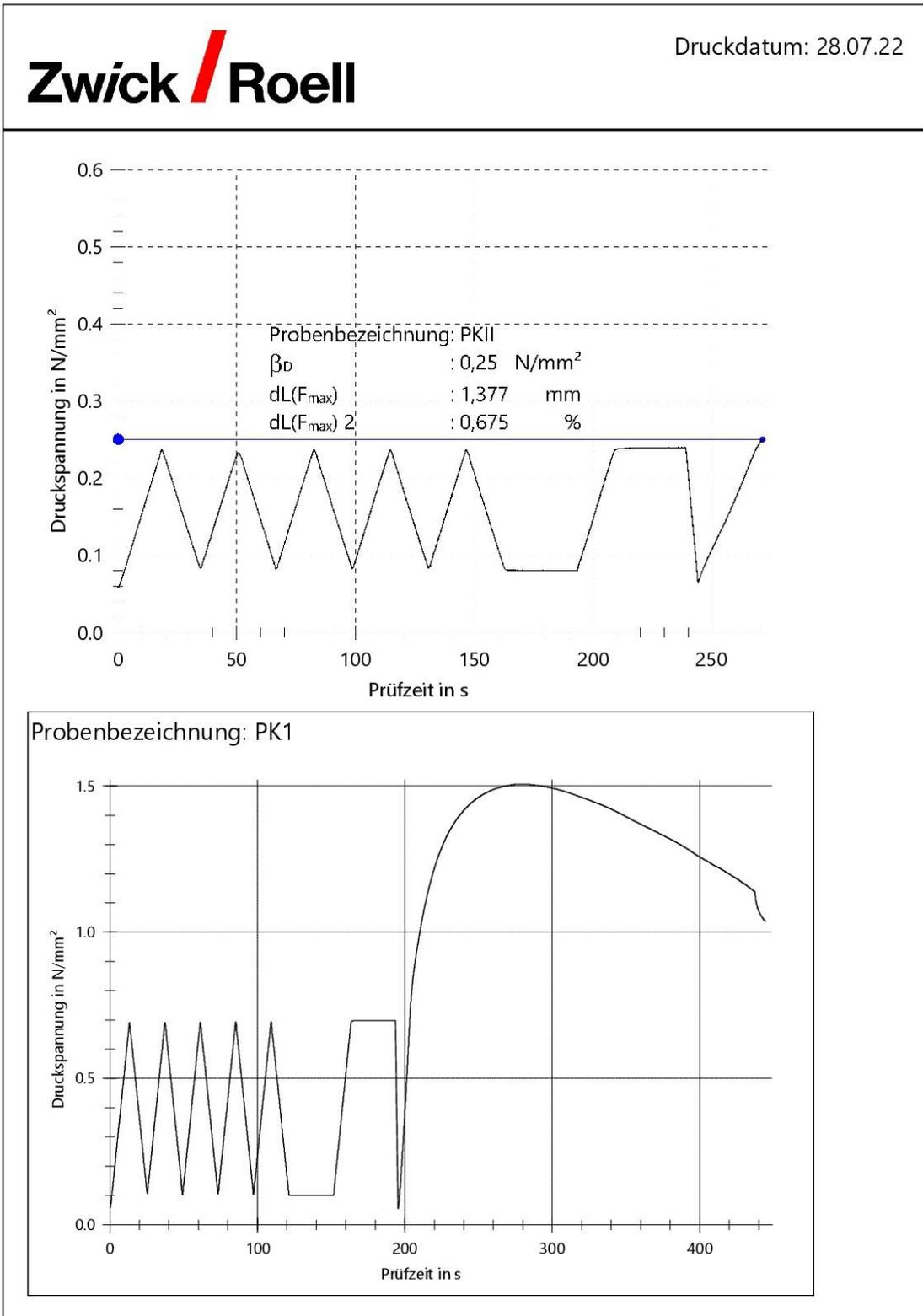


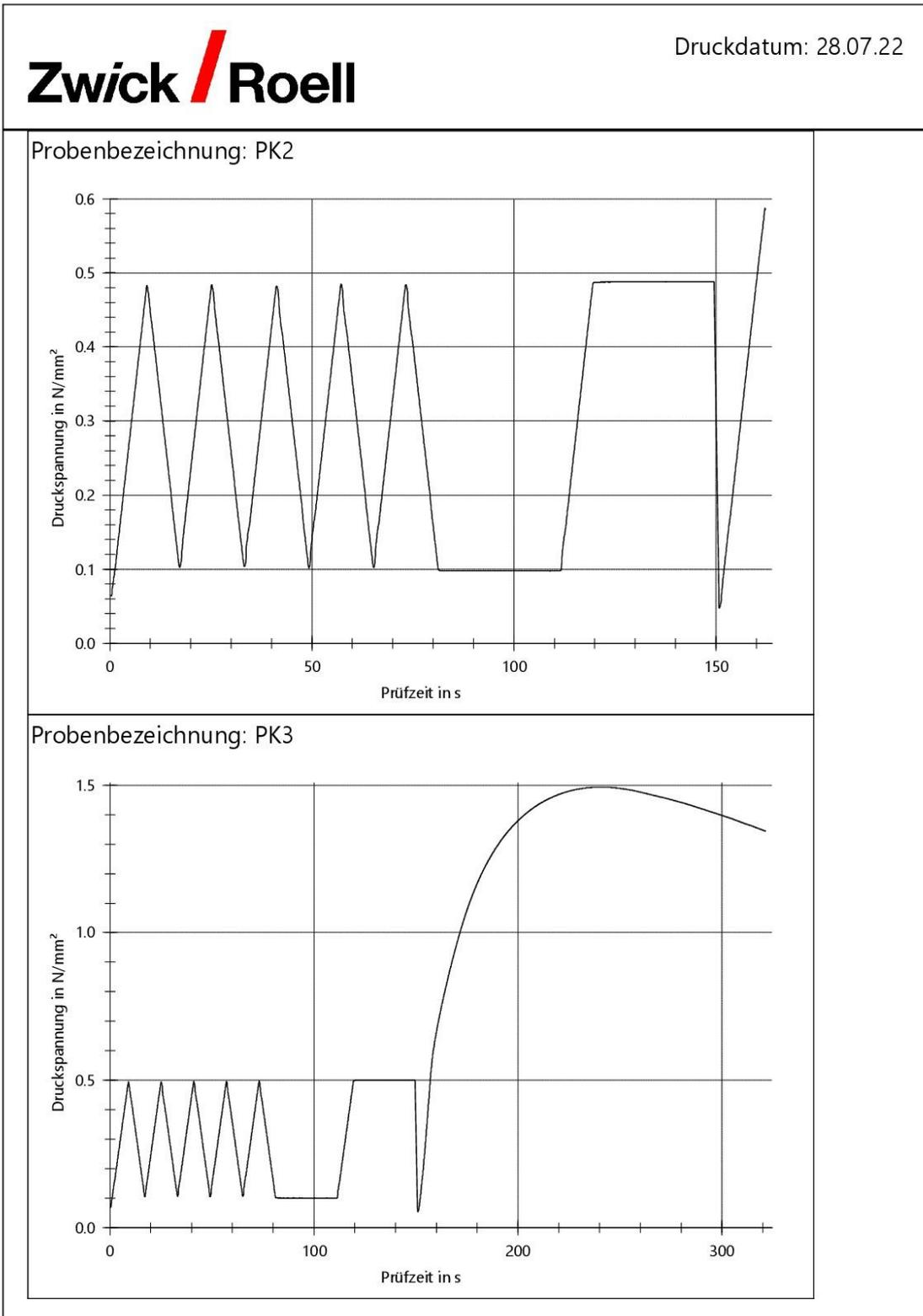


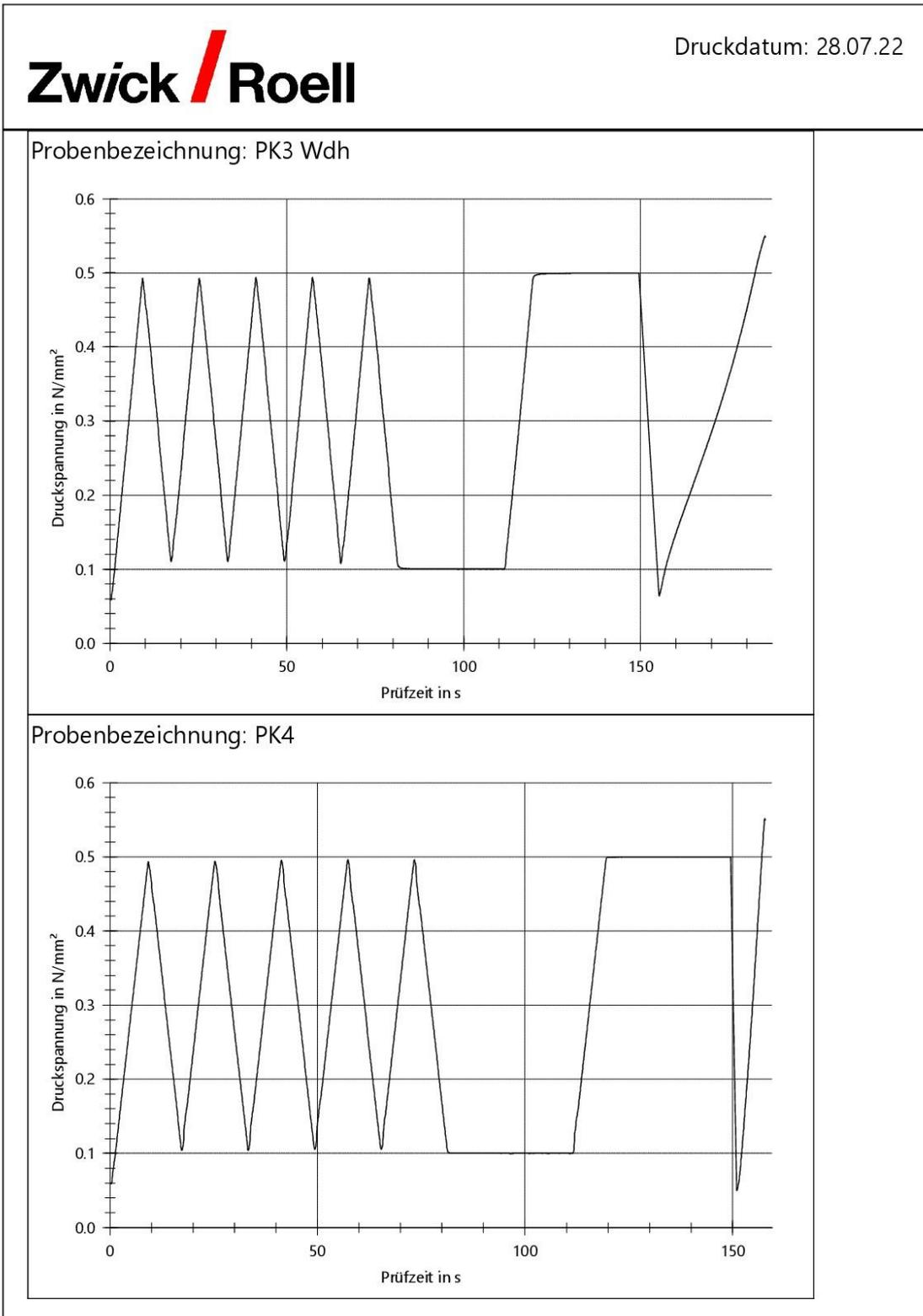




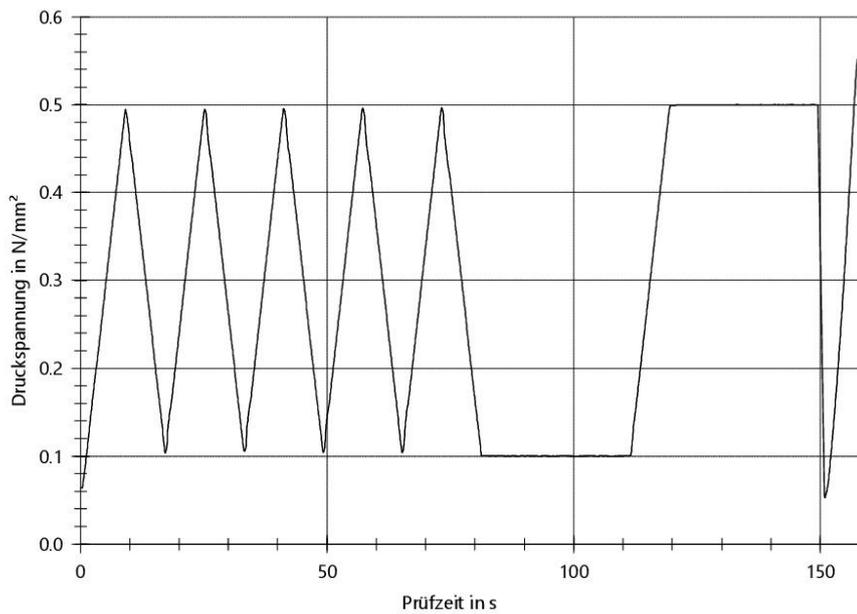




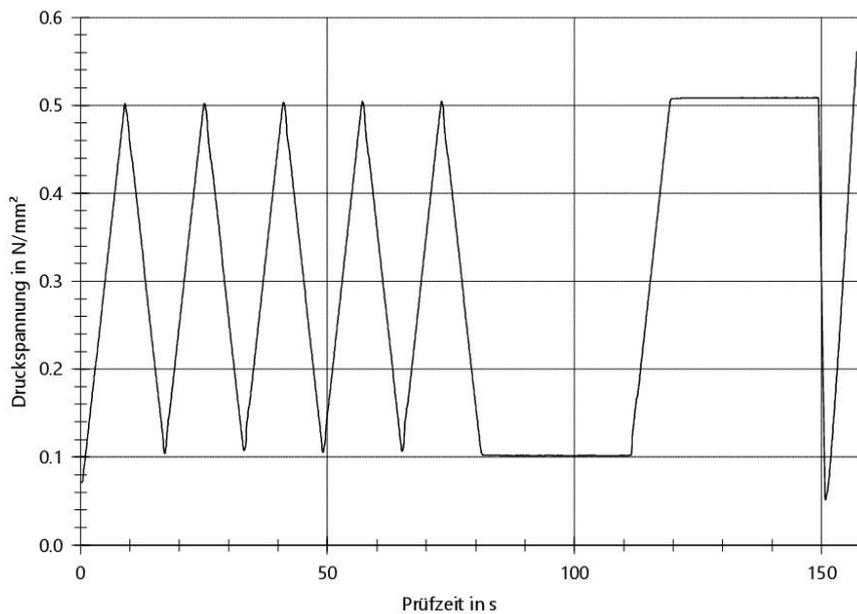


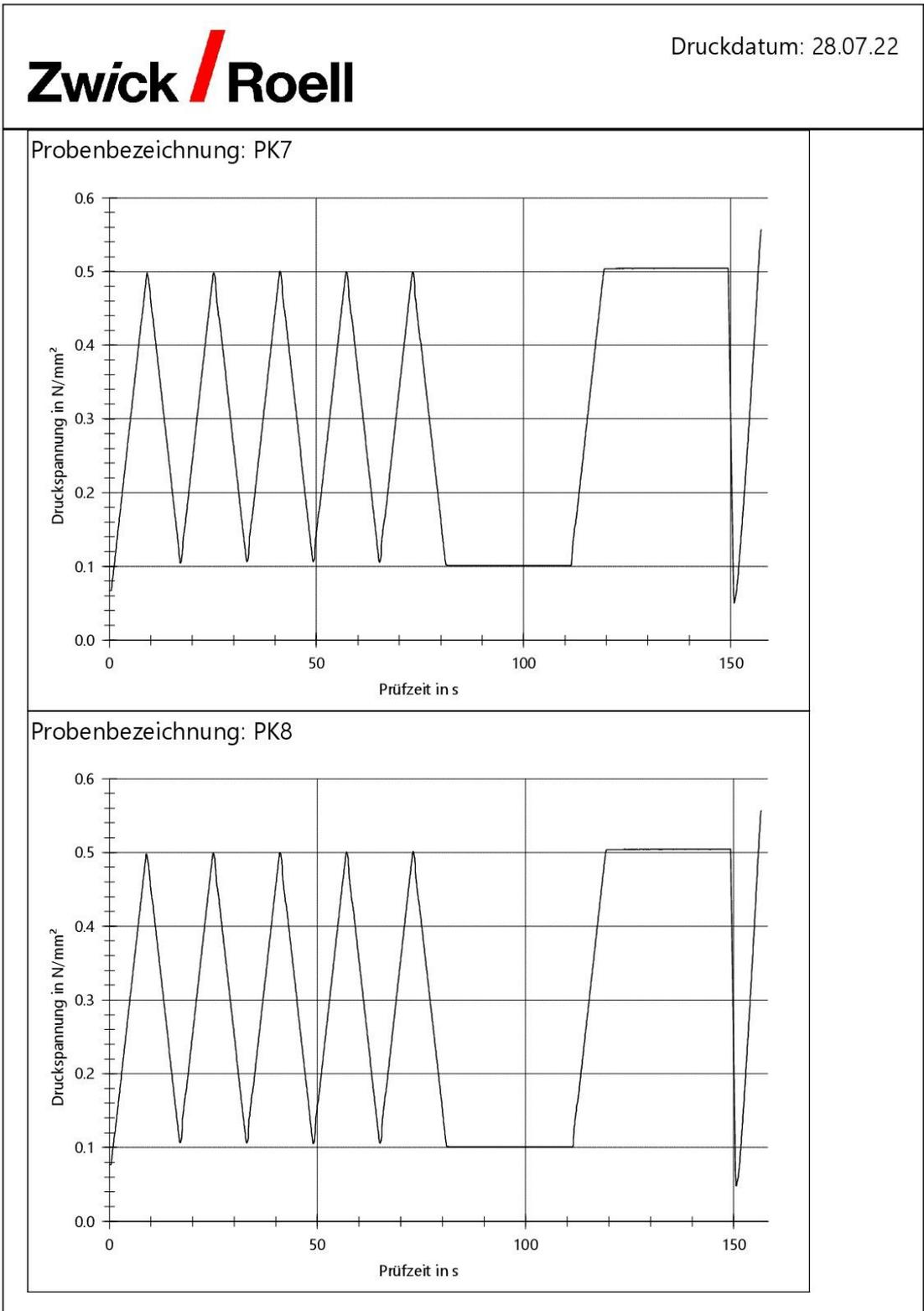


Probenbezeichnung: PK5

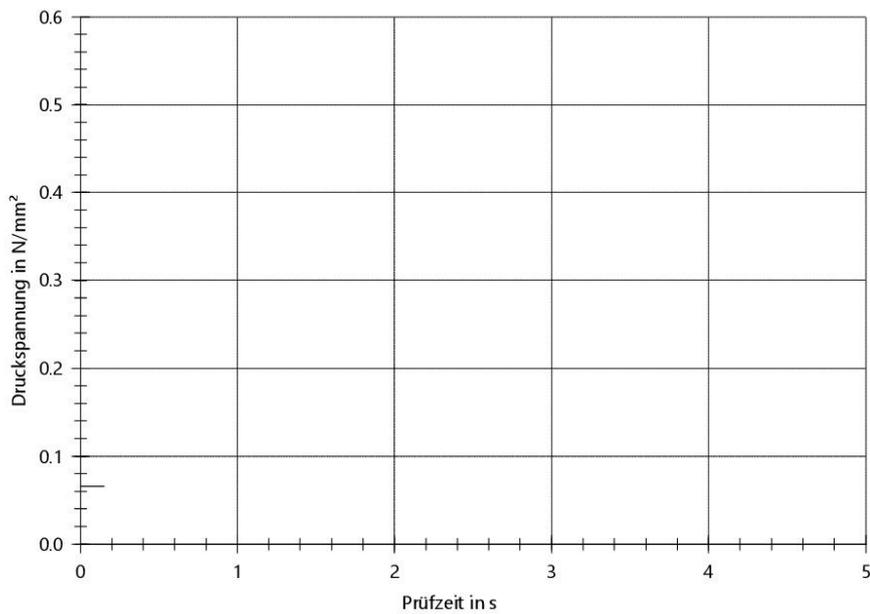


Probenbezeichnung: PK6

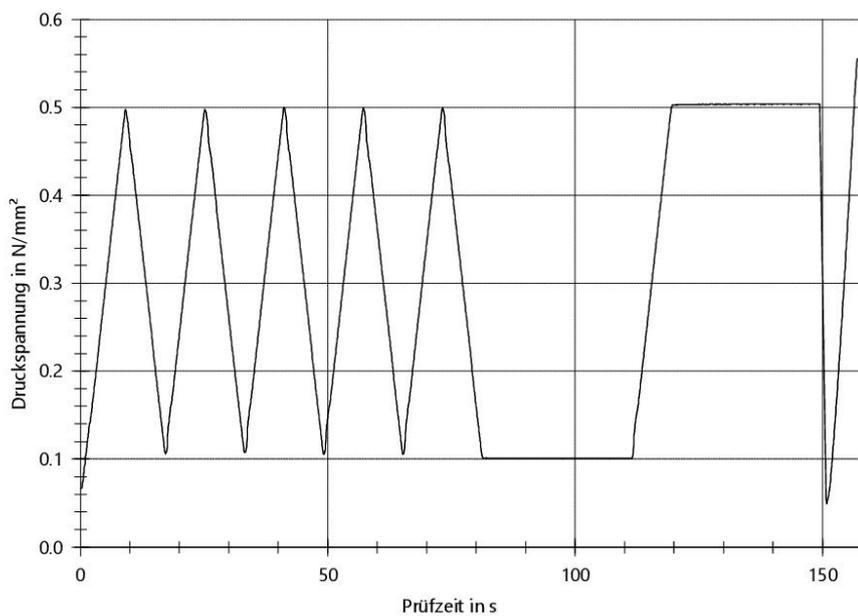


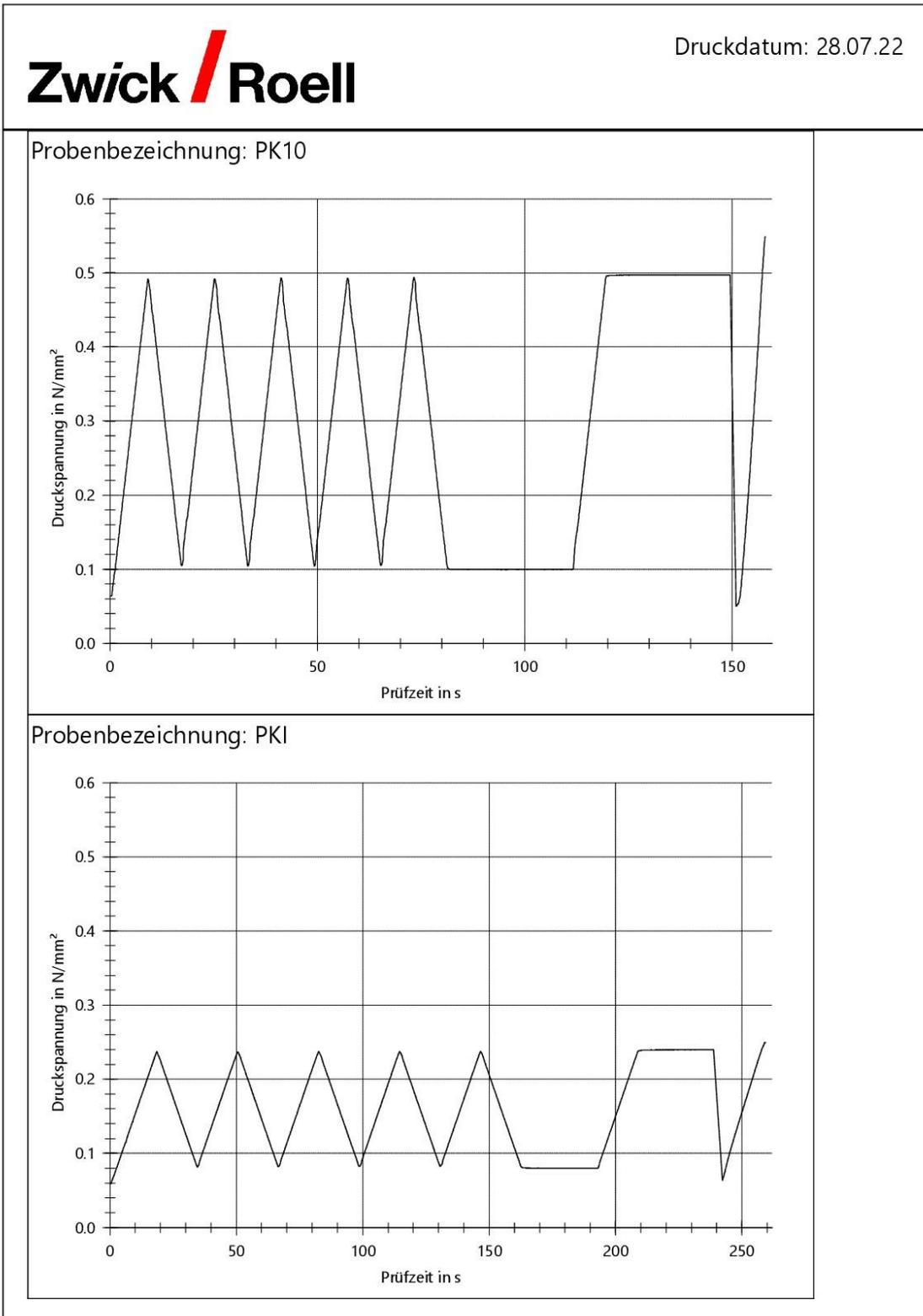


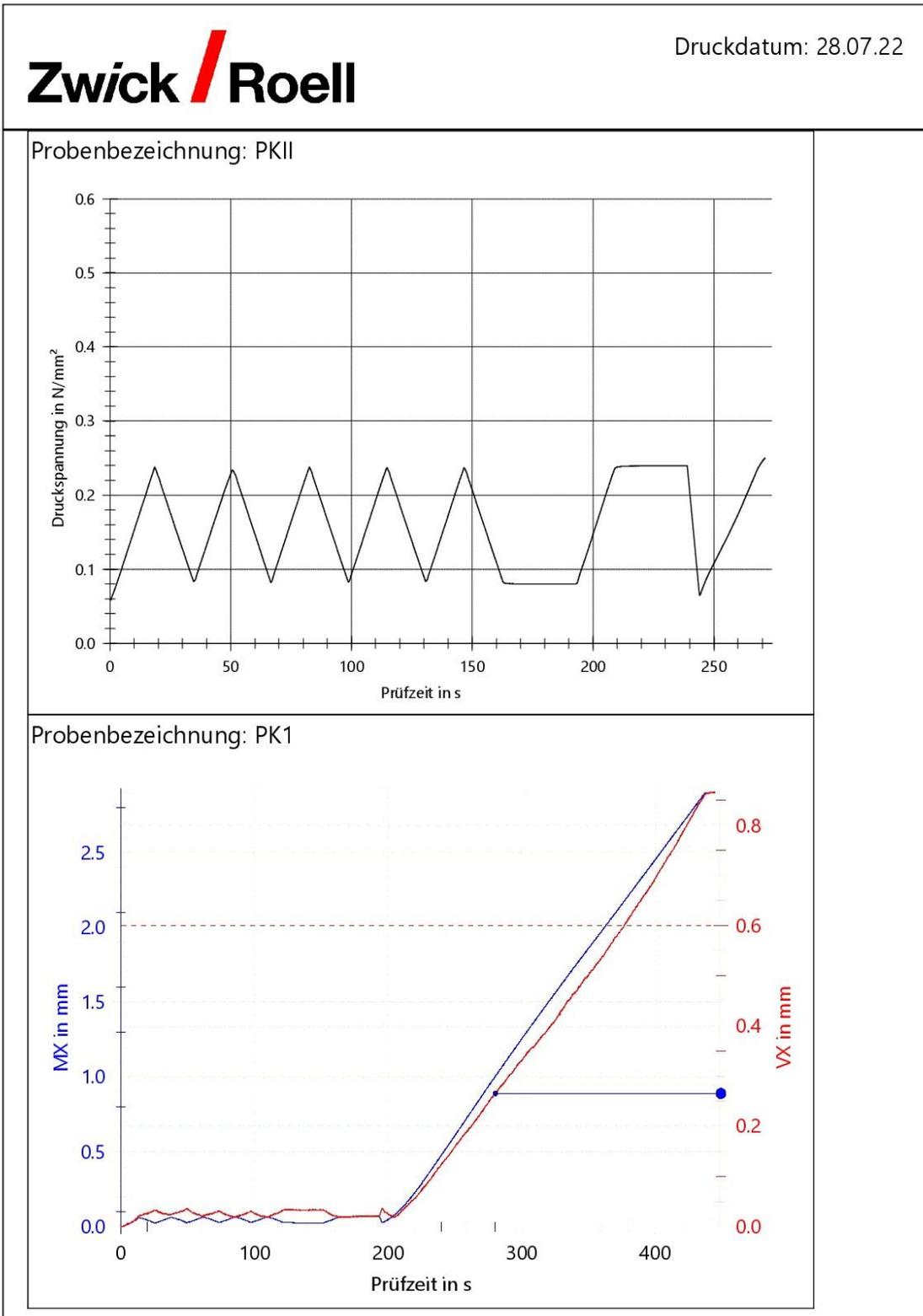
Probenbezeichnung: PK9



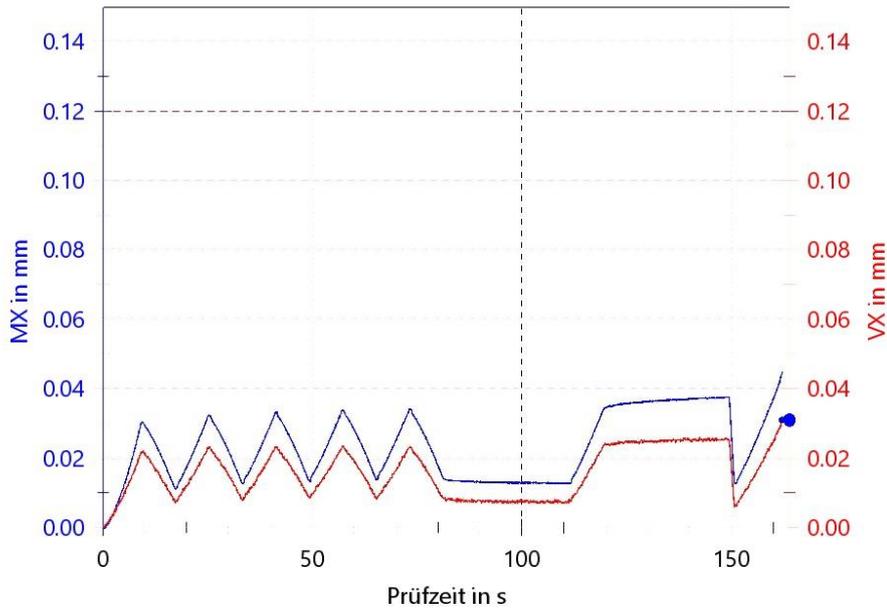
Probenbezeichnung: PK9 Wdh



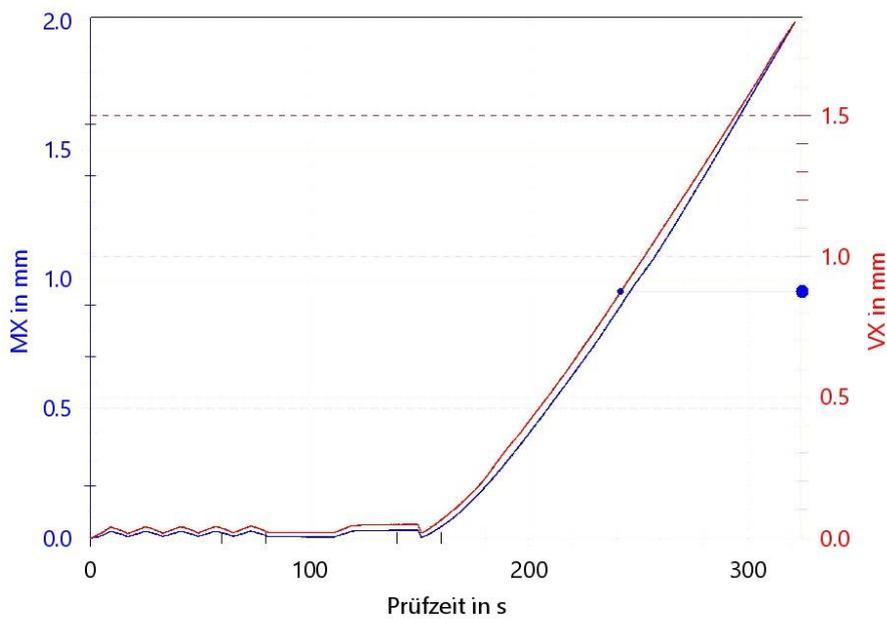


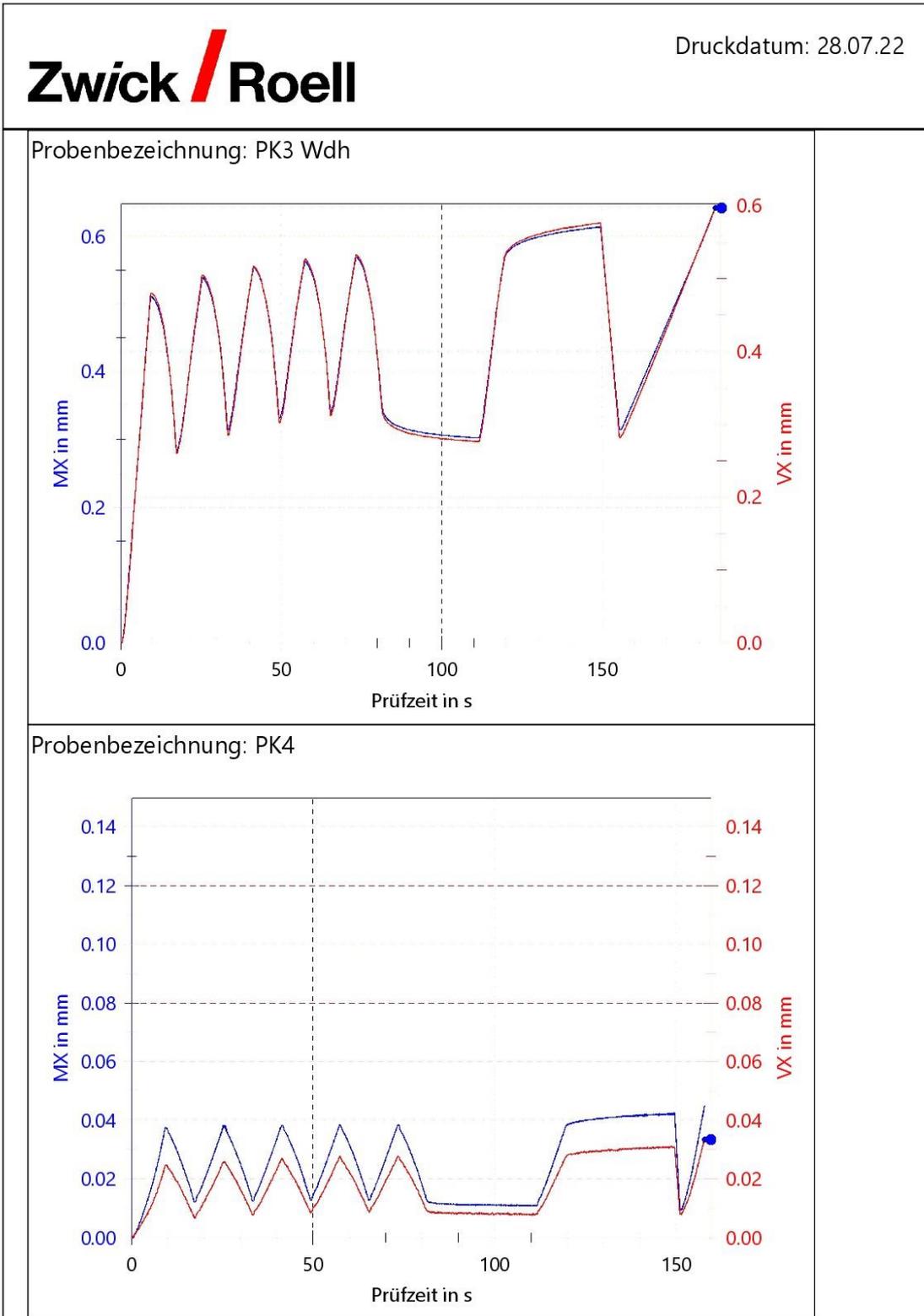


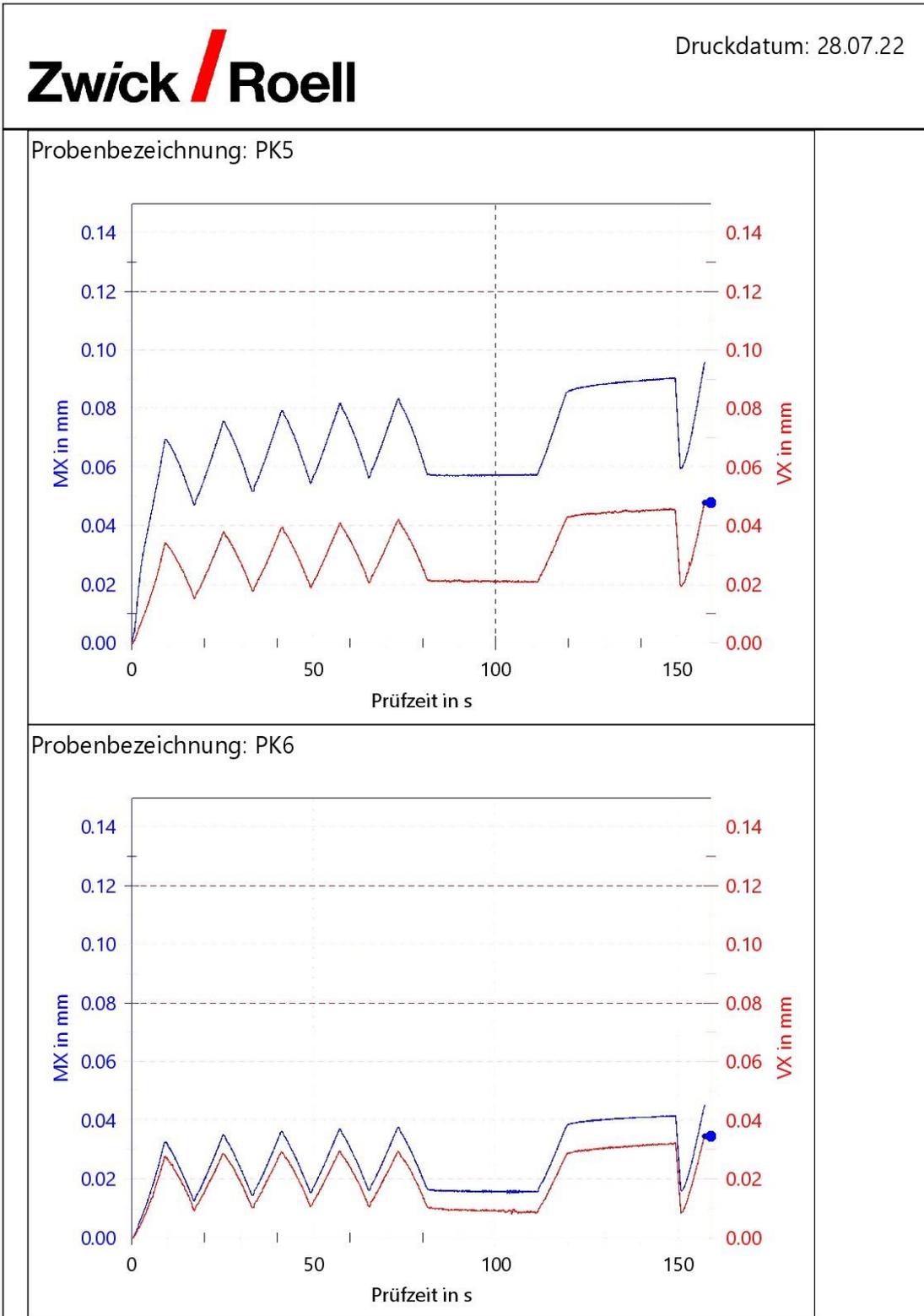
Probenbezeichnung: PK2

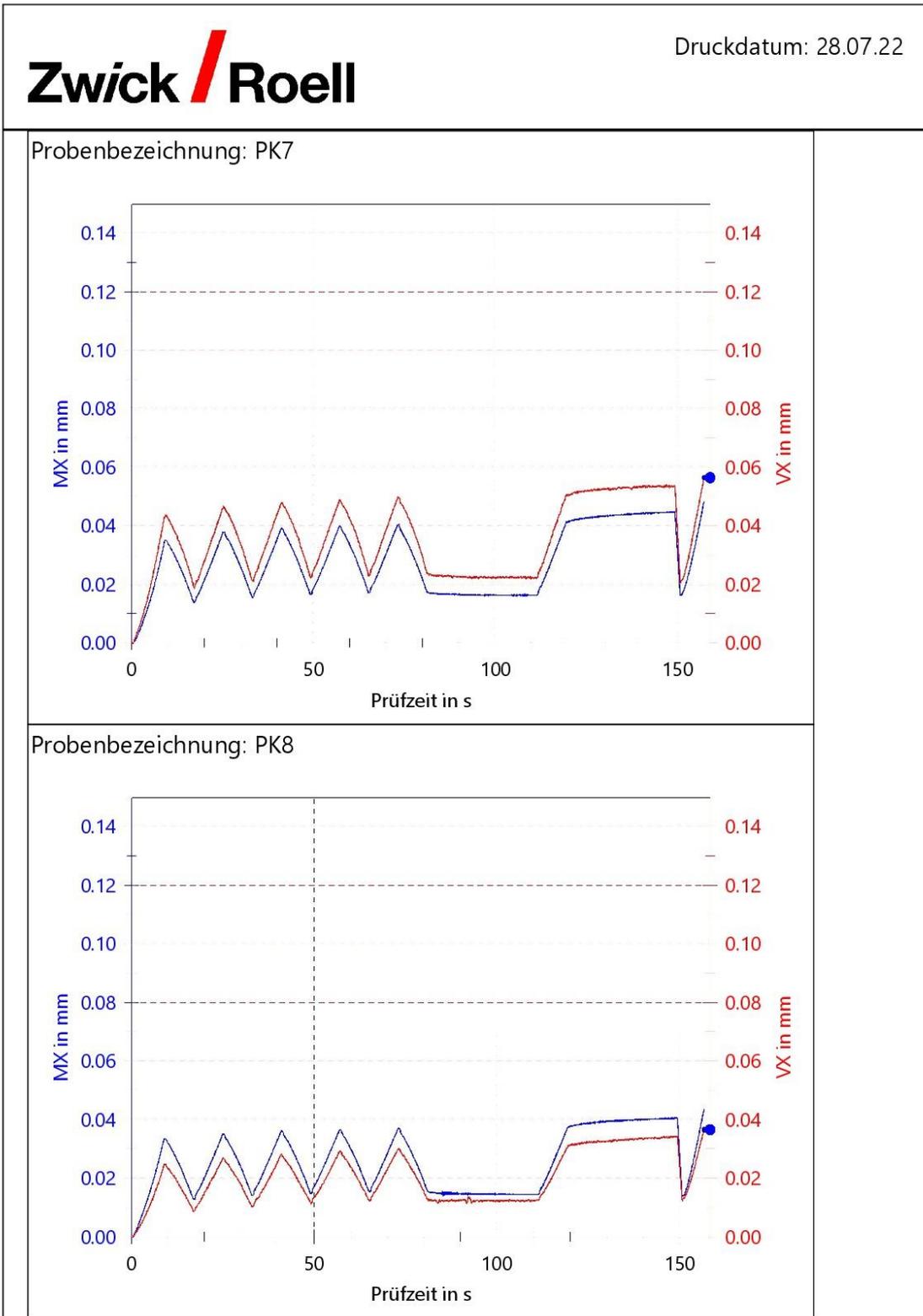


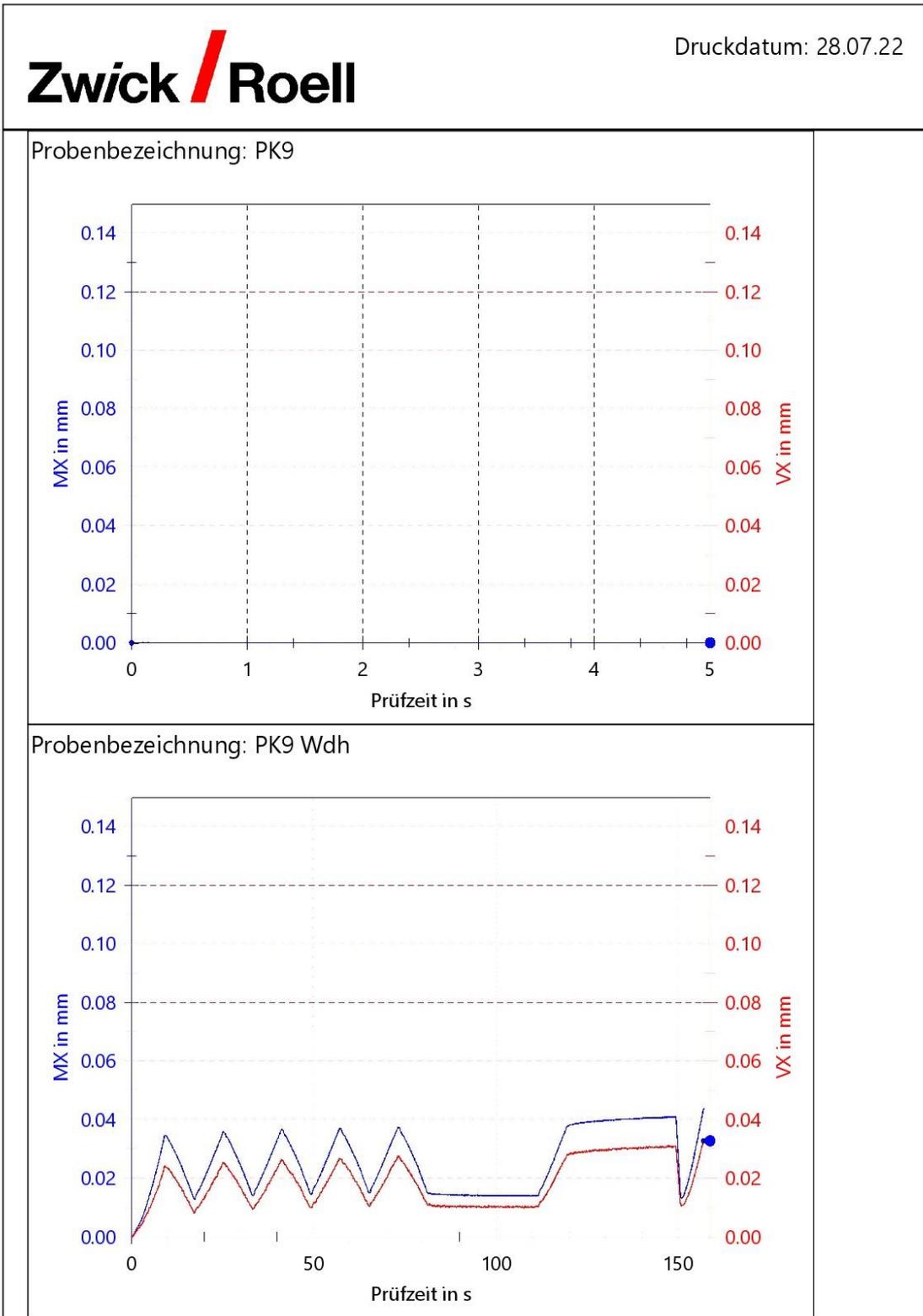
Probenbezeichnung: PK3

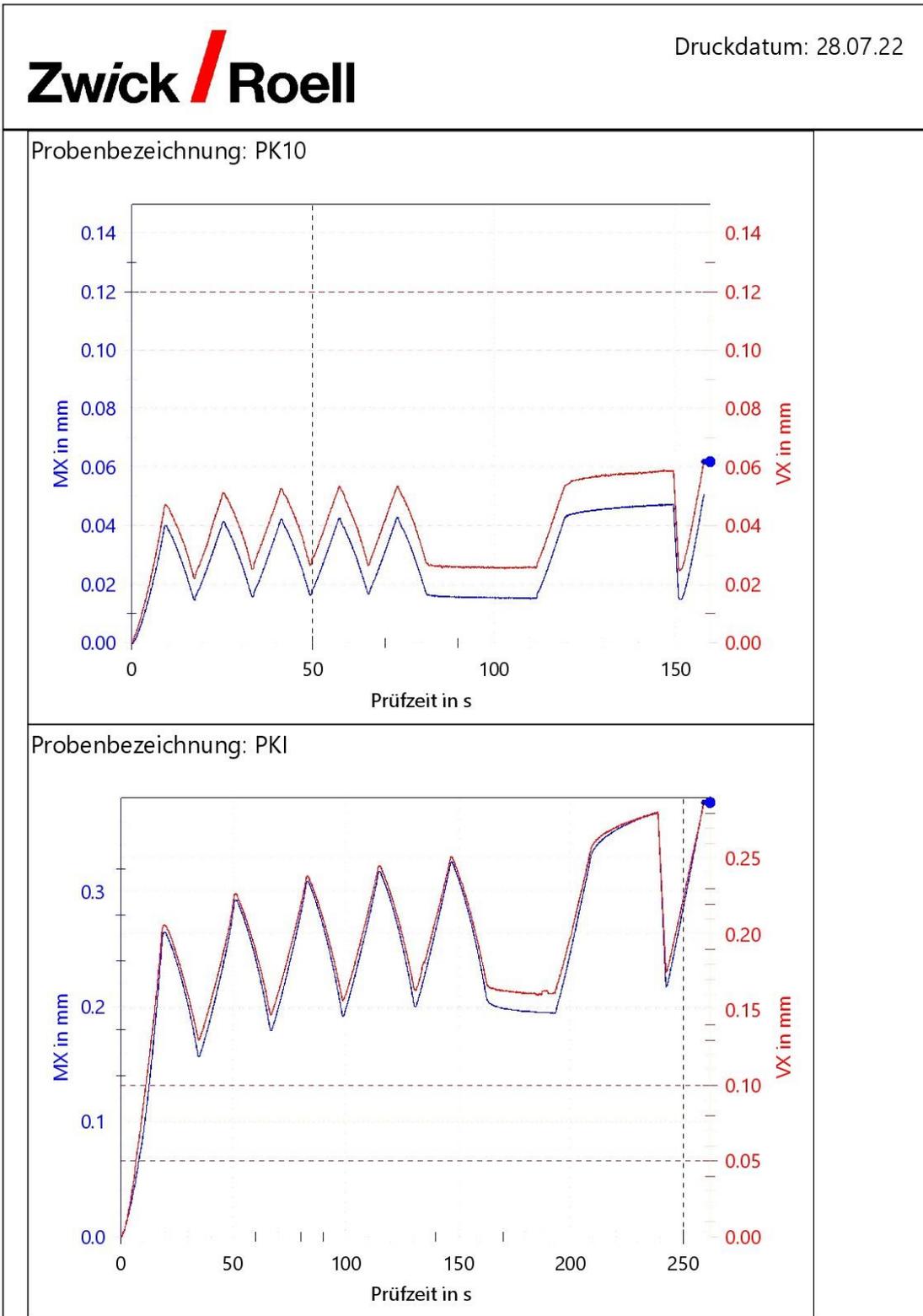


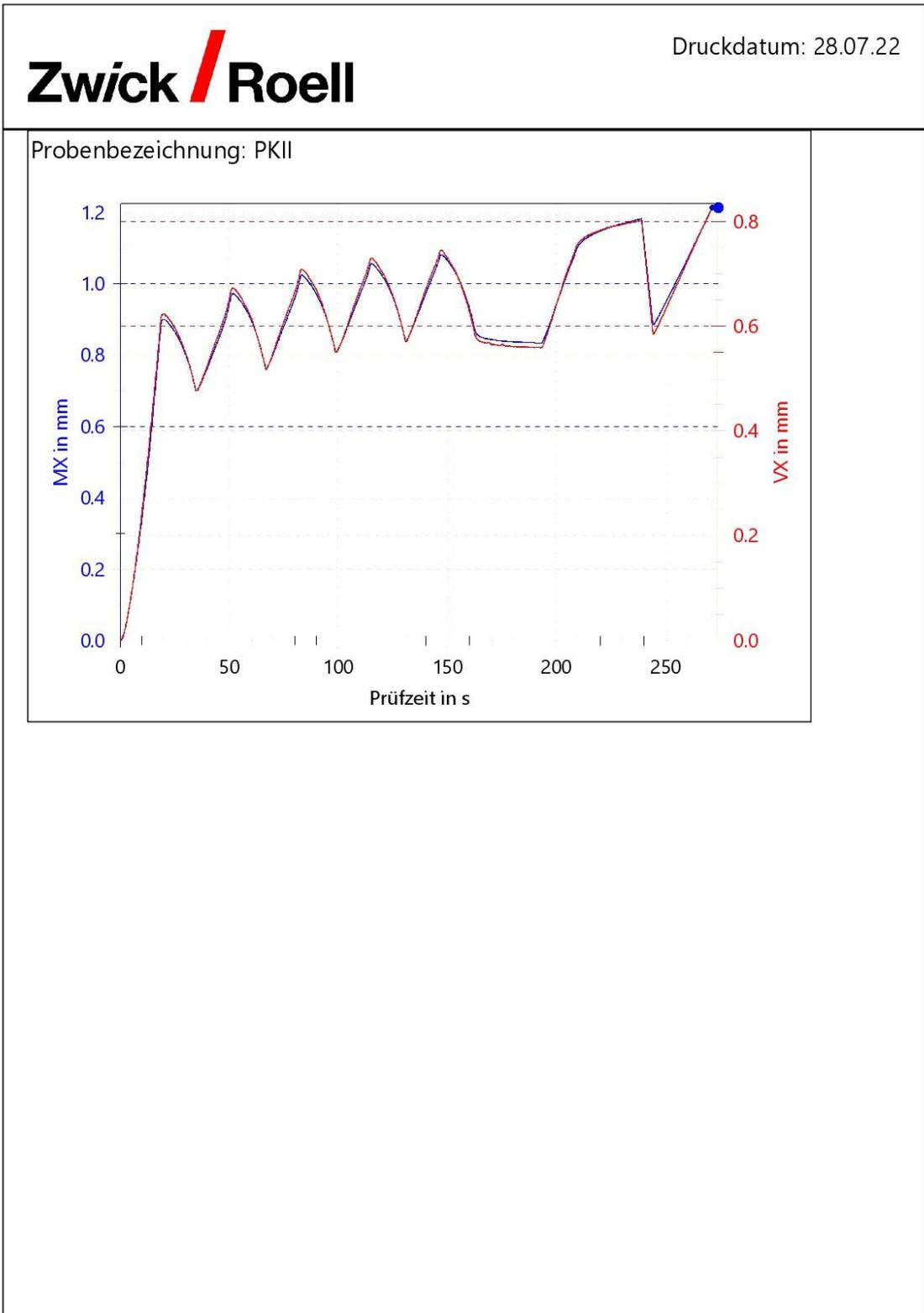












Anlage 6: Prüfprotokoll W150 28.07.

	Druckdatum: 28.07.22
<b>Prüfprotokoll</b>	
Kunde	:
Auftrags-Nr.	:
Prüfnorm	:
Baustelle	:
Art und Bezeichnung	:
Werkstoff	:
Probentyp	:
Herstelldatum	:
Probenentnahme	:
Vorbehandlung	:
Angestrebte Eigenschaften	:
Probendimensionen	:
Rohdichte	:
Prüfer	:
Bemerkung	:
Maschinendaten	:
UNI Frau Daube	
i.A.a. DIN 1048-5 12390-3	
Stampflehm Tragschicht o GeoGitter	
Korklehm	
Würfel W150	
10.06.2022	
LEF abgeglichen	
MKr	
runde Druckplatte, rote Quadratplatte, PK Stahlblechplatte 4,5mm runde Platte an Kalotte	
Achtung: bei Höhenmessung 4,5mm abziehen (Stahlblech)	
Vorkraft	: 250 N
Geschwindigkeit bis Prüfungsende	: 0,04 MPa/s

MKr 2022-07-25 Korklehm D-E-Mod W150.zs2

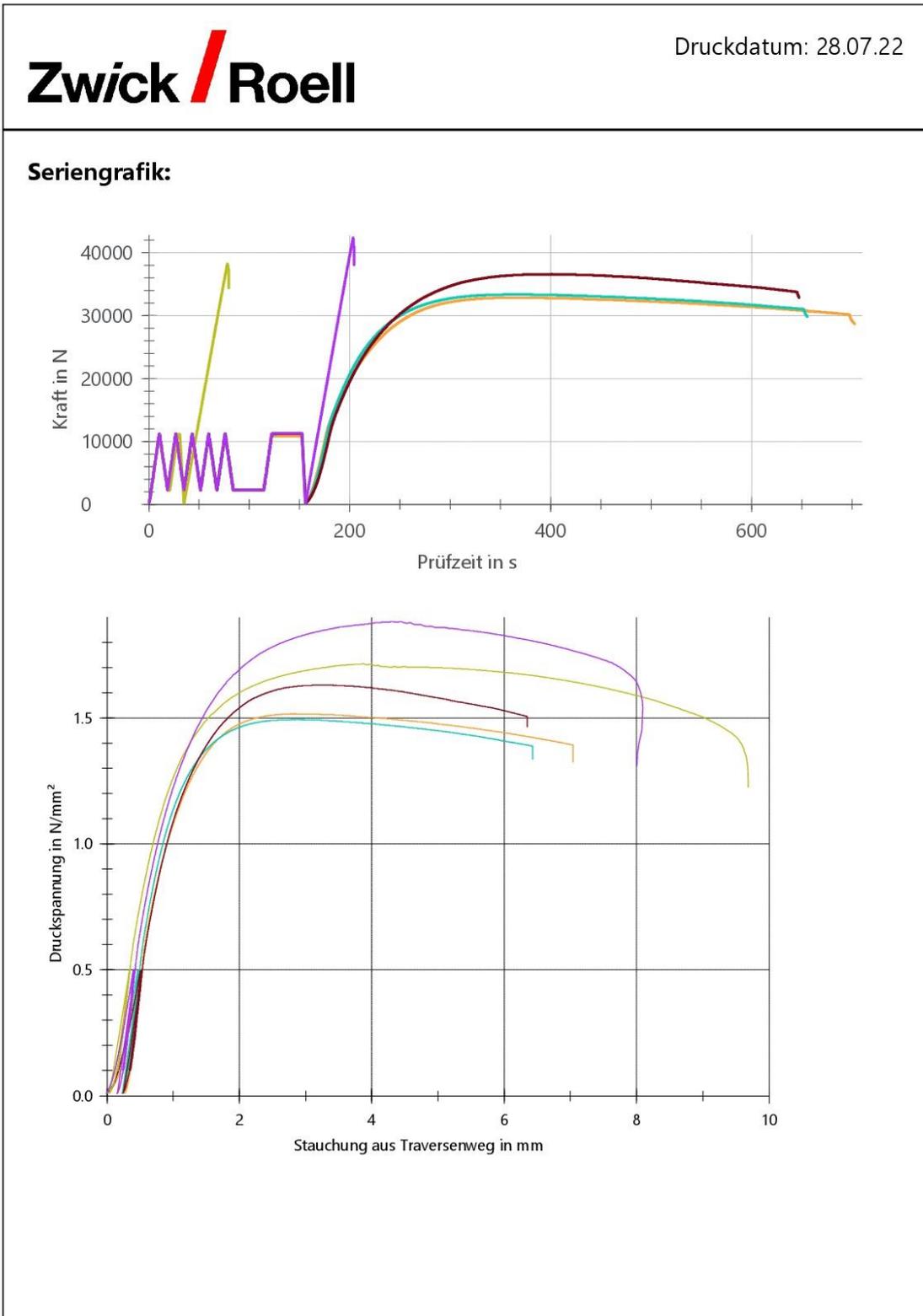
Seite1/8

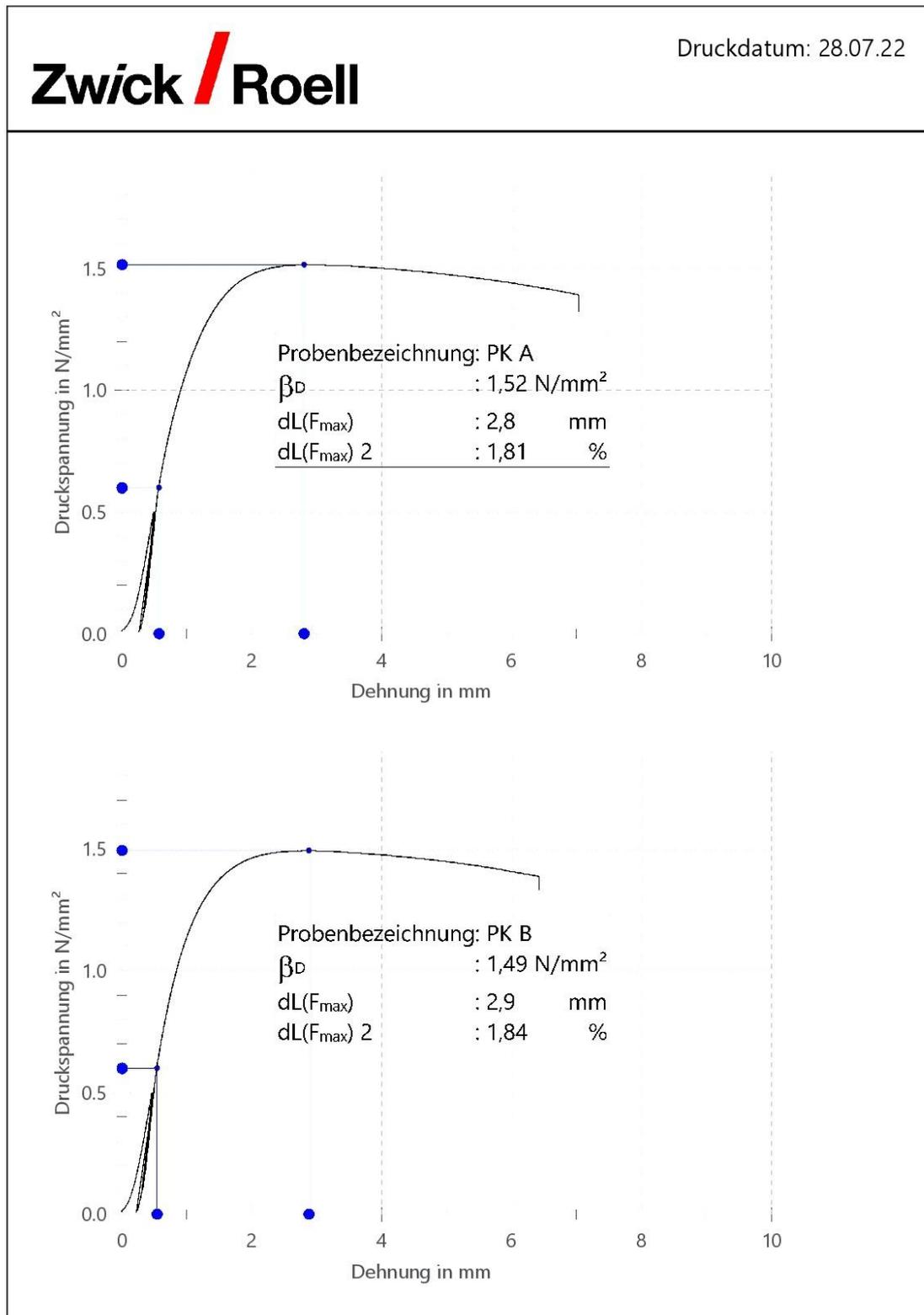
**Prüfergebnisse:**

Legende	Probenbezeichnung	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	L <sub>c</sub>	F <sub>max</sub>	β <sub>D</sub>	dL(F <sub>max</sub> )	dL(F <sub>max</sub> ) <sup>2</sup>
		mm	mm	mm	N	N/mm <sup>2</sup>	mm	%
	PK A	149,2	145,2	155,2	32800	1,52	2,8	1,81
	PK B	148,6	150,3	156,5	33300	1,49	2,9	1,84
	PK C	149,8	149,7	160,6	36600	1,63	3,3	2,05
	PK D	148,6	149,9	155,5	11100	0,50	0,5	0,34
	PK D wdh	148,6	149,9	155,3	38200	1,71	3,9	2,49
	PK E	149,9	150,2	159,0	42400	1,88	4,3	2,71

**Statistik:**

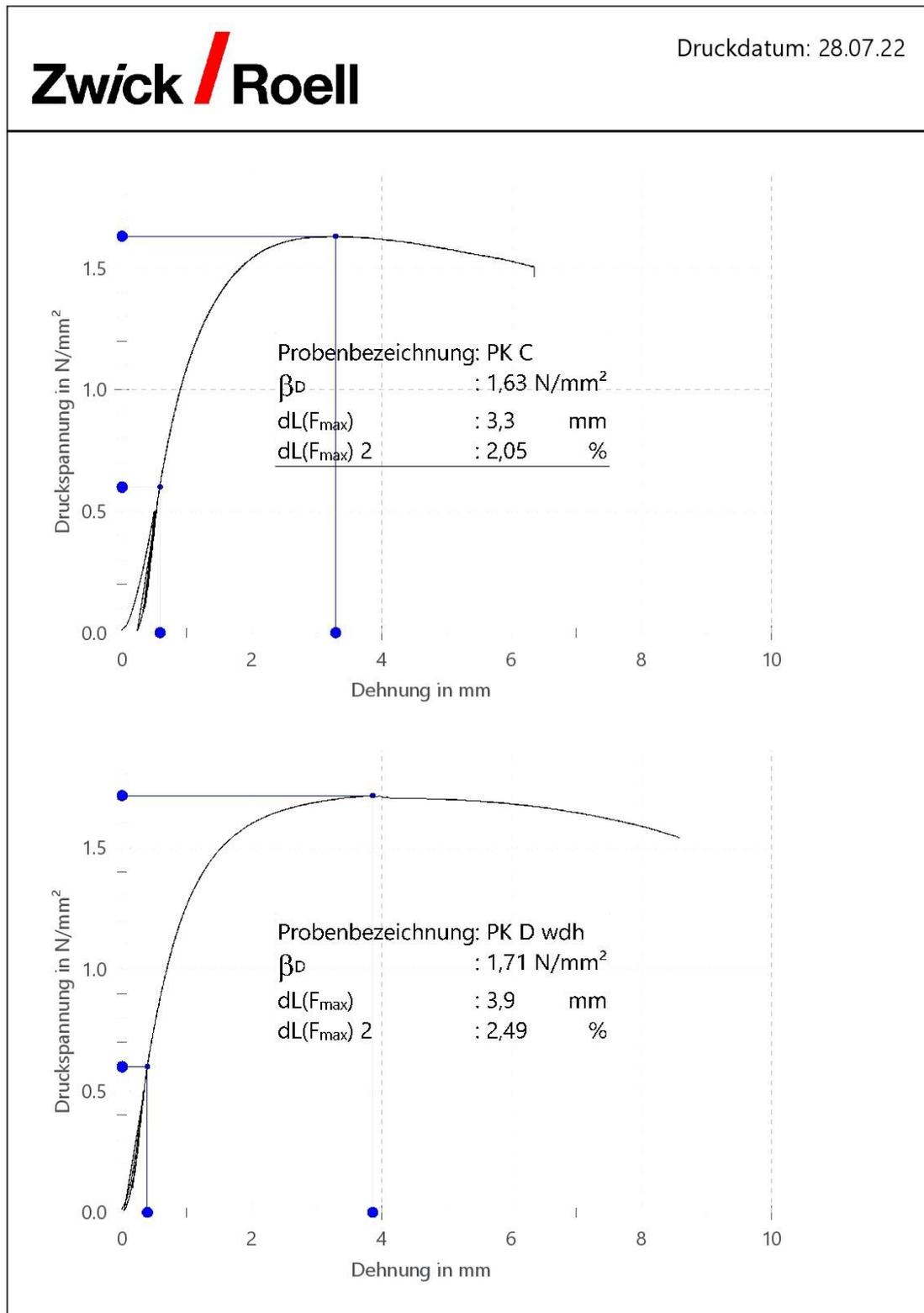
Serie	β <sub>D</sub>	dL(F <sub>max</sub> )	dL(F <sub>max</sub> ) <sup>2</sup>	L <sub>c</sub>
n = 5	N/mm <sup>2</sup>	mm	%	mm
x	1,65	3,4	2,18	157,3
s	0,16	0,6	0,40	2,4
v [%]	9,64	18,84	18,44	1,52





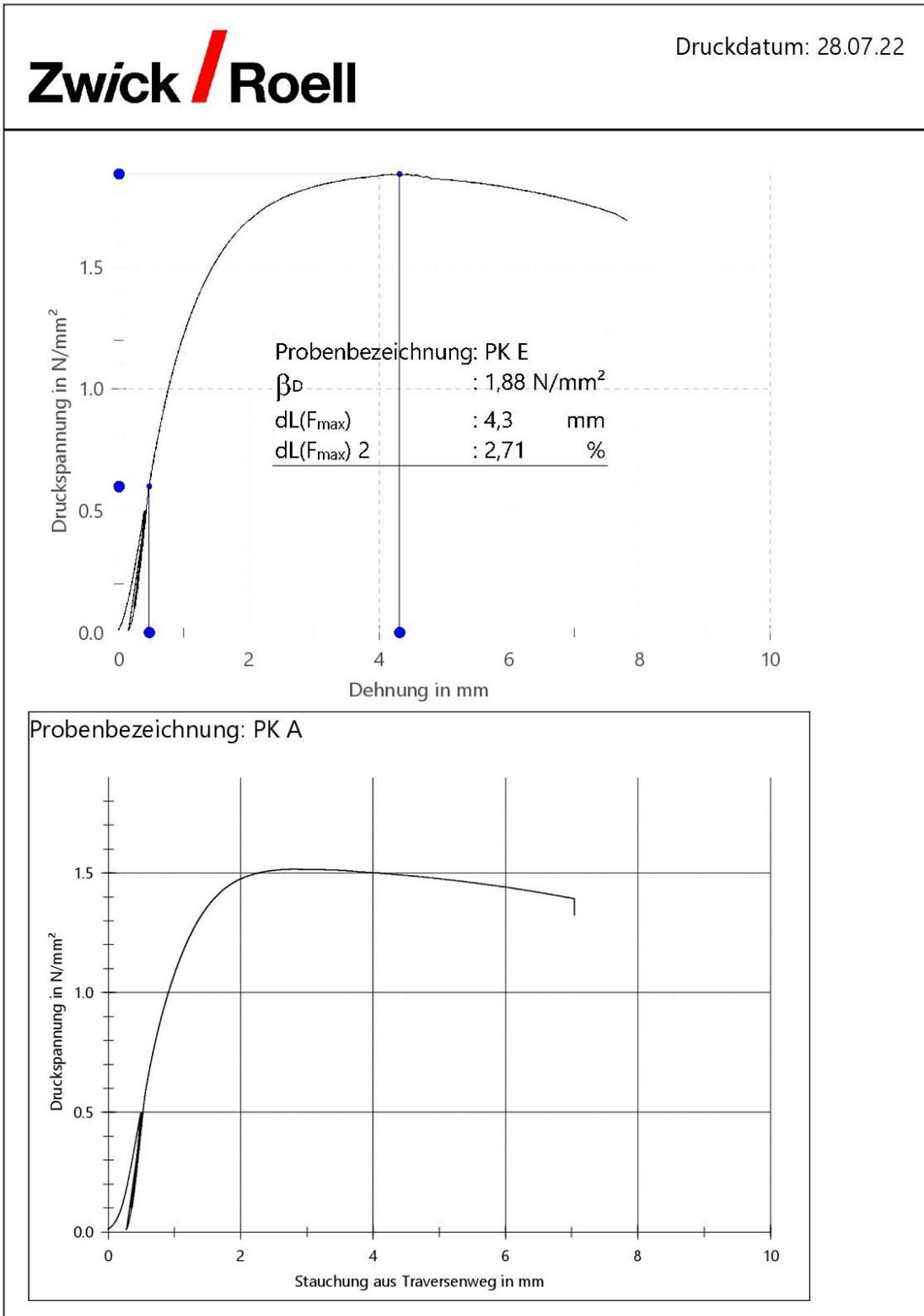
MKr 2022-07-25 Korklehm D-E-Mod W150.zs2

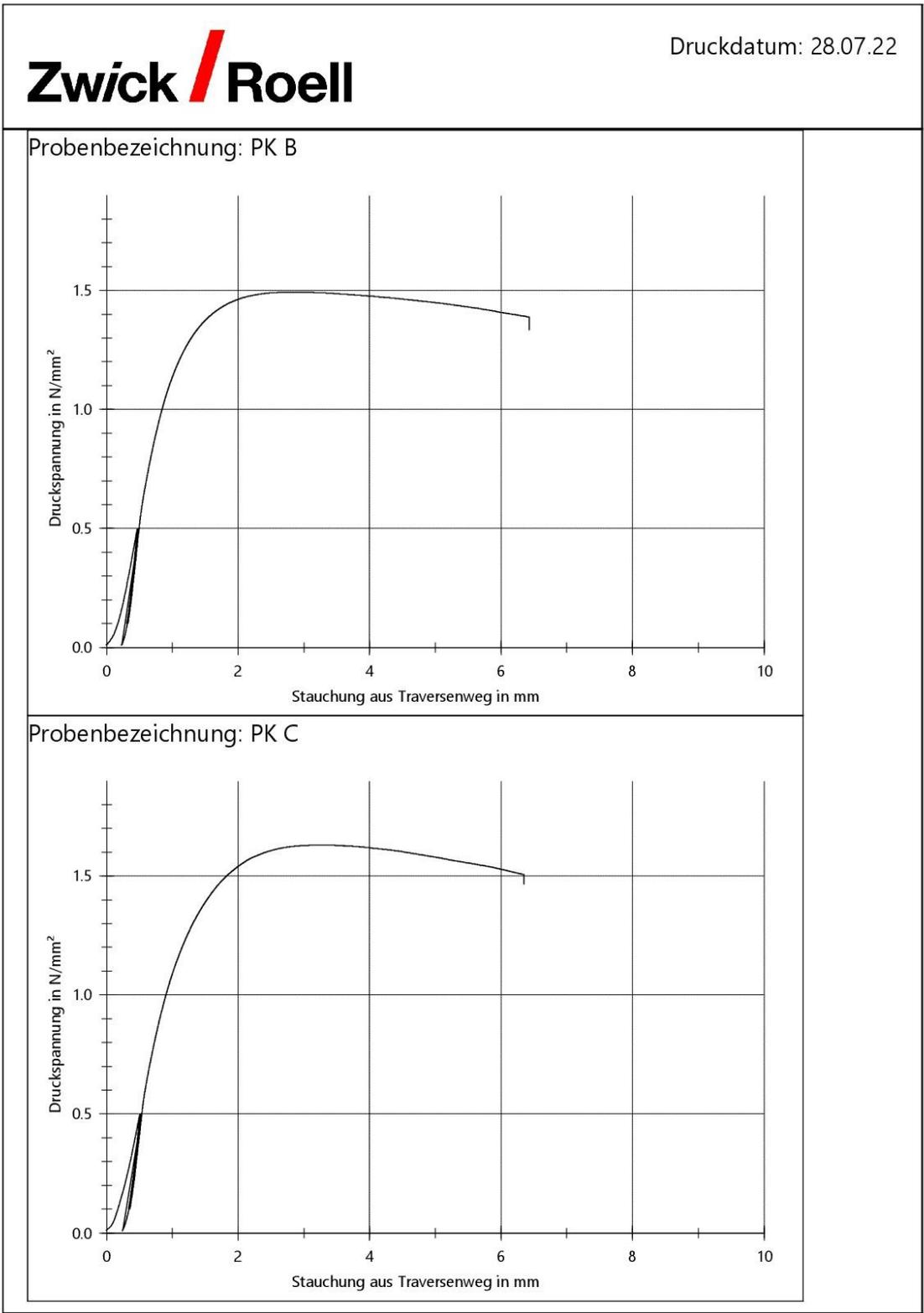
Seite4/8

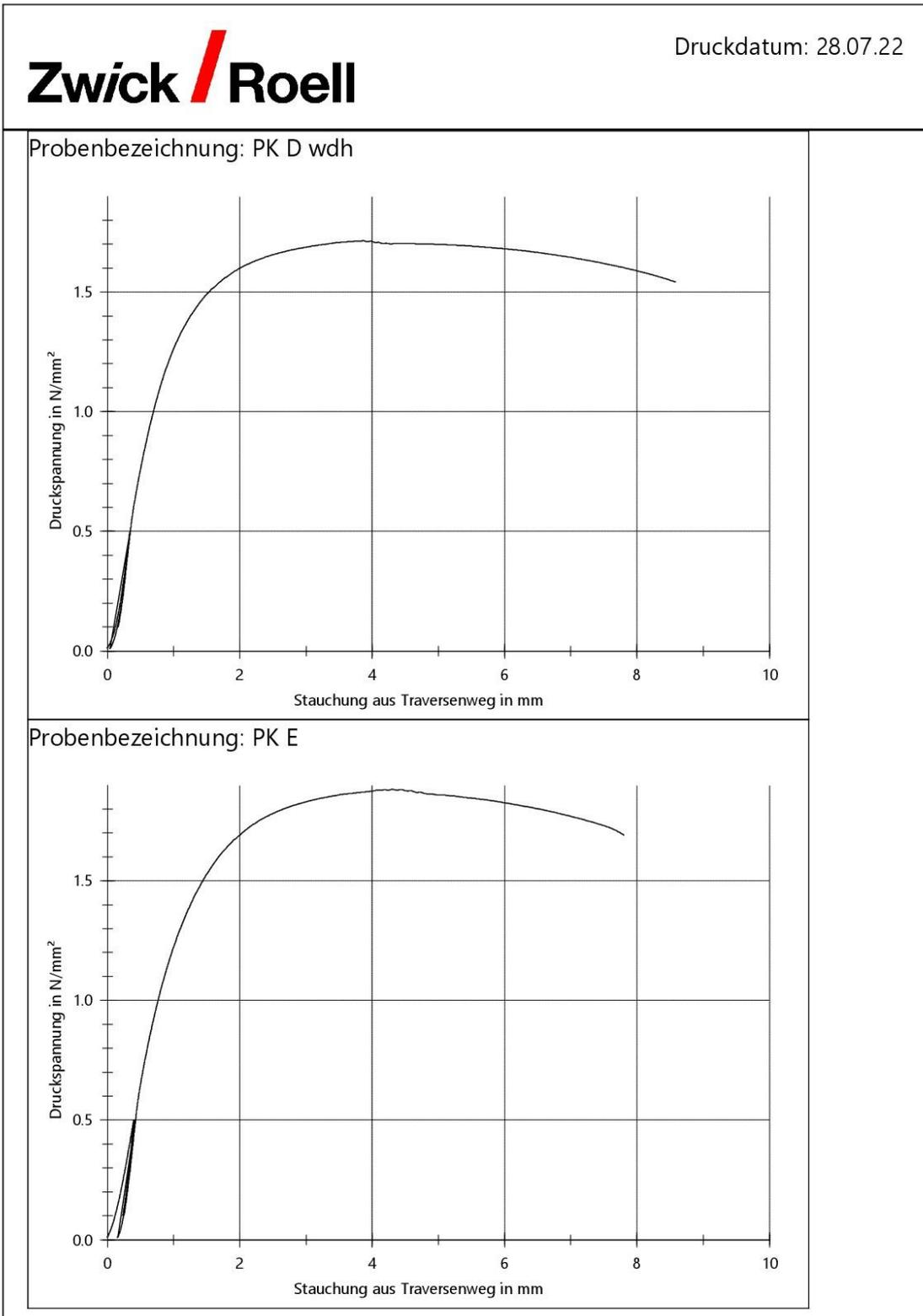


MKr 2022-07-25 Korklehm D-E-Mod W150.zs2

Seite5/8





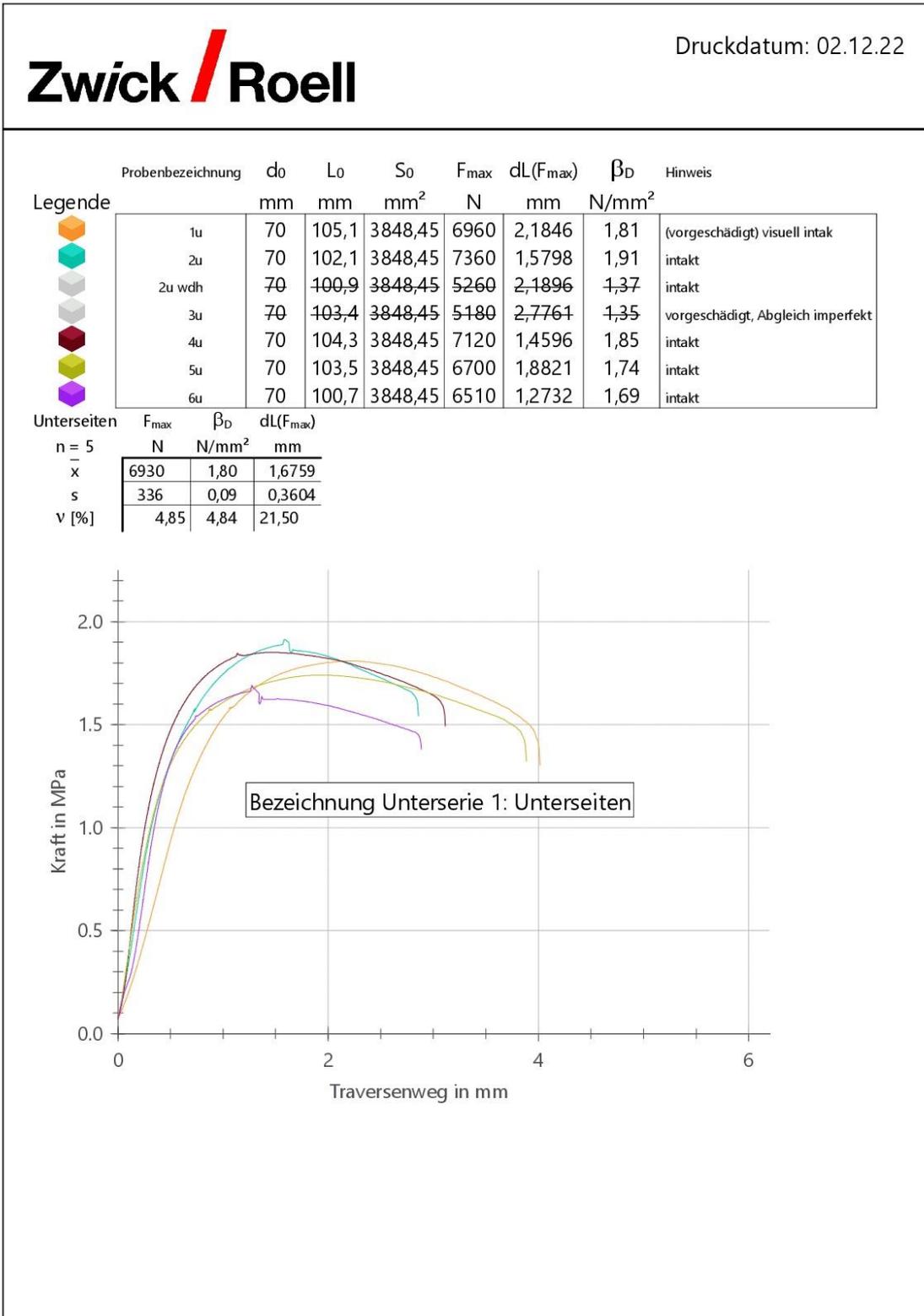


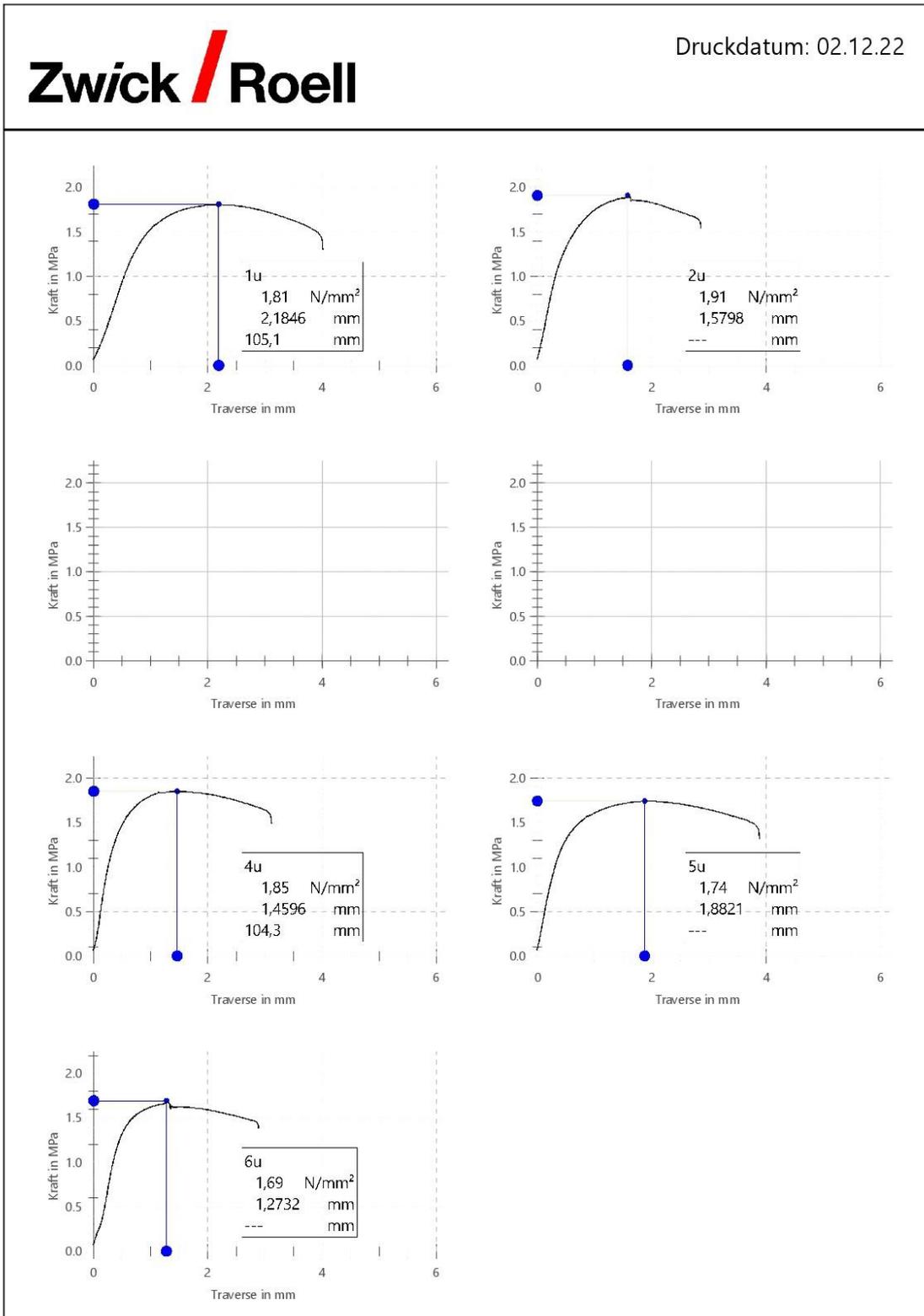
Anlage 7: Prüfprotokoll vom 02.12.

		Druckdatum: 02.12.22
<b>Prüfprotokoll</b>		
Kunde	:	UNI Frau Daube/Plattner
Auftrags-Nr.	:	
Prüfnorm	:	i.A.a. DIN 1048-5 nur Druck
Baustelle	:	
Art und Bezeichnung	:	E-Mod-PK halbiert
Werkstoff	:	Korklehm
Probentyp	:	Zylinder D70
Herstellungsdatum	:	10.06.2022
Probenentnahme	:	
Vorbehandlung	:	LEF abgeglichen
Angestrebte Eigenschaften	:	
Probendimensionen	:	
Rohdichte	:	
Prüfer	:	MKr
Bemerkung	:	
Maschinendaten	:	runde Druckplatte; KMD 250 nur Traverse
Vorkraft	:	250 N
Geschwindigkeit bis Prüfungsende	:	0,04 MPa/s
<b>Prüfergebnisse:</b>		

MKr 2022-12-02 Auswertung Korklehm D kraftgeregelt D70.ZP2

Seite 1/7





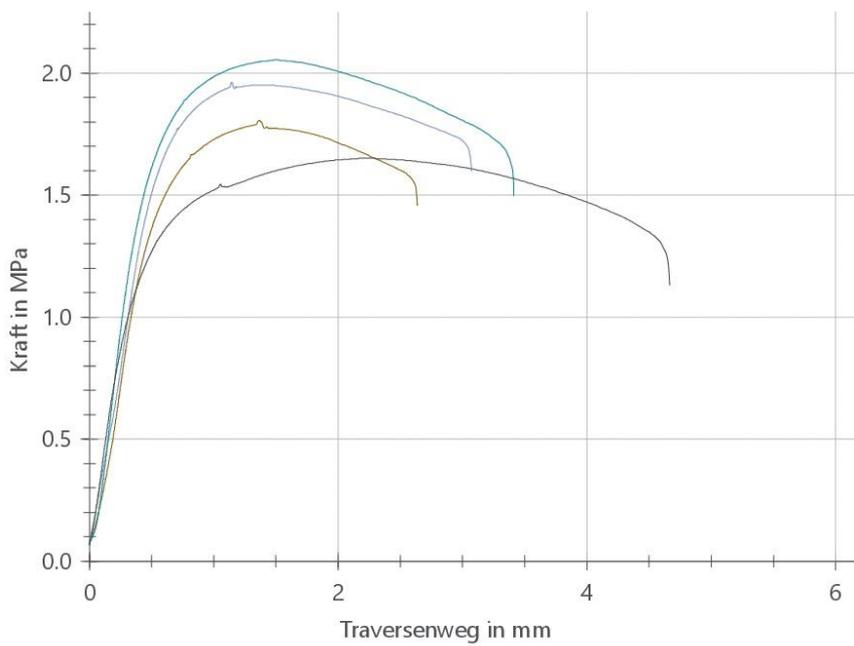
Probenbezeichnung	d <sub>0</sub> mm	L <sub>0</sub> mm	S <sub>0</sub> mm <sup>2</sup>	F <sub>max</sub> N	dL(F <sub>max</sub> ) mm	β <sub>D</sub> N/mm <sup>2</sup>	Hinweis
7o	70	98,2	3848,45	6950	1,3661	1,81	intakt
8o	70	98,0	3848,45	7550	1,1405	1,96	intakt, abgleich min imperfekt
9o	70	104,2	3848,45	7900	1,5023	2,05	intakt
10o	70	97,5	3848,45	6350	2,2200	1,65	intakt

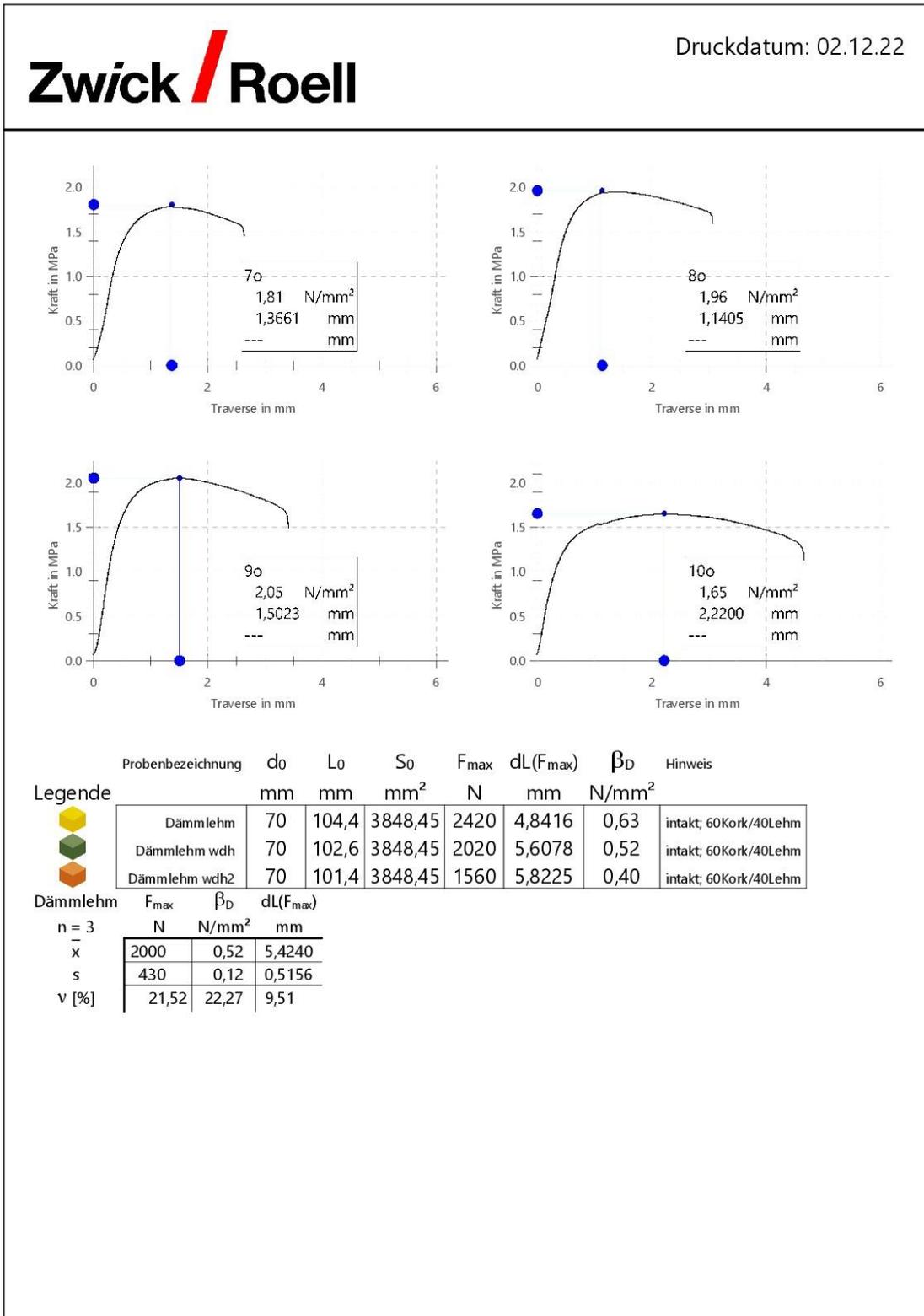
**Legende**

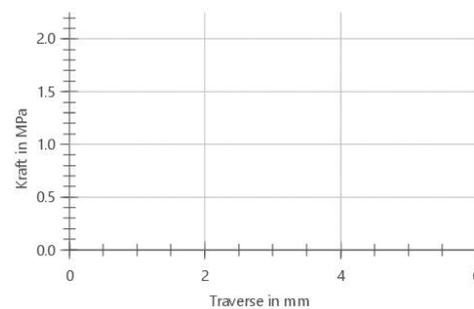
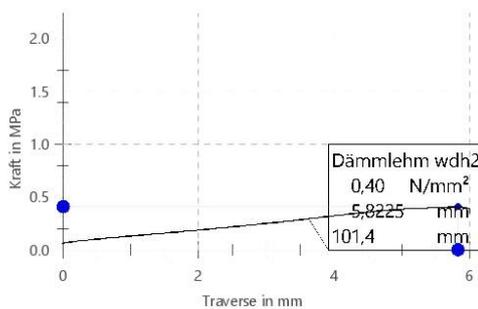
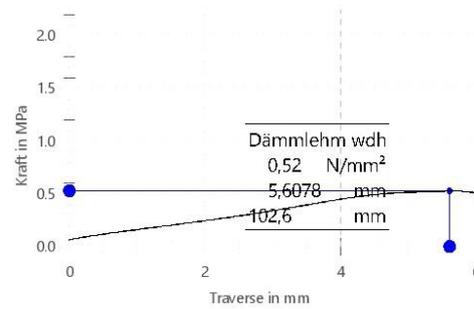
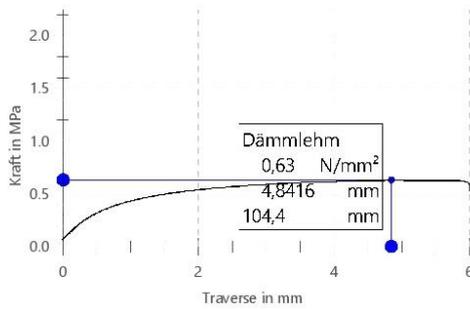
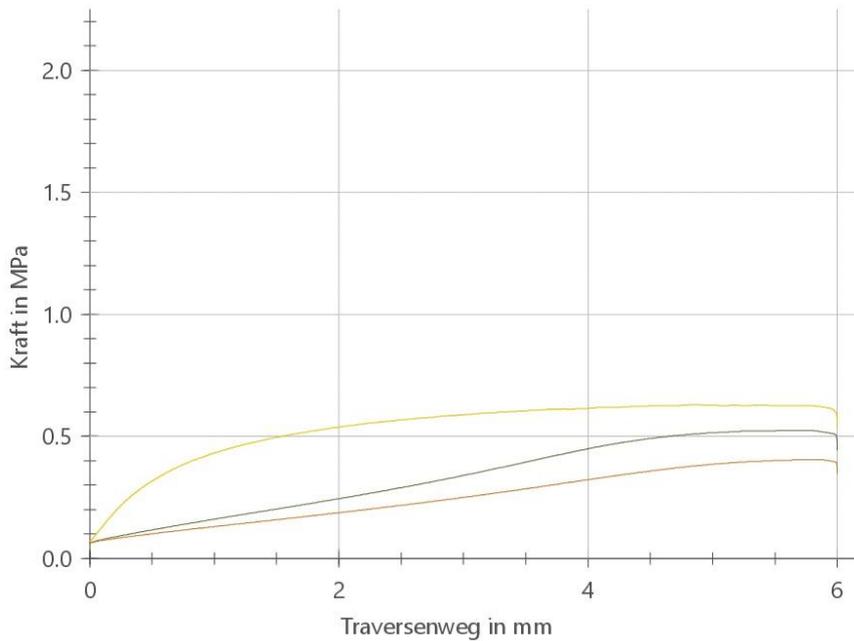
- 7o
- 8o
- 9o
- 10o

**Oberseiten**

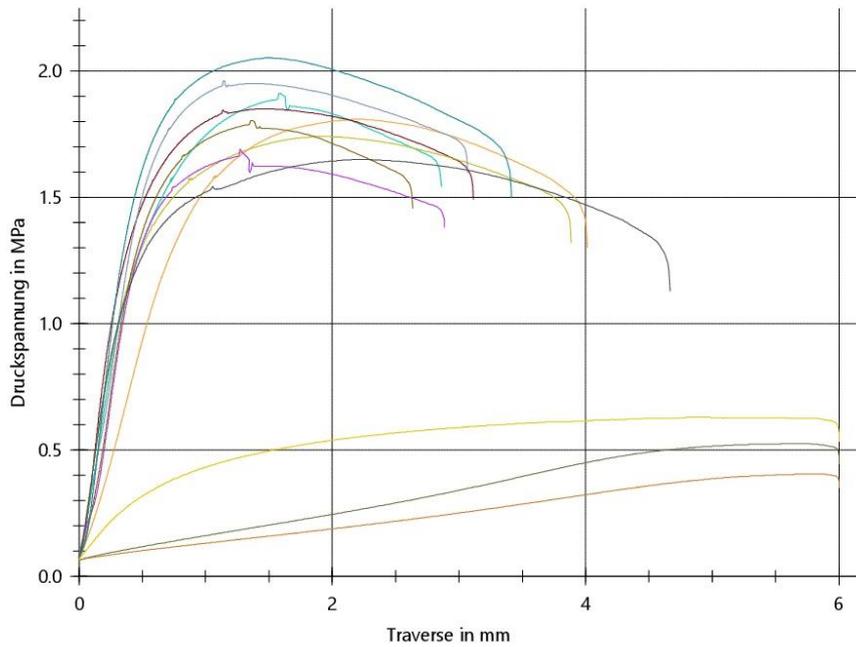
	F <sub>max</sub> N	β <sub>D</sub> N/mm <sup>2</sup>	dL(F <sub>max</sub> ) mm
n = 4			
$\bar{x}$	7190	1,87	1,5572
s	682	0,18	0,4664
v [%]	9,49	9,40	29,95







**Seriengrafik:**



Anlage 8: Prüfprotokoll vom 02.12.

Zwick / Roell

Druckdatum: 02.12.22

---

### Prüfprotokoll

Kunde : UNI Frau Daube/Plattner  
 Auftrags-Nr. :  
 Prüfnorm : i.A.a. DIN 1048-5 nur Druck  
 Baustelle :  
 Art und Bezeichnung : E-Mod-PK halbiert  
 Werkstoff : Korklehm  
 Probentyp : Zylinder D70  
 Herstelldatum : 10.06.2022  
 Probenentnahme :  
 Vorbehandlung : LEF abgeglichen  
 Angestrebte Eigenschaften :  
 Probendimensionen :  
 Rohdichte :  
 Prüfer : MKr  
 Bemerkung :  
 Maschinendaten : runde Druckplatte; KMD 250 nur Traverse  
 Vorkraft : 250 N  
 Geschwindigkeit bis Prüfungsende : 0,75 mm/min

### Prüfergebnisse:

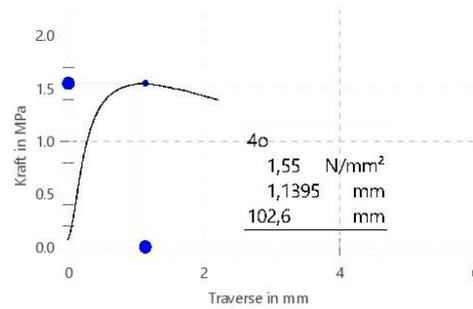
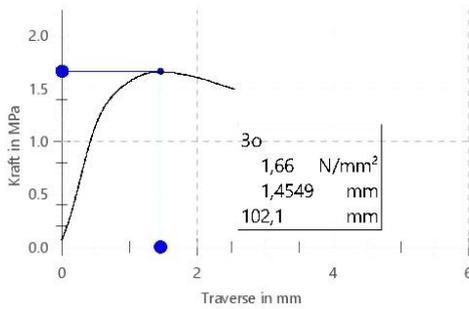
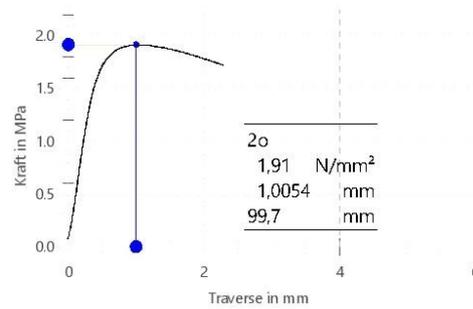
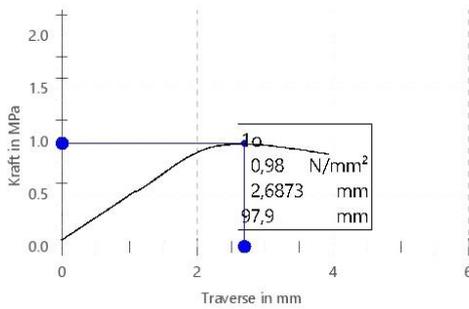
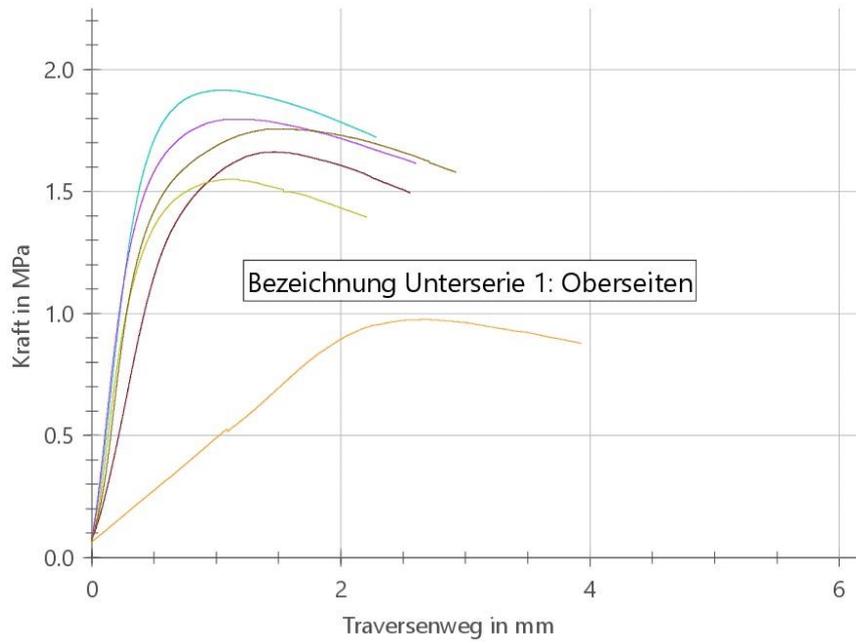
	Probenbezeichnung	d <sub>0</sub>	L <sub>0</sub>	S <sub>0</sub>	F <sub>max</sub>	dL(F <sub>max</sub> )	β <sub>D</sub>
		mm	mm	mm <sup>2</sup>	N	mm	N/mm <sup>2</sup>
Legende	1o	70	97,9	3848,45	3750	2,6873	0,98
	2o	70	99,7	3848,45	7370	1,0054	1,91
	3o	70	102,1	3848,45	6400	1,4549	1,66
	4o	70	102,6	3848,45	5970	1,1395	1,55
	5o	70	95,7	3848,45	6910	1,2319	1,80
	6o	70	105,8	3848,45	6760	1,5412	1,76

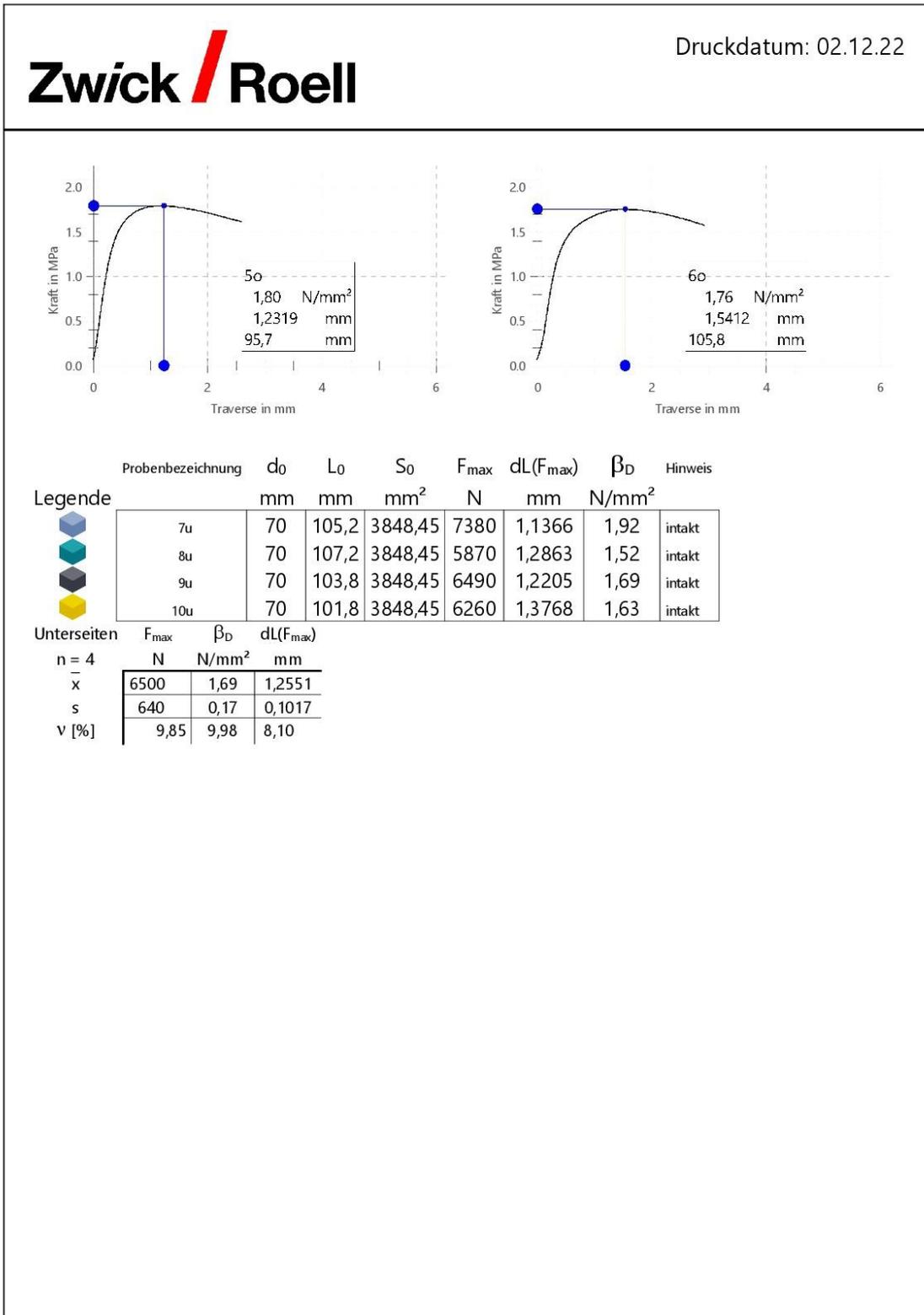
  

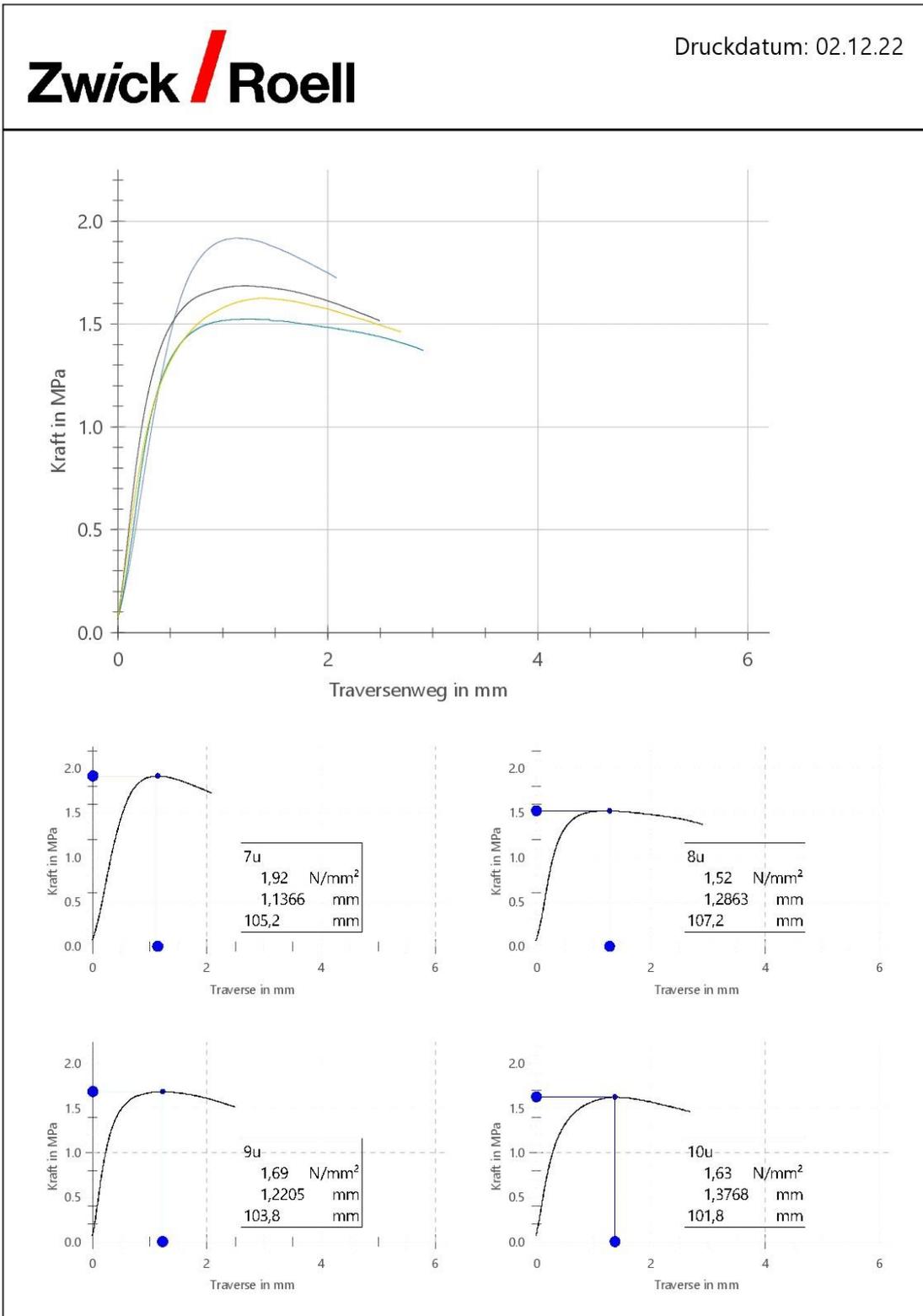
	Oberseiten	F <sub>max</sub>	β <sub>D</sub>	dL(F <sub>max</sub> )
	N	N/mm <sup>2</sup>	mm	
n = 6				
$\bar{x}$	6190	1,61	1,5100	
s	1290	0,33	0,6098	
v [%]	20,78	20,63	40,38	

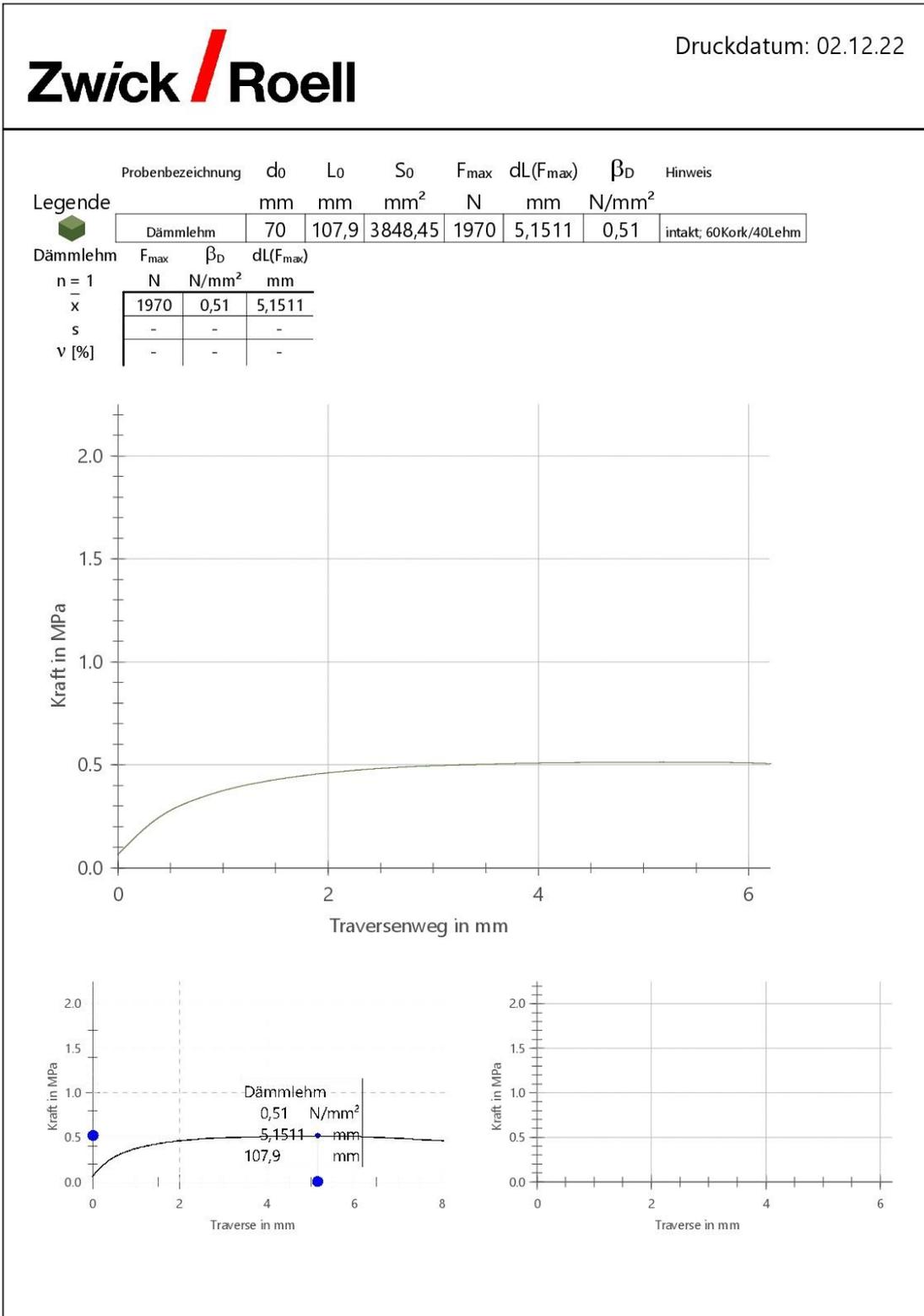
  

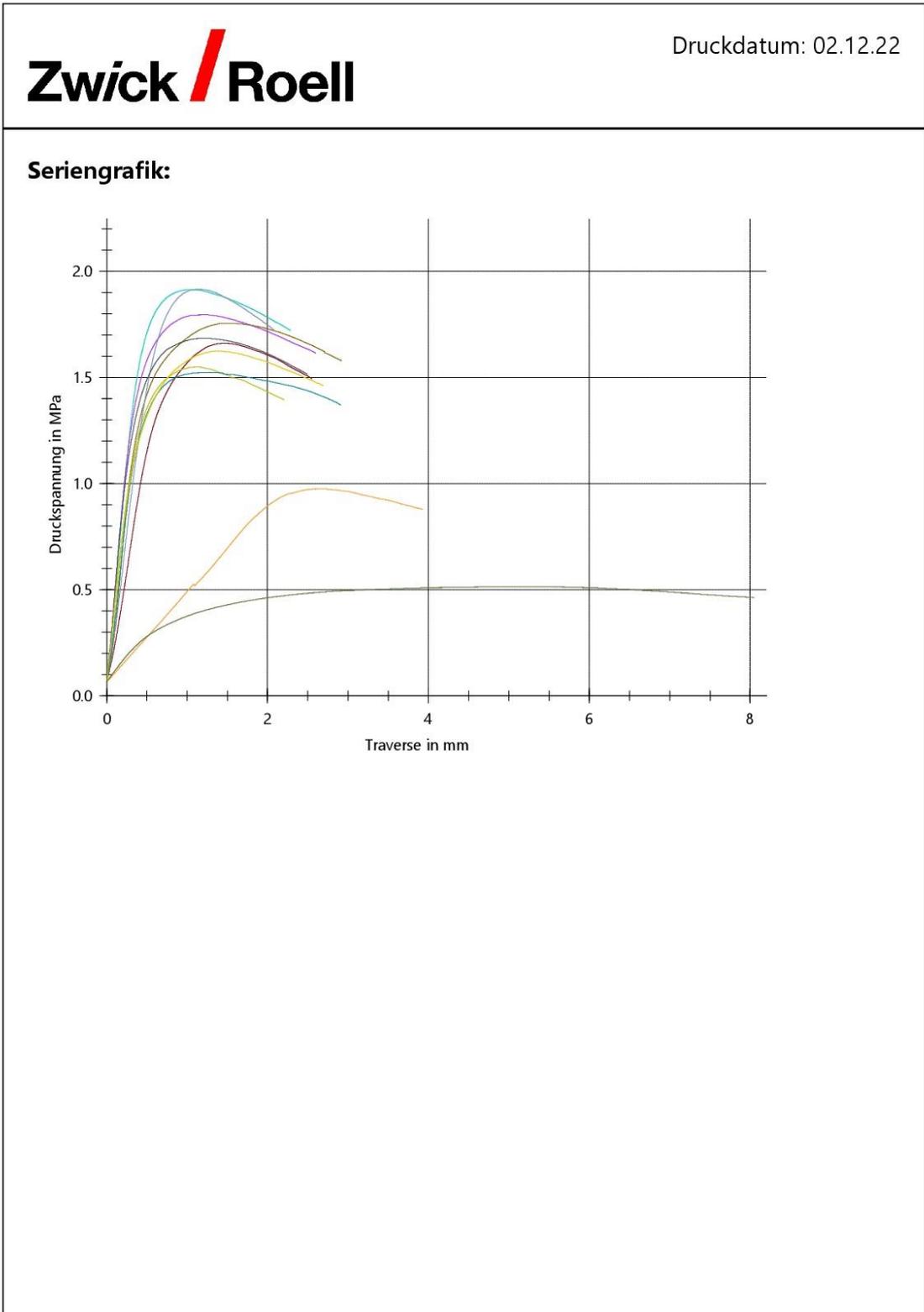
Legende	Hinweis
	weggeregelt vorgeschädigt
	ohne Vorschaden, Abgleich leicht imperfekt
	vorgeschädigt
	intakt, Abgleich leicht imperfekt
	intakt
	intakt, Abgleich leicht imperfekt













Anlage 10: Prüfprotokoll vom 30.03

Zwick / Roell

30.03.23

---

## Prüfprotokoll

Kunde : Masseanteile :  
 Auftrags-Nr. : Herstellung :  
 Prüfnorm : DIN EN 196-1 Lagerung :  
 Art und Bezeichnung : Alter der Prüfkörper :  
 Prüfer : Bemerkung :  
 Art des Sandes : Maschinendaten :

Vorkraft : 250 N  
 Prüfgeschwindigkeit : 0,05 MPa/s

### Prüfergebnisse:

Nr	Probenbezeichnung	F <sub>c</sub> N	R <sub>c</sub> N/mm <sup>2</sup>	a <sub>0</sub> mm	b <sub>0</sub> mm
1	1.2	49913,7	2,3	145,2	152,2
2	1.5	52419,6	2,3	146,7	155,7
3	2.2	51000,8	2,2	156,7	147,2
4	2.5	35377,7	1,5	153,8	151,7
5	3.2	50270,8	2,3	145,2	150,2
7	3.5	49581,4	2,2	146,8	150,7

### Seriengrafik:

The graph shows the stress-strain behavior of six different samples. The y-axis represents stress in N/mm², ranging from 0.0 to 2.5. The x-axis represents strain in %, ranging from 0 to 8. The curves show an initial elastic region, followed by a yield point, and then a strain-hardening region. The curves are color-coded: green, blue, purple, red, yellow, and orange. The green curve reaches the highest stress of approximately 2.3 N/mm² at a strain of about 3.5%. The yellow curve reaches the lowest stress of approximately 1.5 N/mm² at a strain of about 4.5%.

### Statistik:

Serie	F <sub>c</sub> N	R <sub>c</sub> N/mm <sup>2</sup>	a <sub>0</sub> mm	b <sub>0</sub> mm
n = 6				
$\bar{x}$	48094,0	2,1	149,1	151,3
s	6310,7	0,3	4,927	2,782
v	13,12	14,34	3,31	1,84

Anlage 11: Prüfprotokoll vom 21.04.2022

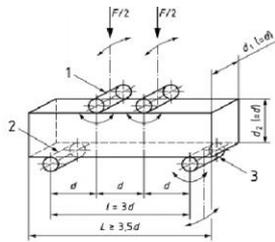
**Bestimmung der Biegezugfestigkeit - 2-Punkt-Lastangriff**

nach DIN 12390-5:2019-10

Bauhaus-Universität Weimar  
F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde  
Betonlabor

Bezeichnung	
Betreuer/Auftraggeber	
Datum	21.04.2022
Herstellung/Alter	
Lagerung	
Prüfer	

Bezeichnung	Maße			Masse [g]	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Mittelwert Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Bruchkraft (F) [kN]	Biegezug- festigkeit ( $f_{ct,n}$ ) [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittelwert $f_{ct,n}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
	Länge [mm]	d1 [mm]	d2 [mm]						
zu nass	398,2	99,6	91,5	6646,9	1831	1770	2,247	0,808	0,7
ohne Bewehrung	397,6	100,2	98,3	6737,2	1721		2,255	0,699	
mit Bewehrung	398,1	98,6	98,9	6777,9	1746		2,296	0,715	



## Anlage 12: Daube und Bieganski 2022

**Welche Fassadengestaltung sagt Ihnen optisch am meisten zu?**

- a)       b)       c)       d)       e)

**Welche Anforderungen stellen Sie an Ihren Wohnraum? (Maximal 3)**

- |  |   |
|--|---|
| <input type="radio"/> günstiger Preis  | <input type="radio"/> gute Innenraumluft          |
| <input type="radio"/> großer Wohnraum  | <input type="radio"/> Lage                        |
| <input type="radio"/> Energieeffizienz | <input type="radio"/> umweltfreundlicher Baustoff |
| <input type="radio"/> Design           | <input type="radio"/> Aussicht                    |

**Wo hatten Sie schon Kontakt zum Thema Lehmbau?**

- |                               |                              |
|-------------------------------|------------------------------|
| <input type="radio"/> Schule  | <input type="radio"/> Privat |
| <input type="radio"/> Studium | <input type="radio"/> Beruf  |

**Kennen Sie ein Gebäude das aus Lehm gebaut ist? Falls ja, welche Art von Gebäude?**

- |                                    |  |
|------------------------------------|--|
| <input type="radio"/> Industriebau | <input type="radio"/> landwirtschaftliches Gebäude |
| <input type="radio"/> Wohnungsbau  | <input type="radio"/> Sonstiges: _____             |

**Was verbinden Sie mit Lehm als Baustoff?**

- |            |                       |                       |                       |                       |           |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|
| Recyclbar  | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | Bauschutt |
| Günstig    | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | Teuer     |
| Instabil   | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | Stabil    |
| Altmodisch | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | Modern    |

**Wie alt sind Sie?**

- |   |  |
|---|--|
| <input type="radio"/> Jünger als 16 Jahre | <input type="radio"/> 16 – 25 Jahre      |
| <input type="radio"/> 26 – 40 Jahre       | <input type="radio"/> Älter als 40 Jahre |