

ACMS_

ECOsights - Entwicklung von architektonischen, bauklimatischen und didaktischen Maßnahmen zum Bau und Betrieb nachhaltiger Museen am Beispiel des Eingangs- und Ausstellungsgebäudes des LWL-Freilichtmuseums Detmold, Westfälisches Landesmuseum für Alltagskultur

Abschlussbericht: Langfassung - Arbeitspaket 6
Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für die Umsetzbarkeit ökologischer Konstruktionen bei Großprojekten für das Material Lehm



Abschlussbericht
DBU-Projekt AZ 35442/02
Gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU)

Arbeitspaket 6: Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für die Umsetzbarkeit ökologischer Konstruktionen bei Großprojekten für das Material Lehm

ACMS Architekten GmbH
Friedrich – Ebert – Straße 55
42103 Wuppertal
Tel.: 0202 – 445 71 30

Autor:innen:
Simon Waigand, M. Sc. Architekt
Michael Müller, Dipl.-Ing. Architekt
Christina Sonnborn, M. Sc. Architektin

Wuppertal, der 03.06.2024



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 2

Abbildungsverzeichnis 4

Prolog 6

6.1 Zusammenfassung 10

6.2 Einleitung 12

6.3 Planen und Errichten von Stampflehmwänden 13

 6.3.1 Entwurfsprozess tragender Stampflehmkonstruktionen 13

 6.3.2 Stampflehmbauweisen im Vergleich 15

 6.3.2.1 Ortbauweise 15

 6.3.2.3 Vorfertigung vor Ort 15

 6.3.2.4 Vorfertigung im Werk 17

 6.3.2.5 Robotische Vorfertigung 18

 6.3.2.6 Terminplanung der unterschiedlichen Herstellungsverfahren 18

 6.3.3 Lehmbau im Detail 20

 6.3.3.1 Fußpunkt / Wandsockel 20

 6.3.3.2 Oberer Wandabschluss 21

 6.3.3.3 Öffnungen 22

 6.3.3.4 Leitungsinstallationen 23

 6.3.3.5 Montageplanung 24

 6.3.4 Ausschreibung und Vergabe 26

 6.3.5 Bauprozess 27

 6.3.5.1 Bemusterung 27

 6.3.5.2 Baustelleneinrichtung 27

 6.3.5.3 Schalung 28

 6.3.5.4 Einbringen und Verdichten 29

 6.3.5.5 Korsettkonstruktion und Witterungsschutz 32

 6.3.5.6 Trocknung 33

 6.3.5.7 Qualitätskontrolle auf der Baustelle 36

 6.3.6 Kosten 36

 6.3.7 Lebenszyklus des Lehmbaus 37

6.4 Verwendbarkeitsnachweis tragender Stampflehmwände 38

 6.4.1 Bauarten und Bauprodukte 38

 6.4.2 Aktueller Stand der Normierung des Lehmbaus 40

6.5 Mechanische Untersuchungen 41

 6.5.1 Prüfkörperherstellung und Lagerung 42

 6.5.2 Durchführung der Untersuchungen 44

6.5.2.1 Untersuchung: Rohdichte	44
6.5.2.2 Untersuchung: Gleichgewichtsfeuchte	44
6.5.2.3 Untersuchung: Druckfestigkeit	44
6.5.2.4 Untersuchung: Elastizitätsmodul	44
6.5.2.5 Untersuchung: Kriechverhalten	45
6.5.3 Untersuchungsergebnisse.....	46
6.5.3.1 Untersuchungsergebnisse: Rohdichte	46
6.5.3.2 Untersuchungsergebnisse: Gleichgewichtsfeuchte	48
6.5.3.3 Untersuchungsergebnisse: Druckfestigkeit	52
6.5.3.4 Untersuchungsergebnisse: Elastizitätsmodul	57
6.5.3.5 Untersuchungsergebnisse: Kriechverhalten.....	57
6.5.4. Zusammenfassung und Vergleichswerte	59
6.5.4.1 Vergleichswerte: Rohdichte	59
6.5.4.2 Vergleichswerte: Druckfestigkeit	59
6.5.4.3 Vergleichswerte: Elastizitätsmodul	60
6.5.5 Schlussfolgerungen aus den mechanischen Untersuchungen	61
6.6 Untersuchungen zu Stampflehmwänden unter Brandbeanspruchung	62
6.6.1 Prüfkörperherstellung und Lagerung.....	63
6.6.2 Prüfanordnung und -durchführung	66
6.6.3 Prüfbeobachtungen	69
6.6.4 Prüfergebnisse	71
6.6.5 Erläuterungen einzelner Prüfergebnisse	73
6.6.6 Schlussfolgerungen aus den brandtechnischen Versuchen	79
6.7 Fazit & Ausblick	80
6.8 Literaturverzeichnis	82
6.9 Anhang	84

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Gebäudeensemble.....	7
Abb. 2: Aufteilung in Nutzungseinheiten.....	8
Abb. 3: Grundriss Erdgeschoss, tragende Stampflehmwände in Rot, Lehm-Trockenbau in Violett.....	13
Abb. 4: Verdichten des Stampflehms	15
Abb. 5 (links): Dezentrale Vorfertigungsstraße: Schalungsebene.....	16
Abb. 6 (rechts): Dezentrale Vorfertigungsstraße: Material-Einbring-Ebene	16
Abb. 7: Lagerung der vorfertigten Elemente vor Ort	16
Abb. 8: Montage vorgefertigter Stampflehmelemente.....	17
Abb. 9: Vorfertigung im Werk von Lehm Ton Erde, Schlins, Österreich.....	17
Abb. 10: Terminplanung der unterschiedlichen Herstellungsverfahren von Stampflehmelementen.....	19
Abb. 11: Sockeldetail tragende Wandkonstruktion aus Stampflehm.....	20
Abb. 12: Sturzdetaill tragende Wandkonstruktion aus Stampflehm	21
Abb. 13: Türsturzdetaill	22
Abb. 14: Türsturzdetaill tragende Wandkonstruktion aus Stampflehm	23
Abb. 15: Einbauteile	24
Abb. 16: Montageplan tragende Stampflehmwand und Lehm-Vorsatzschale,	25
Abb. 17: Musterwände.....	27
Abb. 18: Materialbox.....	28
Abb. 19: Trägerschalungssystem Doka.....	29
Abb. 20 (links): Mörtelkübel.....	29
Abb. 21 (rechts): Einbringsilo mit Füllschlauch	29
Abb. 22 (links): Ausharken und Homogenisieren des Rohmaterials in der Schalung.....	30
Abb. 23 (rechts): Lage Schalungsanker auf Schichtenlage abgestimmt	30
Abb. 24: Verdichtung mittels Rüttelplatte und Handstampfer.....	31
Abb. 25: Stürze und Betonpolster als Auflager	31
Abb. 26: Verzahnte Ausführung Wandabschnitt.....	32
Abb. 27: Schalung und Korsett der Stampflehmwand	32
Abb. 28: Witterungsschutz.....	33
Abb. 29: Lage der Bohrkernentnahmen zur Trocknungsüberwachung.....	34
Abb. 30: Zwischenergebnisse Trocknungsüberwachung Bauteil Forum nach 80Tagen	35
Abb. 31: Zwischenergebnisse Trocknungsüberwachung Bauteil Forum nach 100 Tagen.....	35
Abb. 32: Kostenverteilung Einheitspreisbildung Stampflehmwandkonstruktion je m ²	37
Abb. 33: Übersicht Klassifizierung Bauarten und Bauprodukte	39
Abb. 34: Prüfkörper	42
Abb. 35: Rohdichte Würfel bei 23°C / 80% r. F.	46
Abb. 36: Rohdichte Zylinder bei 23°C / 50% r. F.	47
Abb. 37: Anzahl, Abmessungen, Rohdichte, Druckfestigkeit, Variationskoeffizient in Abhängigkeit von der Schlankheit λ	47
Abb. 38: Gleichgewichtsfeuchte Würfel bei 23 °C / 80 % r. F.	48
Abb. 39: Gleichgewichtsfeuchte Zylinder bei 23 °C / 50% r. F.	49
Abb. 40: Materialfeuchten (Bauteilprüfkörper – 100 cm hoch, $\lambda = 2,5$), Querschnittsproben 1-7	50
Abb. 41: Schematische Feuchteverteilung über den Querschnitt der Wände	50
Abb. 42: Materialfeuchten (Bauteilprüfkörper - 100 cm hoch, $\lambda = 10,0$).....	51
Abb. 43: Verlauf des Feuchtegehaltes der Begleitwürfel W1 – W3 (Bauteilprüfkörper – 200 cm hoch, $\lambda = 13,3$)	51
Abb. 44: Materialfeuchten am Prüftag (Bauteilprüfkörper – 200 cm hoch, $\lambda = 13,3$).....	52
Abb. 45: Charakteristische Druckfestigkeiten nach DIN EN 1990:2021-10	52
Abb. 46: Mittelwerte der Spannungs-Dehnungslinie der Wand 2 und 3 (Bauteilprüfkörper – 100 cm hoch, $\lambda = 2,5$).....	53
Abb. 47: Feuchtegehalt, Rohdichte, Bruchlast und Druckfestigkeit (Bauteilprüfkörper – 100 cm hoch, $\lambda = 2,5$)	53

Abb. 48: Mittelwerte der Spannungs-Dehnungslinie der Wände 1 - 3 (Bauteilprüfkörper – 100 cm hoch, $\lambda = 10,0$).....	54
Abb. 49: Feuchtegehalt, Rohdichte, Bruchlast und Druckfestigkeit (Bauteilprüfkörper – 100 cm hoch, $\lambda = 10,0$)	54
Abb. 50: Mittelwerte der Spannungs-Dehnungslinie der Wände 1 - 3 (Bauteilprüfkörper – 200 cm hoch, $\lambda = 13,3$).....	55
Abb. 51: Feuchtegehalt, Rohdichte, Bruchlast und Druckfestigkeit (Bauteilprüfkörper – 200 cm hoch, $\lambda = 13,3$)	55
Abb. 52: Anzahl, Abmessungen, Rohdichte, Druckfestigkeit, Variationskoeffizient in Abhängigkeit von der Schlankheit λ	56
Abb. 53: Abhängigkeit von Schlankheit zu Druckfestigkeit	56
Abb. 54: E-Modul Zylinder	57
Abb. 55: Gesamtverformung, Spannung, E-Modul und Endkriechzahl der Zylinder	58
Abb. 56: Kriechverformungen der Zylinder (PS 1 bis PS 6) mit dem Mittelwert (MW) in Abhängigkeit der Zeit.....	58
Abb. 57: Vergleichswerte Rohdichte Würfel	59
Abb. 58: Vergleichswerte Rohdichte Zylinder.....	59
Abb. 59: Mittelwerte der Würfeldruckfestigkeit bei 23°C / 50% r. F.	59
Abb. 60: Mittelwerte der Zylinderdruckfestigkeit bei 23°C / 50% r. F.	60
Abb. 61: Mittelwerte der E-Module	60
Abb. 62 (links): Tabelle T 5-7 aus den Lehm bau Regeln	62
Abb. 63 (rechts): Auszug aus DIN 1053 (12/1952), Abschnitt 2.2 Aussteifung belasteter Wände.....	62
Abb. 64: Auflistung der konstruktiven Details des Prüfkörpers 1 (d = 220 mm).....	63
Abb. 65: Baustoffkennwerte des Prüfkörpers 1 (d = 220 mm)	64
Abb. 66: Auflistung der konstruktiven Details des Prüfkörpers 2 (d = 600 mm).....	64
Abb. 67: Baustoffkennwerte des Prüfkörpers 2 (d = 600 mm)	65
Abb. 68: Temperatur im Brandraum nach ETK für den Prüfkörper 1, d = 220 mm (links) und den Prüfkörper 2, d = 600 mm (rechts)	66
Abb. 69: Messstellenplan der Oberflächenthermoelemente im Bereich der Wandkonstruktion.....	67
Abb. 70 (links): Ansicht der feuerabgewandten Seite der Stampflehmwandkonstruktion d = 220 mm	68
Abb. 71 (rechts): Ansicht der feuerzugewandten Seite der Stampflehmwandkonstruktion d = 600 mm	68
Abb. 72: Pendelschläge nach Vollendung der 90. Minute zur Ermittlung der mechanischen Beanspruchung	68
Abb. 73: Beobachtungen während der Feuerwiderstandsprüfung vom 24.06.22 am Prüfkörper 1 (d = 220 mm).....	69
Abb. 74: Beobachtungen während der Feuerwiderstandsprüfung vom 26.08.22 am Prüfkörper 2 (d = 600 mm).....	70
Abb. 75: Vergleich der Prüfergebnisse des Prüfkörpers 1 (d = 220 mm) mit den Leistungskriterien ...	71
Abb. 76: Vergleich der Prüfergebnisse des Prüfkörpers 2 (d = 600 mm) mit den Leistungskriterien Quelle: MFPA Leipzig GmbH - Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH.....	72
Abb. 77: Temperaturdurchgang durch die Stampflehmwand (d = 220 mm) in der Mitte der Wand (Messleiter 3).....	73
Abb. 78: Rissbild der Stampflehmwand (d = 220 mm) auf der brandabgewandten Seite nach 90 Minuten Brandbeanspruchung vor dem 1. Pendelschlag (links) und nach dem 3. Pendelschlag (rechts)	74
Abb. 79: Temperaturdurchgang durch die Stampflehmwand (d = 600 mm) (Messleiter 1)	75
Abb. 80: Temperaturdurchgang durch die Stampflehmwand (d = 600 mm) (Messleiter 4)	76
Abb. 81: Abbrand der Mineralwolle in der oberen linken Ecke nach Ablösen von ca. 10 cm tiefen Wandabschnitten	76
Abb. 82: Nachweis des vertikalen Traglastwiderstandes mit aktuellen Werten	77

Prolog

Ökologisches Bauen

Der Baubranche wird etwa 60% des Ressourcenverbrauchs des Landes zugeordnet¹. Zudem ist die Bauindustrie für etwa 35% des Energieverbrauchs und einen großen Teil der CO₂-Emissionen in Deutschland verantwortlich². 8% des weltweiten, anthropogenen CO₂-Ausstoßes ist auf die Herstellung von Beton zurückzuführen³. Darüber hinaus verursacht die Bauindustrie rund 53% der deutschlandweit anfallenden Abfallstoffe⁴.

In der Vergangenheit konzentrierte sich nachhaltiges Bauen auf das Senken des Energieverbrauchs im Betrieb des Gebäudes. Durch optimierte Gebäudetechnik und Bauteile können sehr geringe Betriebsenergiebedarfe erreicht werden. Für eine ganzheitliche Reduzierung von schädlichen Umwelteinflüssen muss der gesamte Lebenszyklus des Gebäudes betrachtet werden. Insbesondere die grauen Emissionen, die bei der Herstellung des Gebäudes anfallen, nehmen einen immer größeren Anteil an der Gesamtbilanz ein.

Museumsbauten im Allgemeinen

Aufgabe von Museen ist das Forschen, Vermitteln, Bewahren und Sammeln von Kulturgütern. Kulturgüter stellen das kulturelle Erbe der Menschheit dar und spiegeln die gesellschaftliche Entwicklung wider. Das Konservieren dieser Kulturgüter ist eine Investition für nachfolgende Generationen und daher von besonderem öffentlichem Interesse. Aufgrund dessen werden Museumsbauten für eine lange Nutzungsdauer konzipiert und weisen in der Regel einen hohen architektonischen, baukulturellen und städtebaulichen Wert auf.

Um konservatorischen, raumklimatischen und musealen Anforderungen der Ausstellungsstücke gerecht zu werden, bedarf es in der Regel eines umfangreichen Einsatzes von Gebäudetechnik (Lüften, Kühlen, Heizen und Beleuchtung), der in der Regel mit hohen Energieverbräuchen und Kosten verbunden ist.

Aufgrund von möglichst flexibel nutzbaren Räumen weist der Museumsbau hohe bauphysikalische und konstruktive Anforderungen auf. Vor allem betrifft dies die Belastbarkeit, Dauerhaftigkeit und Tragfähigkeit, um große Spannweiten zu erreichen. Bauphysikalische Eigenschaften der Gebäudekonstruktion unterstützen klimatische Anforderungen. In der Regel wird dies durch Massivbauweisen u.a. aus zementbasierten Baustoffen ermöglicht, die aufgrund der Wärmespeicherfähigkeit auch zur Stabilisierung des Raumklimas beitragen. Eine Optimierung dieser konventionellen Bauweisen, welche mit einem hohen Energie- und Ressourcenverbrauch einhergehen, findet im Status quo der Museumsarchitektur im Wesentlichen nicht statt.

Aufgrund hoher baukonstruktiver und bauphysikalischer Anforderungen, einem hohen Material- und Energieeinsatz, einer überdurchschnittlichen Betriebsenergie auf der einen Seite sowie der öffentlichen Relevanz und der Funktion der Wissens- und Kulturvermittlung auf der anderen Seite, bietet der Museumbau ein großes Potenzial, die drängenden Klima- und Umweltthemen in das didaktische Konzept der Wissensvermittlung zu integrieren und eine Vorbildfunktion im nachhaltigen und effizienten Umgang mit Ressourcen einzunehmen.

Entwurf und Konstruktion des Freilichtmuseums Detmold

Wesentliche Aufgabe des Museumsneubaus ist die didaktische Vermittlung bauökologischer Zusammenhänge im historischen Kontext des Freilichtmuseums. Dabei bildet der 6.000 m² BGF umfassende Neubau eine Hülle für die historischen Ausstellungsobjekte und ein erlebbares Anschauungsobjekt für innovative, ökologische Baukultur zugleich. Das Museum bietet im Rahmen der „Museumspädagogik“ eine sozialwissenschaftliche Begleitung, innerhalb der Nachhaltigkeitsaspekte

¹ Vgl. Schwarzkopp, F., et al., S. 47

² Vgl. Sobek, W., S. 10 - 13

³ Vgl. Beyond Zero Emissions, S. 7

⁴ Vgl. Umweltbundesamt, S. 3

wie z.B. ressourcenschonendes Bauen, kontemporäre Baukultur, nachhaltiger Gebäudebetrieb, Nutzung von regionalen Baumaterialien und Umgang mit Ressourcen kommunizieren wird.

Das LWL-Freilichtmuseum in Detmold zeigt auf 90 Hektar insgesamt über 120 gebaute Zeitzeugen der westfälischen Baukultur. Traditionell wurde meist mit regionalen und nachwachsenden Rohstoffen gebaut. Anlass genug, für das neue Eingangs- und Ausstellungsgebäude konventionelle Baustoffwege zu verlassen. Der Neubau des LWL-Freilichtmuseums ist einer der ersten Museumsbauten mit einem ganzheitlichen Nachhaltigkeitskonzept. Basis des CO₂-neutral-bilanzierten Gebäudes für die Herstellungsphase ist die Wahl primärenergiearmer, recyclefähiger Baustoffe wie eine Tragstruktur aus Stampflehm mit lokaler Ressourcenverfügbarkeit, leim- und metallfrei verbundene Vollholzlammellenträger, eine zement- und damit CO₂-reduzierte Betonrezeptur und die Verwendung von Baustroh als Wärmedämmstoff. Für die Optimierung der Umweltwirkungen des Gebäudebetriebs erfolgt die Wärmeerzeugung über eine Wärmepumpe mittels Geothermie, die Zulufttemperierung wird durch eine adiabate Kühlung unterstützt. Das Niederschlagswasser wird gespeichert und beispielsweise in den WC-Anlagen als Brauchwasser wiederverwendet. Zur bilanziellen Deckung des gesamten Energiebedarfs des Gebäudes und einer Zusatzversorgung der gesamten Liegenschaft ist eine 400 kWp-große Photovoltaikanlage in das Dach integriert.

Das zweistufige, von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderte Forschungsprojekt mit dem Titel "ECOSIGHTS – NACHHALTIGES MUSEUM DETMOLD" zur Entwicklung von architektonischen und bauklimatischen Maßnahmen zum Bau und Betrieb nachhaltiger Museen begleitet die Planung und Ausführung, da für viele der ökologischen Ansätze normative Grundlagen noch nicht vorliegen. Ein Ergebnis wird dabei ein Handlungskatalog sein, der innovative Maßnahmen aus den Fachdisziplinen Architektur, Bauphysik, Bauklimatik, Energiesysteme und nachhaltige Komponenten für den Gebäudebau - begleitend zur architektonischen und fachspezifischen Bauplanung - identifiziert, quantifiziert und bewertet. Zudem wird die höchste Bewertungsstufe der DGNB mit Platin-Zertifikat angestrebt.

Entwurf

Der Siegerentwurf des 2018 entschiedenen Architektenwettbewerbs bildet den Übergang zwischen der öffentlichen Erschließungsseite und dem weitläufigen Gelände des Freilichtmuseums. Eine Freitreppe spielt zwischen den Gebäudekörpern mit der anspruchsvollen Topographie, sie bildet die Haupteinschließung zum Eingangsbereich des Freilichtmuseums. Die drei skulpturalen Baukörper leitende Besucher:innen wie „Trittsteine“ auf das Museumsgelände und fügen sich dabei harmonisch in die Landschaft des Teutoburger Waldes ein.



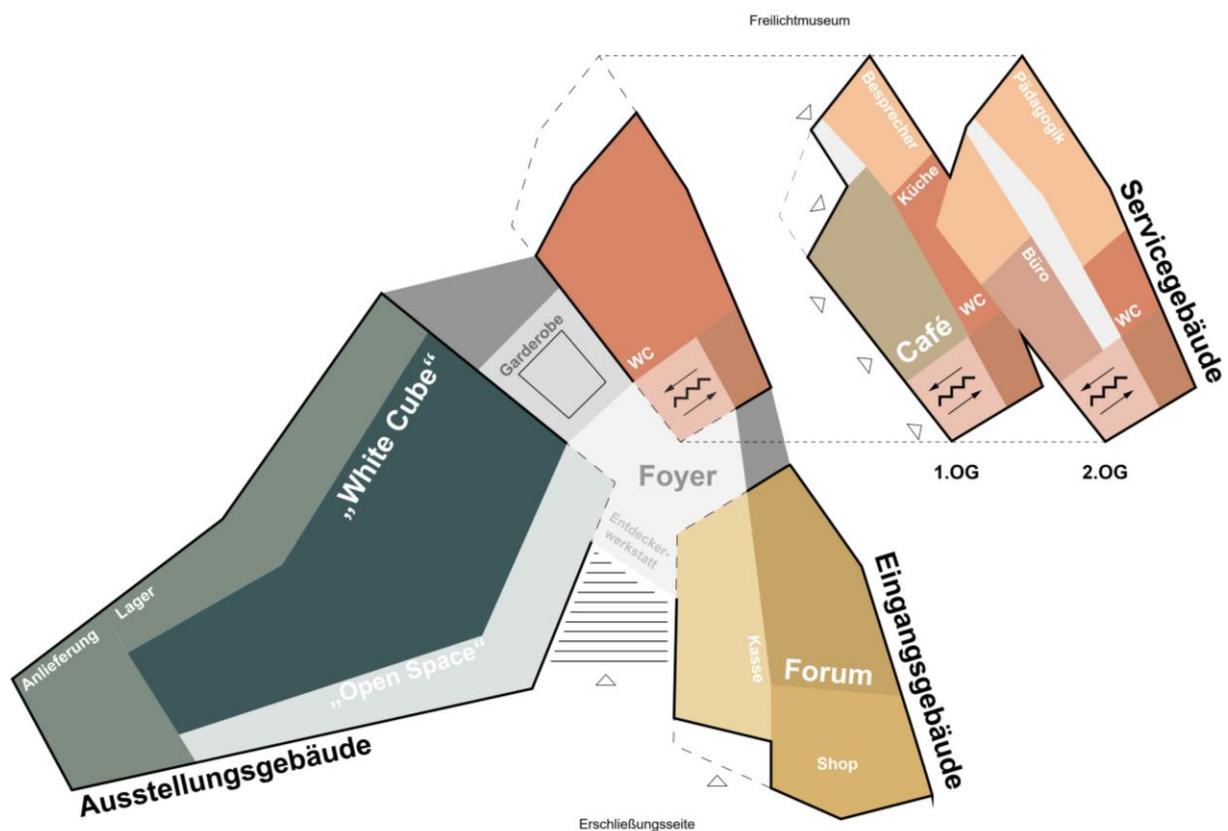
Abb. 1: Gebäudeensemble
Quelle: LWL / Hesterbrink / Pöler

Die Höhen und polygonalen Dachformen der Baukörper folgen spielerisch dem ansteigenden Gelände. Das zum Teil in die abfallende Topografie eingeschobene Erdgeschoss bildet den Sockel der drei aufgesetzten Baukörper.

Funktionale Gliederung

Um die Gebäudestruktur zu optimieren, wird das Ensemble in verschiedene Baukörper und Zonen unterteilt, die zusammengehörige Anforderungen an die Nutzung, das Raumklima, den Tageslichtbedarf und die solaren Erträge aufweisen. Aus diesen strukturellen Gegebenheiten resultieren entsprechend der drei Gebäudekörper drei übergeordnete Nutzungseinheiten:

- Eingangsgebäude mit Versammlungsnutzungen und öffentlicher Infrastruktur
- Ausstellungsgebäude mit den wesentlichen konservatorischen Anforderungen
- Servicegebäude mit museumsbezogener Infrastruktur sowie pädagogischem und kulinarischem Angebot



Erdgeschoss

Abb. 2: Aufteilung in Nutzungseinheiten

Quelle: ACMS Architekten GmbH

In stofflicher Interpretation historischer Fachwerkbauten bestehen die erdberührten Bauteile sowie das in die Topographie eingearbeitete Erdgeschoss aus mineralischen Baustoffen, im vorliegenden Fall aus Beton, welcher jedoch durch verschiedene Substitute wie Kalkstein- und Hüttensandmehl um 50% zementreduziert hergestellt ist und damit sowohl die CO₂-Prozess- als auch die Brennstoffemissionen beim Herstellungsprozess um 40% reduziert werden konnten.

Die polygonale Dachstruktur der drei teils mehrgeschossigen Baukörper besteht aus einem materialsuffizienten Skelett-Tragsystem. Dabei wird lediglich Holz aus einer nachhaltigen, regionalen Waldbewirtschaftung eingesetzt. In Rückbesinnung auf traditionelle Bauweisen wird erforscht, wie das gegenwärtige Bauen mit Holz über den gesamten Lebenszyklus ressourcenoptimiert werden kann. Ziel ist es, die verwendeten Materialien und Bauteile am Ende der ersten des Lebenszyklus einer möglichst hochwertigen Nachnutzung zuzuführen. Dies kann durch leim- und metallfreie, monomaterielle

Holzbauteile gefördert werden. Traditionelle Zimmermannsverbindungen werden mit Hilfe digitaler Bautechnologien als einstoffliche Holz-Holz-Verbindungen mit CAD, CAM und CNC realisiert.

In den Holzgefachen der Gebäudehülle wird Baustroh als Dämmstoff eingesetzt. Als Abfallprodukt aus der Landwirtschaft kann dieses einer hochwertigen, langfristigen Nachnutzung zugeführt werden. Baustroh ist flächendeckend verfügbar, kann emissionsarm und technisch leicht als Baustoff eingesetzt werden und bietet dazu aufgrund der hohen Rohdichte große Potentiale für den nutzungstypologisch wichtigen sommerlichen Wärmeschutz.

Ein wesentlicher baustofflicher Fokus liegt auf den massiven, tragenden und in Wandlängsrichtung aussteifenden Innenwänden des Gebäudes. Dabei werden 60 cm starke, bis zu acht Meter hohe Wände aus monomateriellem Stampflehm zum einen in traditioneller Ortbauweise, zum anderen als großformatige, vor Ort vorgefertigte Elemente eingesetzt. Sowohl die ökologischen Potentiale des nahezu flächendeckend in Deutschland verfügbaren Rohstoffs, als auch die bauphysikalischen Materialeigenschaften spielen für die Errichtung und den Betrieb eine zentrale Rolle, die auch im weiteren Forschungsprojekt untersucht wurde. Dank seiner emissionsarmen Aufbereitung vom Rohstoff zum Baustoff, seiner Recyclingfähigkeit aufgrund der Monomaterialität und den hervorragenden wärme- und feuchtespeichernden Eigenschaften scheint das Material prädestiniert für die Verwendung in Museumsbauten.

6.1 Zusammenfassung

Dieses Arbeitspaket des Forschungsprojekts beschäftigt sich mit der Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für die Umsetzbarkeit ökologischer Konstruktionen bei Großprojekten mit dem Material Lehm. Dabei geht es im Detail sowohl um die planerischen Anforderungen, die mechanischen und brandtechnischen Eigenschaften sowie die Besonderheiten des Herstellungsprozesses für eine Verwendbarkeit in tragenden Wandkonstruktionen beim Neubau des Eingangs- und Ausstellungsgebäudes im Freilichtmuseum (FLM) Detmold.

Für Planende sowohl aus der Objektplanung als auch aus den Fachdisziplinen Tragwerksplanung, Bauphysik und Brandschutz ergeben sich dafür jedoch noch große Unsicherheiten aufgrund weniger verfügbarer normativer Grundlagen und Literatur. Die Anforderungen an die Objektplanung in Bezug auf den Entwurf, die Planung, die Vergabe der Bauleistung und den späteren Bauprozess für tragende Bauteile aus Stampflehm sind deutlich komplexer als aus konventionellen Bauweisen bekannt. Anders als bei konventionellen, fehlertoleranten Bauweisen meint die Objektplanung dabei in allen Projektstadien die Planung der Ausführung, nicht des Ergebnisses.

Der konzeptionelle Ansatz, tragende Konstruktionen aus Stampflehm einzusetzen, beruht auf der Idee, mit historische Baumaterialien, die aufgrund ihrer guten Ressourcenverfügbarkeit ökologisch vom Rohstoff zum Baustoff aufbereitet werden können, eine Analogie zum historischen Gebäudebestand des Freilichtmuseums zu schaffen und zugleich die hervorragenden tragenden und bauphysikalischen Eigenschaften des Lehms für eine museale Nutzung auszuschöpfen.

Die planerische Entscheidung zur Verwendung einer konventionellen Ortbauweise der tragenden Stampflehm-Innenwände resultiert vor allem aus den terminlichen Abhängigkeiten des Gesamtprojektablaufs mit einer Fertigstellung der Vorleistungen im April und einer termingerechten Vergabe im 1. Quartal, sodass die Lehmarbeiten idealerweise in der frostfreien Periode ausgeführt werden können. Eine Vorfertigung vor Ort hätte zudem die Kapazitäten der Baustelleneinrichtungsfläche für die Lagerung der knapp 1.000 Fertigteile überlastet. Eine zentrale Vorfertigung in Schlins, Österreich, hätte aufgrund des Ziels, lokal verfügbaren Lehm zu verwenden, zu hohen Transportemissionen geführt.

Die Ausführung und Verarbeitung der knapp 1.000 t Rohmaterial ist geprägt durch den organisatorischen Feuchteschutz in Verbindung mit den hydrophilen Eigenschaften des Materials. Die Feuchtigkeitsentwicklung vom Einbauzustand bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte bestimmen den Bauprozess und bedürfen einer kontinuierlichen Überwachung und Kontrolle. Gleichzeitig kommen Maßnahmen zur Verhinderung unkontrollierten Eindringens von Feuchtigkeit oder gegen Frostschäden eine hohe Bedeutung zu.

Aufgrund noch fehlender normativer Grundlagen im Stampflehm-Bau wurden die Standsicherheitsnachweise der Wandkonstruktionen in Anlehnung an die Mauerwerksnorm DIN EN 1996-1-1 bzw. mit statischen Modellen geführt. Die Untersuchung der materialspezifischen Eigenschaften erfolgte sowohl an Kleinprüfkörpern als auch an großformatigen Bauteilprüfkörpern verschiedener Geometrien und Dimensionen. Insbesondere die Erkenntnisse der großformatigen Bauteilprüfkörper liefern dabei wichtige Informationen zum bereits erwähnten Feuchte- und Trocknungsverhalten und zur Imperfektion in Abhängigkeit zur absoluten Schlankheit größerer Wandkonstruktionen aus Lehm für den Bauprozess. Bei Prüfwänden mit geringeren Schlankheiten hat sich gezeigt, dass die maximale Druckfestigkeit um rund 1/3 abnimmt, wenn die Ausgleichsfeuchte nicht erreicht ist. Der Variationskoeffizient resultierend aus der absoluten Schlankheit des Bauteils steigt unter 20cm Bauteildicke um jeweils 50% bei 25%iger Querschnittsabnahme. Während bei den kleinformatischen Prüfkörpern Druckfestigkeiten an Würfeln i. M. von 3,47 N/mm² oder Zylindern i.M. von 2,49 N/mm² ermittelt wurden, liegen die Druckfestigkeiten mit Einfluss der nächsthöheren Schlankheit $\lambda = 2,5$ bei 1,76 N/mm². Bei $\lambda = 10$ liegen die Ergebnisse i. M. bei 1,57 N/mm² und $\lambda = 13,3$ bei 1,18 N/mm². Zum Kriechverhalten von Lehm liegen ebenfalls bisher keine detaillierten normativen Regelungen vor, sodass auf die Festbetonnorm (DIN EN 1992-1-1 /DIN EN 1992-1-1/NA, Abschnitt 3.1.4.) zurückgegriffen wurde. Das horizontale und vertikale Endschwindmaß wurde mit einer Endkriechzahl i.M. von 4,4 und einer Endkriechdehnung i.M. von 1,08 ‰ ermittelt.

Neben den tragkonstruktiven Anforderungen wurde im Weiteren das Brandverhalten untersucht. Da sich die Angaben in den „Lehmbau Regeln“ Kapitel 5.5.2 ausschließlich auf zurückgezogene Normen beziehen und bauordnungsrechtlich nur für Wohngebäude der Gebäudeklasse 1 und 2 eingeführt sind, waren Brandversuche an Bauteilprüfkörpern erforderlich. An zwei 3m hohen Prüfwänden mit der geplanten Wanddicke 600 mm und 220 mm in Abhängigkeit zur relativen Schlankheit der realen Wandhöhe von 13,3 wurden in der MFPA Leipzig das Verhalten von Lehmkonstruktionen in Bezug auf das Tragverhalten, den Raumabschluss und die Wärmedämmung bei einseitiger Brandbeanspruchung untersucht. Aufgrund der erzielten Prüfergebnisse ergibt sich für die angegebenen Parameter eine Feuerwiderstandsdauer von 102 Minuten, so dass die Feuerwiderstandsklasse REI90-M erfüllt und das Material bedenkenfrei für den vorgesehenen Verwendungszweck als tragende Innenwandkonstruktion verwendbar ist.

6.2 Einleitung

Die Verwendung des Baustoffs Lehm hat eine weitreichende Tradition. Über die deutschen und europäischen Grenzen hinaus wird das Material für tragende Konstruktionen schon seit über 10.000 Jahren eingesetzt. In Deutschland hingegen erfuhr das Material eher bei raumbekleidenden Fachwerkkonstruktionen eine Breitenanwendung. Lediglich in der Phase der Rohstoffknappheit der Nachkriegszeit der 1950er Jahre wurde mangels Alternativen vermehrt Lehm als Baustoff eingesetzt. In der gleichen Zeit entstanden mit der „Lehmbauordnung“ erste normative Bemühungen zur Regulierung des Lehmbaus in Deutschland. Die normativen Entwicklungen im Bereich des Lehmbaus zur Schaffung planerischer Grundlagen wurden mit Verschwinden des Lehmbaus im kommerziellen Bereich in den 1970er Jahren jedoch ersatzlos wieder zurückgezogen. Erst mit steigendem Bewusstsein der ökologischen Verantwortung des Bausektors in den 1990er Jahren rücken emissionsarme Baustoffe wie Lehm wieder in den Fokus.

Dabei haben sich die Grundcharakteristika des Rohstoffs Lehm über den gesamten Anwendungszeitraum nicht verändert. Diese Charakteristika des Materials prägen auch heute noch die Planung, Bemessung und Umsetzung. Den hydrophilen Eigenschaften kommt dabei in allen Projektstadien eine besondere Bedeutung zu. Aufgrund dieser bereits im ersten Teil des mehrstufigen Forschungsberichts evaluierten Potentiale erweisen sich in der Nutzungsphase witterungsgeschützte Innenwände mit späterer Sichtanforderung als besonders geeignet für tragende Anwendungsbereiche.

Die „Lehmbau Regeln“ bieten für kleinere Vorhaben der Gebäudeklasse 1 und 2 eine planerische Grundlage, die auch in den Grundzügen auf größere Projekte wie das Eingangs- und Ausstellungsgebäude anwendbar sind. Insbesondere für die Planung der Ausführung von derartigen oder vergleichbaren Großprojekten reichen die Ansätze jedoch nicht aus. Fragestellungen wie das Herstellungsverfahren der Lehmwände, die nutzungsspezifische Detailplanung in Abhängigkeit zur Fertigungsart, die gewerkespezifischen Bedarfe an Baustellenlogistik und erforderlicher Infrastruktur und nicht zuletzt der Bauprozess einschließlich der gewerkeübergreifenden Schnittstellen und notwendigen Qualitätssicherung bedürfen sorgfältiger projektspezifischer Planung.

In dem vorliegenden Kapitel werden die Untersuchungen einschließlich der Erkenntnisse und Ergebnisse zum Einsatz von tragenden Stampflehm-Innenwänden hinsichtlich der planerischen Anforderungen, des Herstellungsprozesses sowie mechanischen und brandtechnischen Eigenschaften beschrieben, ausgelotet und erläutert.

Die bauphysikalischen Untersuchungen und Ergebnisse sind nicht Bestandteil dieses Kapitels und sind im Kapitel 1, Lehm als Baustoff, enthalten.

6.3 Planen und Errichten von Stampflehmwänden

6.3.1 Entwurfsprozess tragender Stampflehmkonstruktionen

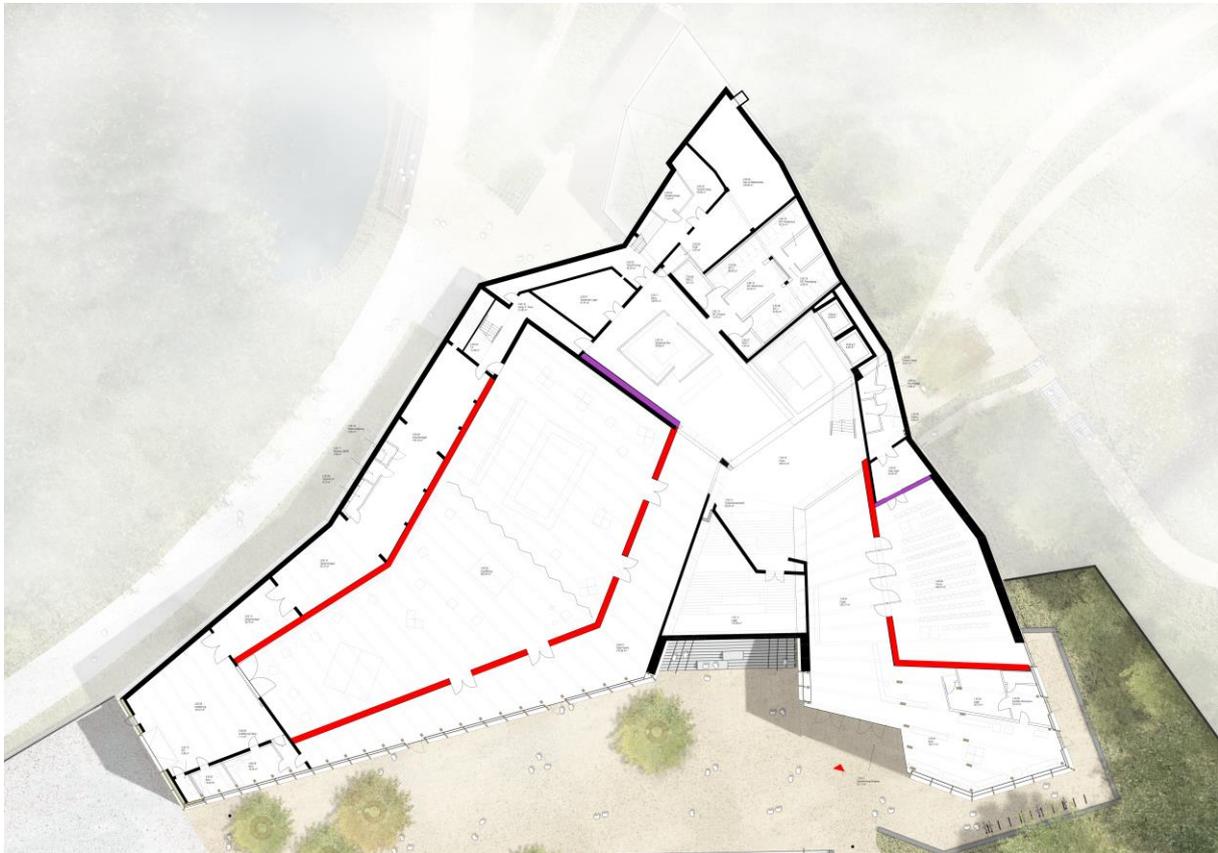


Abb. 3: Grundriss Erdgeschoss, tragende Stampflehmwände in Rot, Lehm-Trockenbau in Violett
Quelle: ACMS Architekten GmbH

Neben städtebaulichem Konzept, Form- und Raumbildung ordnet sich die Materialwahl in die Reihe der Entwurfsparameter der Architektur ein. Eigenschaften wie Tragfähigkeit, Bauphysik und vor allem die Gestaltung bedingen die Materialzuordnung einzelner Elemente. Die Anforderungen an Tragfähigkeit und Aussteifung resultieren meist in der Ausformulierung massiver Wandscheiben und weniger in aufgelösten Stützenkonstruktionen mit aussteifenden Zusatzkomponenten. Häufig findet die Auswahl zwischen Stahlbeton als Komposit-Baustoff, Mauerwerk oder Massivholzbau statt. Stellt die Nutzung hohe gestalterische Anforderungen, liegt die Lösung meist im Sichtbeton oder in Wandscheiben aus Sichtholz. Anforderungen an die Dauerhaftigkeit und Feuchteinwirkung, dauerhafter Witterungsbeanspruchung oder Brandschutz schränken die Baustoffwahl weiter ein. Nicht zuletzt unter ökonomischen Gesichtspunkten stellt der Betonbau häufig eine besonders wirtschaftliche Möglichkeit dar, technische und gestaltprägende Anforderungen zu vereinen.

Ähnlich zum Sichtbeton schafft der Stampflehm monolithisch eine Fertigoberfläche, die haptisch vom Herstellungsprozess geprägt ist und vollkommen unbehandelt bleiben kann. Anders als beim Sichtbeton handelt es sich jedoch aufgrund der hydrophilen Eigenschaften des Lehms um eine reversible Oberfläche, die im Zuge der Nutzungsphase oder notwendiger Umnutzungen leicht saniert werden kann.

Bei ähnlich guten wärmespeichernden Eigenschaften wie bei mineralischen Bauweisen besitzt der Lehm zudem das hygrische Potential der passiven Regulierung des Raumklimas, was insbesondere konservatorischen Nutzungsanforderungen aber auch gesamtheitlich baubiologische Vorteile vereint.

Das Eingangs- und Ausstellungsgebäude des Freilichtmuseums in Detmold ist aufgrund seiner Nutzungsanforderungen vor allem im Erdgeschoss durch große, weit spannende Raumgefüge geprägt. Von Besucher:innen hoch frequentierte Bereiche wie der Ausstellungsraum, der Open-Space Bereich, das Foyer sowie das Forum bleiben aufgrund der Stützenfreiheit frei bespielbar und flexibel nutzbar. Massive, opake Wandscheiben (vgl. Abb. 3 in Rot markiert) trennen die angrenzenden Nutzungen sinnvoll und erfüllen die notwendige Tragfähigkeit und Aussteifung. Ihre monolithische Erscheinung stärkt den Raum und seine Grenzen. Um die wichtige Bedeutung der raumbildenden, wegeleitenden, tragenden und aussteifenden Flanken im Museumsbau hervorzuheben, sollen diese Wände auch eine gestaltprägende Funktion erhalten. In Analogie zu den historischen Bauten im Freilichtmuseum und aus ökologischen Gründen wird auf den Einsatz von Sichtbeton an diesen Stellen verzichtet. Stattdessen wird mit dem Erstellen von Stampflehmwänden eine hohe, der Museumsnutzung gerecht werdende gestalterische Qualität erreicht, die zudem didaktisch den Herstellungsprozess ablesbar belässt.

Bereits beim Eintreten in das Gebäude nehmen die Besucher:innen die bis zu acht Meter hohen Stampflehmwände im Foyer wahr. Zudem kreieren diese einen außergewöhnlichen Charakter innerhalb des sich anschließenden Forums. Der großzügige Ausstellungsraum sowie der angrenzende Open-Space-Bereich erhalten ebenso durch die besondere Erscheinung des Stampflehms eine auffällige Erscheinung. Die großformatigen transparenten Gebäudeabschlüsse nach Süden ermöglichen bereits einen Blick auf die Stampflehmkonstruktionen von außen.

Neben den gestaltprägenden Funktionen übernehmen die Wände bauphysikalisch regulierende Funktionen, die aus klimakonservatorischen Anforderungen notwendig sind. Zudem erfüllen sie wichtige technisch-konstruktive Anforderungen. Die Wände werden als massive, tragende und in Wandlängsrichtung aussteifende Innenwände eingesetzt. Im Zuge dieses Projektes wurde bewusst darauf verzichtet, Stampflehm in der Außenhülle einzusetzen, um so Zusatzmaßnahmen, die vor witterungsbedingter Erosion schützen, vermeiden zu können.

6.3.2 Stampflehmbauweisen im Vergleich

Konstruktionen in Stampflehm können auf unterschiedliche Arten hergestellt werden. Der Bauprozess ist maßgeblich geprägt durch die Wahl des Herstellungsverfahrens der Wandkonstruktion. Hierbei wird grundsätzlich zwischen großformatigen, vorgefertigten Elementkonstruktionen und einer konventionellen Ortbauweise differenziert. Nachfolgend werden die Ortbauweise, die dezentrale Vorfertigung auf der Baustelle, die Vorfertigung im Werk sowie die robotische Vorfertigung vorgestellt. Die unterschiedlichen Herstellungsverfahren haben weitreichende Auswirkungen auf den Planungs- und Realisierungsprozess.

Entscheidend bei der Ausführung ist - wie auch bei der Planung der Ausführungsdetails - die Berücksichtigung von Feuchtigkeit. Maßgeblich für die Terminplanung von tragenden Lehmwandkonstruktionen ist die Berücksichtigung des Trocknungsprozesses. Der Wassergehalt von Einbaufeuchte bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte reduziert sich um fast 80%. Zudem gilt es, den Lehm während des Trocknungsprozesses vor Bewitterung und Frost zu schützen. Aufgrund dessen ist es notwendig, den Bauprozess sowohl innerhalb einer geeigneten Jahreszeit zu planen als auch in Abhängigkeit mit den Folgegewerken die Trocknungszeiten zu gewährleisten. Die Verfestigung von Lehm basiert auf der Abgabe von Wassermolekülen durch Austrocknung an der Luft. Da der Prozess durch Trocknen rein physikalisch stattfindet, bleiben plastischer und harter Lehm stofflich identisch. Wichtig zu beachten ist das Schwindverhalten durch den Wasserverlust, welches zu Rissbildung führen kann.

6.3.2.1 Ortbauweise

Bei der Ortbauweise wird in ein nach den projektspezifischen Anforderungen individuell geplantes, formgebendes Schalungssystem das Rohmaterial lagenweise in Schichtdicken von 10-15 cm eingebracht und auf die Endhöhe von ca. 8-10 cm verdichtet. Je nach Größe und Länge der Wandkonstruktionen wird die Wand in mehreren Längenabschnitten und mehreren Höhentakten erstellt.

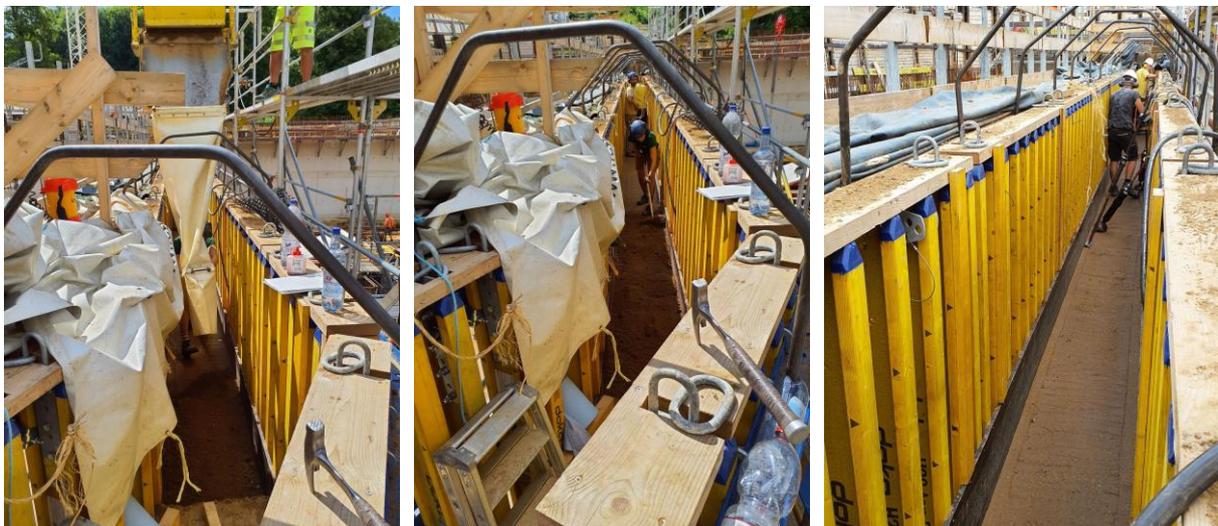


Abb. 4: Verdichten des Stampflehms
Quelle: ACMS Architekten GmbH

6.3.2.3 Vorfertigung vor Ort

Eine Vorfertigung von Stampflehmelementen vor Ort findet ähnlich zur konventionellen Ortbauweise statt. Eine sogenannte Feldfabrik besteht aus einer witterungsgeschützten Arbeitsebene, von der Material in eine darunter befindliche Schalung eingebracht wird. Die Dimension einzelner Elementtakte richtet sich dabei nach den baustellenseitigen Gegebenheiten, vor allem nach der zur Verfügung stehende Baustellenfläche, einer günstigen Kranandienung sowie insbesondere den projektspezifischen Geometrien der Bauteile. Geeignete Flächen für eine Feldfabrik sollten ausreichend aufbereitet, tragfähig und eben sein, um unplanmäßigen exzentrischen Lasteintrag im

Verdichtungsprozess zu vermeiden. Das Ein- und Ausschalen kann bei kleineren Konstruktionen per Hand, per Förderfahrzeug, oder - wie beim Projekt in Detmold - mit einem ortsfesten Baukran erfolgen. Bei längeren, vorgefertigten Wandsträngen können diese nachträglich mittels Säge abgelängt werden.



Abb. 5 (links): Dezentrale Vorfertigungsstraße: Schalungsebene
Quelle: ACMS Architekten GmbH

Abb. 6 (rechts): Dezentrale Vorfertigungsstraße: Material-Einbring-Ebene
Quelle: ACMS Architekten GmbH

Das Zwischenlagern für den Trocknungsprozess bis zum endgültigen Erhärten sollte an geeigneter Stelle zwischen Feldfabrik und Einbauort erfolgen. Auch Lagerplätze sollten insbesondere zur Lagesicherheit eine ebene Fläche aufweisen. Die Lagerung hat in jedem Fall witterungsgeschützt zu erfolgen, sowohl gegenüber Niederschlag als auch, wie auf Abb. 7 dargestellt, gegen stehendes, von unten einwirkendes Wasser.



Abb. 7: Lagerung der vorgefertigten Elemente vor Ort
Quelle: ACMS Architekten GmbH

Mit dieser Technik können sehr schlanke Wände von nur 15-20 cm Wandstärke hergestellt werden. Das Versetzen der auf der Baustelle vorgefertigten Stampflehelemente findet mittels Krans statt.



Abb. 8: Montage vorgefertigter Stampflehmelemente
Quelle ACMS Architekten GmbH

Die getrockneten Fertigteile werden lagenweise mit einer Lehmörtelschicht verbunden. Bei größeren Wandhöhen ist auf eine ausreichende Zwischenhärtung des Lehmörtels zu achten, um unkontrollierte Setzungen in den Fugen zu vermeiden. In der Nachbehandlung der versetzten Fertigteile müssen die Fugen der einzeln angebrachten Stampflehmabschnitte geschlossen und retuschiert werden, damit eine homogene Oberfläche entsteht.

6.3.2.4 Vorfertigung im Werk

Trotz vergleichsweise geringer Materialkosten, einer einfachen Aufarbeitung des Rohmaterials und der technisch unkomplizierten Herstellung von Stampflehmteilen ist der Prozess auf der Baustelle mit einem hohen technischen und wirtschaftlichen Aufwand verbunden. Durch die Substitution des händisch geführten Stampfers mit automatisierten und maschinellen Stampfern kann zwar der Arbeitsprozess effizienter gestaltet werden, jedoch bleibt der Zeitaufwand weiterhin hoch. Das macht den Stampflehm in Ortbauweise im Vergleich zu einer konventionellen Massivbauweise deutlich kostenintensiver.



Abb. 9: Vorfertigung im Werk von Lehm Ton Erde, Schlins, Österreich
Quelle: Martin Rauch - Lehm Ton Erde Baukunst GmbH

Die maschinelle und serielle Vorfertigung im Werk ist daher für den bis dahin von traditionellen und handwerklichen Fertigungsmethoden geprägten Stampflehmbau eine Revolution, die viele Verbesserungen hinsichtlich der Qualität und Wirtschaftlichkeit mit sich bringt. Bei der automatisierten Vorfertigung im Werk kommen Maschinen zum Einsatz, die in eine vorab gestellte Schalung das Rohmaterial einfüllen und gleichzeitig verdichten. Durch eine hohe Produktivität und reduzierten Personaleinsatz steigert sich die Effizienz. Es können ebenso wie bei der Vorfertigung vor Ort sehr schlanke Bauteile produziert werden. Im Vergleich zur Herstellung der Stampflehmelemente vor Ort findet eine deutliche Verringerung der Bauzeit vor Ort mit entsprechenden Platzbedarfen statt. Die schnelle Montage der Fertigteile macht den gesamten Bauprozess leichter koordinier- und planbar, so dass die verschiedenen Gewerke effizient zusammenarbeiten können (vgl. Kapitel 6.3.2.6). Ein großer Vorteil der Vorfertigung im Werk ist außerdem die Unabhängigkeit von Witterungseinflüssen, die bei der Trocknung von Lehmbauteilen von großer Bedeutung ist. Bei großen Projekten kann es sinnvoll sein, die Fertigungsanlagen nahe der Baustelle zu errichten, um Transportwege zu sparen und gleichzeitig lokale Baustoffe zu nutzen⁵.

6.3.2.5 Robotische Vorfertigung

Die Universität Braunschweig forscht seit 2016 an digitalen und robotischen Fertigungstechniken von Stampflehmteilen. Die Forschung zeigt, dass die Produktion von großformatigen Bauteilen aus Stampflehm hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit, Qualität und Produktionstechnik optimierbar ist. Eine neue, robotergestützte Fertigungstechnik basiert auf der Idee, die Arbeitsschritte des lageweisen Verdichtens und der Schalungsmontage (Gleitschalung) zusammenzufassen und zu automatisieren.

Dabei bewegt der Roboterarm das Schalungssystem gemeinsam mit der Materialzufuhr und dem Verdichtungswerkzeug (digital gesteuerte Rüttelplatte). Dadurch entfällt der aufwändige Prozess des Versetzens der Kletterschalung sowie die Materialkosten des Schalungssystems. Das Problem der höheren Kosten von Stampflehm Bauweise im Vergleich zu anderen Massivbauweisen kann durch die Optimierung von Fertigungsverfahren verringert oder sogar behoben werden⁶.

6.3.2.6 Terminplanung der unterschiedlichen Herstellungsverfahren

Die unterschiedlichen Herstellungsverfahren der Stampflehmwände haben maßgebliche Auswirkung auf den Bauablauf. Zudem bedingt die Wahl des Herstellungsverfahrens auch eine termingerechte Vergabe der Leistungen. Die weitverbreitete Haltung, dass die Vorfertigung pauschal die Realisierung signifikant beschleunigt, kann lediglich für die Arbeiten vor Ort bestätigt werden, die Gesamtausführungsdauer des Lehmbaus hingegen verkürzt sich pauschal nicht. Dies liegt zum einen an einer notwendigen, längeren Arbeitsvorbereitung bei der Vorfertigung, insbesondere der Montageplanung, und dem daraus resultierenden, späteren Produktionsbeginn. Zum Zweiten ergeben sich durch die Elementfugen ca. 50% höhere Aufwendungen für die optische Retusche, als bei der monolithischen Ortbauweise, in welcher lediglich die Ankerlöcher geschlossen und Fehlstellen nachbearbeitet werden müssen (vgl. Abb. 10).

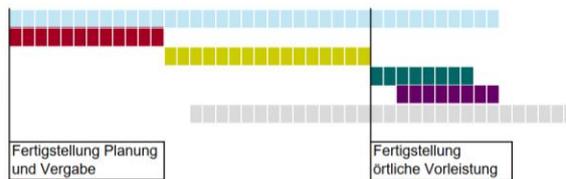
⁵ Vgl. Kapfinger, O. und Sauer, M., S. 118

⁶ Vgl. Reese, M., Woehrlin, S.

Herstellungsverfahren von Stampflehmwänden

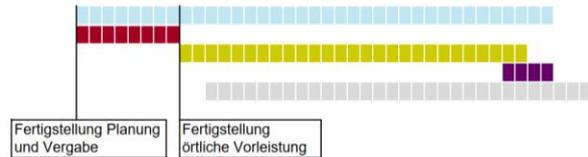
Vorfertigung	m ²	Tage	Wochen
Ausführungszeit, gesamt (ohne Trocknung)			38
Vorbereitung		60	12
Produktion	1000	80	16
Versetzen	1000	40	8
Nachbearbeitung		40	8
Trocknung*		210	30

Saisonale Abhängigkeit: keine



Vor-Ortbauweise	m ²	Tage	Wochen
Ausführungszeit, gesamt (ohne Trocknung)			37
Vorbereitung		40	8
Herstellung	1000	135	27
Nachbearbeitung		20	4
Trocknung*		210	30

Saisonale Abhängigkeit: Herstellung in Frostperiode nicht möglich



*Orientierungswert, vgl. Kapitel 6.3.5.6

Abb. 10: Terminplanung der unterschiedlichen Herstellungsverfahren von Stampflehmelementen
Quelle: ACMS Architekten GmbH

Eine zeitliche Optimierung durch die Vorfertigung ergibt sich insbesondere aber dann, wenn die Arbeitsvorbereitungsprozesse aufgrund einer frühzeitigen Planung und Vergabe schon vorgezogen durchgeführt werden können und auf der Baustelle die notwendigen Vorleistungen erstellt werden (vgl. Abb. 10). Alternativ ergeben sich zeitliche Optimierungspotentiale, wenn der Projekttablauf Fertigungszeiten für den Lehm- oder Ziegelbau außerhalb der frostfreien Periode bedingt, die nur in frostfreien Innenräumen sichergestellt werden können. Die terminlichen Gesamtprojektzusammenhänge gilt es daher bereits in der Entwurfsplanung zu evaluieren und die Herstellung des Lehmbaus auf den Projekttablauf abzustimmen.

Unabhängig hingegen von der Fertigungsart ist der Trocknungsprozess. Da dieser von diversen Faktoren abhängt (vgl. Kapitel 6.3.5.6) und über mehrere Monate andauern kann, ist im Bauprozess davon auszugehen, dass relevante Zwischenschritte wie das Versetzen von Fertigteilen, aber auch der Beginn der Folgegewerke bereits vor dem Erreichen der Ausgleichsfeuchte durchgeführt werden müssen. Andernfalls entstehen Bauprozessunterbrechungen, die sowohl terminlich als auch von den Vorhaltekosten für Infrastruktur und Schutzmaßnahmen nicht tragbar sind.

6.3.3 Lehmbau im Detail

Im Neubau des Freilichtmuseums Detmold sind ca. 60 cm starke bis zu 8 m hohe Innenwände aus reinem Stampflehm geplant, die als konventionelle Ortbauweise gefertigt werden (vgl. Abschnitt 6.2.1). Im folgenden Kapitel werden neben allgemeinen Konstruktionen vor allem die realisierten Details und die technisch gestalterischen Hintergründe vorgestellt.

Im Freilichtmuseum Detmold werden die Wände als massive, tragende und in Wandlängsrichtung aussteifende Innenwände eingesetzt. Insgesamt wurden bei dem Bauvorhaben Wände mit einer Abwicklungslänge von 140 m und einem Volumen von knapp 500 m³, also einem Trockengewicht von ca. 1.000 t, verbaut. Aufgrund der Gebäudeklasse 3 sind an tragende und aussteifende Bauteile gemäß der Bauordnung NRW Anforderungen an den Brandschutz in der Qualität „feuerhemmend“ gestellt (vgl. Kapitel 6.6). Da im vorliegenden die Anforderung jedoch nur an tragkonstruktive, nicht aber an die raumbegrenzenden Funktionen des Bauteils gerichtet sind, haben die Brandschutzanforderungen auf die weitere Detailplanung der Lehmbaukonstruktion keine Auswirkungen. Die Berücksichtigung von weitergehenden brandschutztechnischen Belangen kann nochmals zu zusätzlichen Maßnahmen führen, insbesondere im Bereich von Durchdringungen und Öffnungen, auf die im Nachfolgenden aufgrund fehlender Projektrelevanz aber nicht eingegangen wird.

Das Rohmaterial beim Realisierungsprojekt in Detmold ist unbewehrter Lehm. Aus Gründen fehlender Datengrundlagen für die Bemessung wurde auf flächige Armierungen jeglicher Art in der Grundkonstruktion verzichtet. Lediglich im Bereich von Bauabschnitten wurden konstruktiv Geogitter zur Rissminimierung verwendet; die Rissminimierung hat jedoch reine gestalterische und keine statische Relevanz (vgl. Kapitel 6.3.5).

Entscheidend für die Planung der Wandkonstruktionen im Detail sind die wasserlöslichen Eigenschaften des Lehms. Die „Lehmregeln“ fordern bei dem Entwurf und der Planung von tragenden Wänden aus Lehmbaustoffen die Berücksichtigung der Baustoffeigenschaften und des Herstellungsverfahrens⁷. Dabei kommt neben den späteren Wassereinwirkungen aus der Nutzungsphase auch dem organisatorischen Schutz der Konstruktion in der Bauphase eine besondere Bedeutung zu.

6.3.3.1 Fußpunkt / Wandsockel

Der Wandsockel ist dabei, ähnlich wie beim Holzbau, der zu allen Phasen am stärksten beanspruchte Bereich. Dementsprechend sind, um den Spritzwasserschutz in der Bauphase zu gewährleisten, grundsätzlich alle Wände aus Stampflehm auf einem 15-20 cm hohen Stahlbetonsockel zu errichten, um die Einwirkung von Wasseransammlungen auf der Bodenplatte in den Wandsockel zu verhindern.

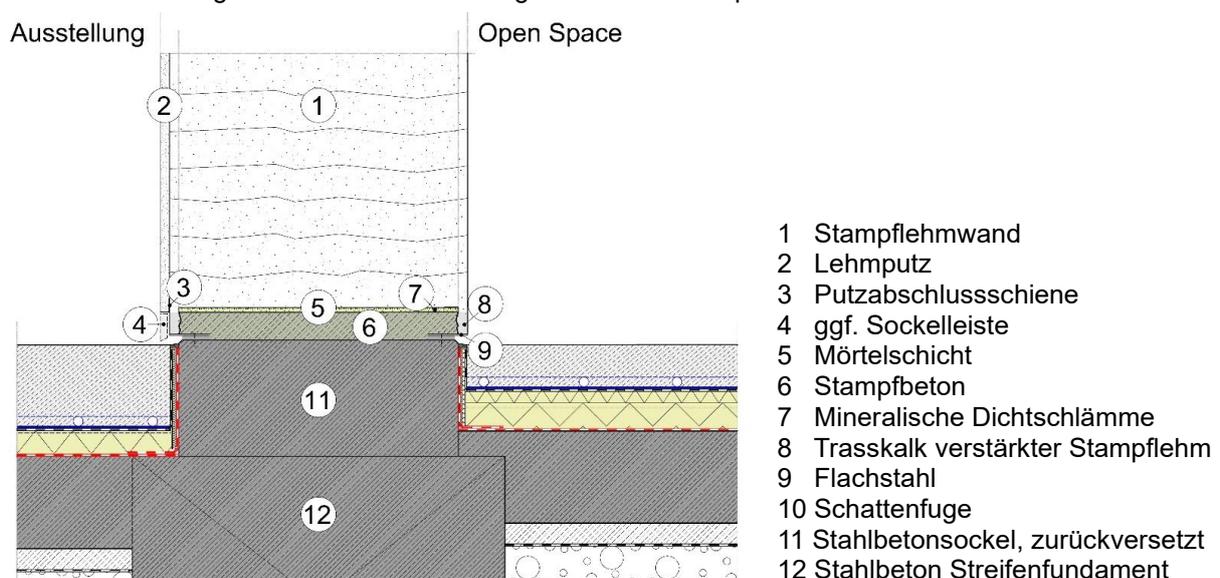


Abb. 11: Sockeldetail tragende Wandkonstruktion aus Stampflehm

Quelle: ACMS Architekten GmbH

⁷ Vgl. Volhard, F., et al., S. 47-48

Zusätzlich sollte der Wandsockel aus Dauerhaftigkeitsgründen auch gegenüber der späteren Fertigoberfläche aus der wasserführenden Ebene 5cm erhöht ausgeführt werden, um eine oberflächliche Erosion in der Nutzungsphase zu verhindern. Da aus gestalterischen Gründen materiell abgesetzte Sockel in Ausstellungsgebäuden eher unüblich sind, wurde auf den Sockel eine weitere ca. 5 cm starke Stampfbetonschicht im tragenden Wandquerschnitt eingesetzt, die außenseitig mit einer Trasskalk modifizierten Schicht aus Lehm kaschiert ist (vgl. Abb. 11). Zur Stabilisierung des rein gestalterisch notwendigen Sockelvorsprungs wurde unterhalb des Lehms ein tragender Flachstahl auf den Stahlbetonsockel montiert, sodass der Boden- / Wandanschluss als stehende Fuge ausgebildet wird. Zusätzlich kann die Wand durch den Flachstahl Toleranzen im Betonsockel aufnehmen.

6.3.3.2 Oberer Wandabschluss

Für den oberen Wandabschluss hat eine Feuchtigkeitsbelastung in der späteren Nutzungsphase keine Relevanz. Lediglich im Trocknungsprozess sollte die Wandkrone entsprechend vor Feuchtigkeitseinwirkung geschützt sein. Für den Herstellungsprozess verweisen sogar die Lehmbau Regeln unter Kapitel 4.1.1 auf einen bauzeitlichen Witterungsschutz bei Arbeitsunterbrechungen und Niederschlägen, was das hohe Schadenspotential bei unkontrolliertem Feuchteintrag ausdrückt.

Beim Freilichtmuseum Detmold bildet den oberen Wandabschluss der zweiseitig gehaltenen Wandkonstruktion ein innenliegendes Stahlbetonrähm. Dieses ist konstruktiv ausgebildet, damit eine zulassungskonforme, lastübertragende Befestigung des darüber befindlichen Holzrähms gewährleistet werden kann. Eine tragkonstruktive Lastverteilung übernimmt das Stahlbetonrähm nicht.

Das Betonrähm ist dabei in einer verlorenen Schalung aus Lehmleibungen erstellt, so dass der Beton von außen später nicht mehr sichtbar ist. Das aufgelegte Holzrähm übernimmt die notwendige, lineare Lasteinleitung in die Wandkonstruktion, da die vorhandenen Punktlasten im Trägerauflagerbereich die maximal möglichen Lastaufnahmen von Lehmwandkonstruktionen übersteigen. Neben Toleranzausgleichsschichten unterhalb des Holzrähms sind keine weiteren konstruktiven Maßnahmen vorgesehen.

Aus gestalterischen Gründen wird das Holzrähm mit vorgefertigten, selbsttragenden Lehmfertigteilen in einer reduzierten Stärke von 15 cm kaschiert, die nachträglich retuschiert werden (vgl. Kapitel 6.3.2) und so ein homogenes Wandbild über die Gesamthöhe erzeugen (vgl. Abb. 12, grün).

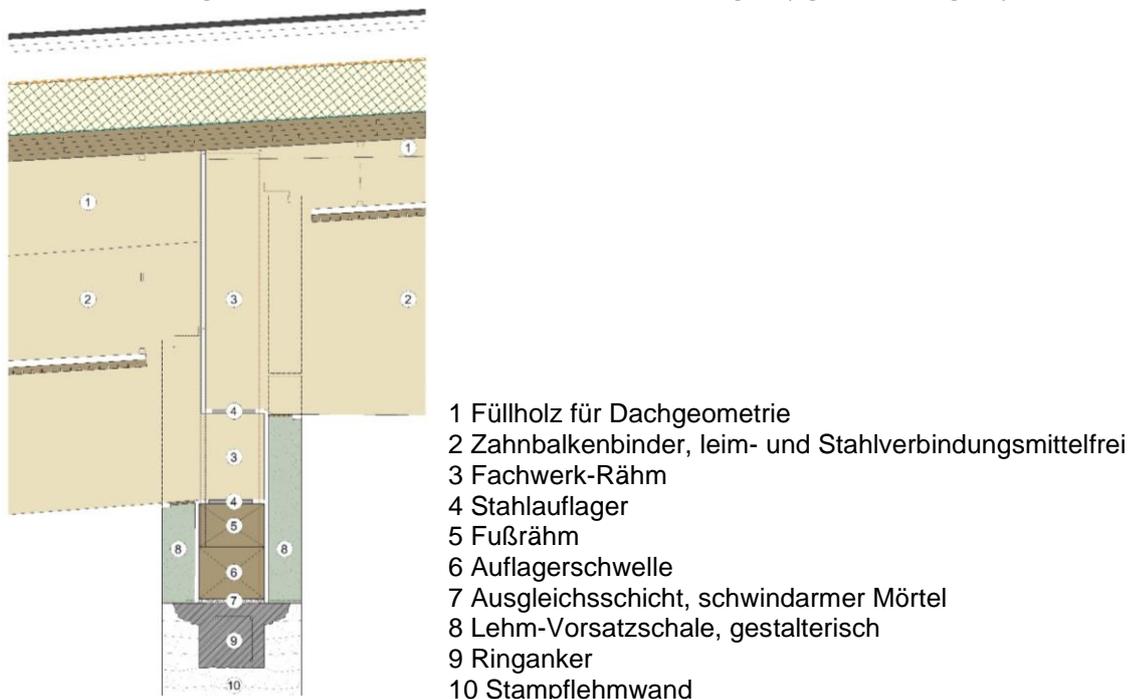


Abb. 12: Sturzdetail tragende Wandkonstruktion aus Stampflehm

Quelle: ACMS Architekten GmbH

6.3.3.3 Öffnungen

Einen weiteren Sonderbereich mit planerisch hohen Anforderungen stellen Wandöffnungen dar. Diese können der späteren Nutzung dienen, wie Tür- und Fensteröffnungen, oder auch rein technische Funktionen haben, wie beispielsweise Rohrleitungsdurchführungen. Aus gestalterischen Gründen sind monolithische Oberflächen von Leibung und Sturz im gleichen Material wie die Wand wünschenswert.

Da die Biegezeigeeigenschaften des Lehms nur eine begrenzte Öffnungsgröße zulassen, sind in der Regel zusätzliche Hilfsbaustoffe erforderlich. Üblicherweise bieten sich Stahl oder Beton, in besonderen Fällen auch Holz, als konstruktive Stoffe an. Während Holz aufgrund der Feuchtigkeitsbeanspruchung ausschließlich sichtbar eingesetzt werden kann, können Stürze aus Stahl oder Beton auch innerhalb der Wandkonstruktion verdeckt eingebaut werden. In allen Fällen ist auf eine kraftschlüssige Verbindung zwischen dem Lehm und dem Behelfsstoff zu achten.

Im Freilichtmuseum Detmold wurden aufgrund der großen Spannweiten verdeckt in der Wandkonstruktion liegende Stahlbetonstürze in Ortbeton eingesetzt. Äquivalent zu der Rähm Konstruktion an der Wandkrone wurden diese Elemente in eine vorgestampfte Lehmleibung betoniert. Für einen ausreichenden Verbund zwischen Lehm und Betonsturz wurde ergänzend zum Bewehrungsstahl des Betons vor Betonage noch eine Armierung aus Eisen in den Lehm eingebracht. Die Unterseite des Stahlbetonsturzes wurde zudem mit einer dünnen Schicht aus Stampflehm von 2-5 cm vorab kaschiert.

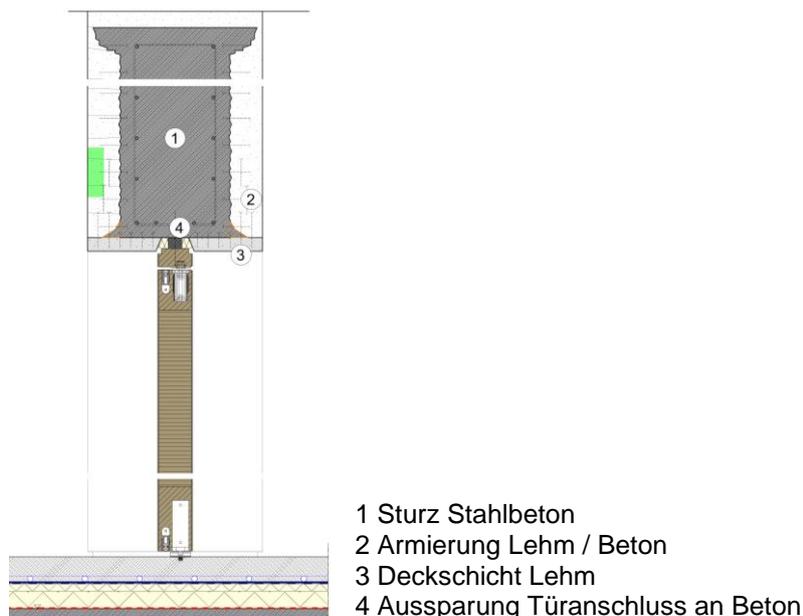


Abb. 13: Türsturzdetaill

Quelle: ACMS Architekten GmbH

Für einen systemkonformen Einbau von Türelementen mit zulassungstechnischen Anforderungen sind, ähnlich wie auch bei der Wandkrone, konstruktive Maßnahmen erforderlich. In die Leibungen wurden für eine spätere Befestigung der Türelemente Betonplomben eingearbeitet, so dass in diese Betonplomben eine spätere Befestigung auch von großen bzw. schweren Türelementen erfolgen kann. Wichtig dabei ist, dass die Betonplomben immer nur abschnittsweise eingebracht werden und nicht, wie in den Lehmbau Regeln entsprechend reguliert, öffnungshoch ausgeführt werden, um Setzungsunterschiede auszuschließen.

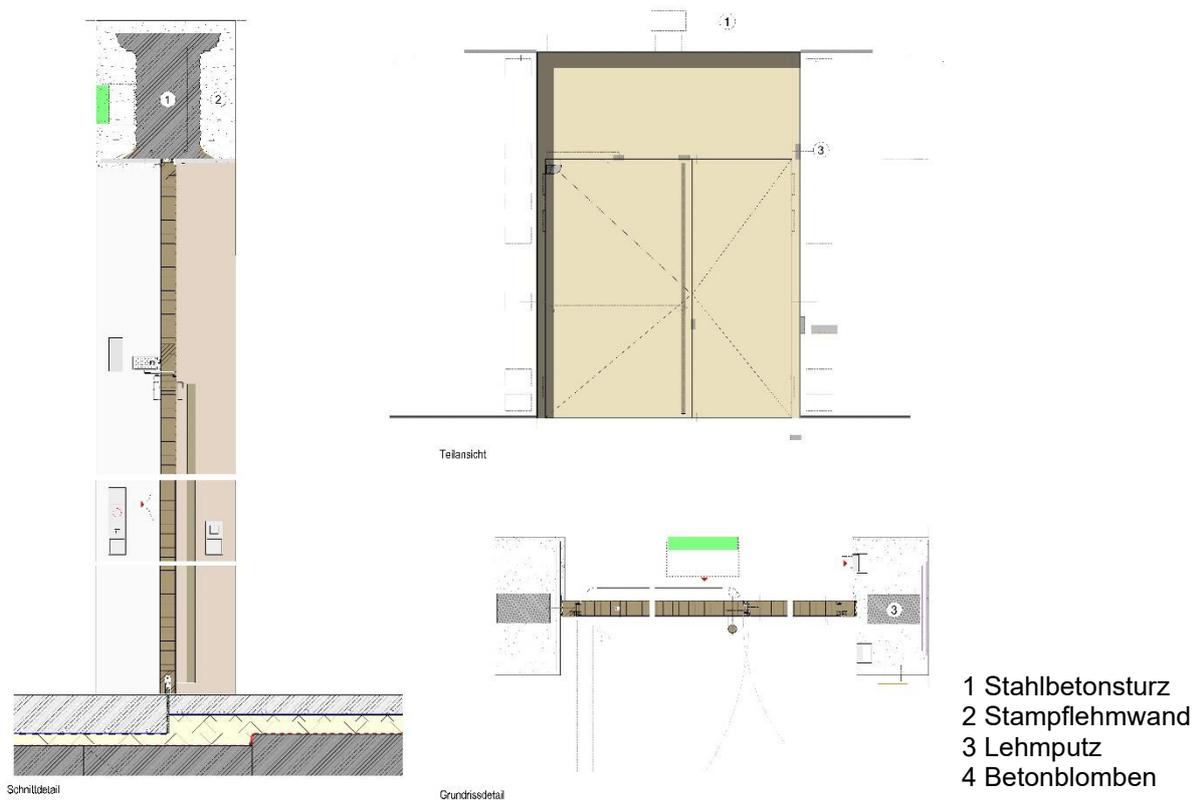


Abb. 14: Türsturzdetail tragende Wandkonstruktion aus Stampflehm
Quelle: ACMS Architekten GmbH

Bei Öffnungen für Leitungsdurchführungen ist zwischen Durchführungen mit Anforderungen an den Brandschutz und Durchführungen ohne Brandschutzanforderungen zu unterscheiden. Rein konstruktive Durchführungen können bis zu einem gewissen Durchmesser bspw. durch in die Schalung eingelegte Leerrohre oder Schalkörper hergestellt werden, an welchen nach Leitungsdurchführung lediglich die Ringspalte konstruktiv zu schließen sind (bspw. Mineralwolle Stopfung). Sofern Brandschutzanforderungen an die Durchführungen gestellt werden, sind die Zulassungsbedingungen der Brandschutzdurchführung maßgebend. Da Lehmteile in der Regel keine zulassungskonforme Ausführung als Umfassungsbaustoff zulassen, sind Behelfskonstruktionen als Leibungsbekleidungen herzustellen, die die Zulassungsanforderungen wiederum erfüllen.

6.3.3.4 Leitungsinstallationen

Aufgrund hoher nutzungstechnischer Anforderungen können Leitungsinstallationen häufig bei Wandbauteilen planerisch nicht ausgeschlossen werden. Egal ob für Beleuchtung, Tür- oder Medientechnik bedarf es einer medientechnischen Erschließung der Wände. Dabei hängen die systemischen Möglichkeiten stark vom Herstellungsverfahren der Wandkonstruktion ab.

Beim Realisierungsprojekt in Detmold dient eine Installationsschicht auf der Rohdecke im Bodenaufbau als horizontale Verteilungsebene für Medien. Eine Wandeinführung und innenliegender Verzug kann mit einfachen Leerrohrinstallationen, wie sie üblicherweise auch im Betonbau Anwendung finden, erfolgen. Die Leerrohre werden dabei bereits im Betonsockel in die Schalung eingebracht und provisorisch hochgehängt, so dass diese später auch im Stampfprozess eingearbeitet werden können. Bei horizontalem Verzug der Leerrohre ist im Verdichtungsprozess auf eine ausreichende Überdeckung zu achten, um Schäden an den Leerrohren zu vermeiden. Die Aussparungen im Bereich der Unterputz Installationen können nachträglich angearbeitet werden und ermöglichen eine exakte Positionierung der Einbauteile.

Bei Fertigteilkonstruktionen kann ein Leerrohrverzug über die Elementfugen erfolgen. Für ausreichende Radien können die Lehmfertigteile zusätzlich geschlitzt oder gefast werden. Durch die nachträgliche Retusche sind die Installationen später ebenfalls vollständig verdeckt.



Abb. 15: Einbauteile

Quelle: ACMS Architekten GmbH

Eine eingeschränkte Möglichkeit stellt auch das nachträgliche Schlitzeln ähnlich dem Mauerwerksbau dar, welches jedoch zu einem hohen Nachbearbeitungsaufwand führt und daher planerisch zu vermeiden ist. Die maximal zulässigen Schlitztiefen sind in den Lehmbau Regeln Kapitel 4.1.2 geregelt⁸. Lediglich an späteren Nichtsichtoberflächen oder untergeordneten Wandseiten kann das nachträgliche Schlitzeln und Verlegen eine wirtschaftliche oder nachträgliche Möglichkeit sein.

6.3.3.5 Montageplanung

Neben der Ausführungsplanung kommt auch der Arbeitsvorbereitung des Fachunternehmens eine besondere Bedeutung zu. Für die Koordination zu anderen Gewerken auf der Baustelle bedarf es einer Montageplanung, welche Herstellungsart, Herstellungsabschnitte und die konkrete Umsetzung der Ausführungsdetails darstellt. Erst aus dieser Montageplanung kann ein detaillierter Ablaufplan entwickelt werden, um die infrastrukturellen und zeitlichen Abhängigkeiten zu Vor- und Folgewerken aufzuzeigen.

⁸ Vgl. Lehmbau Regeln, S. 53

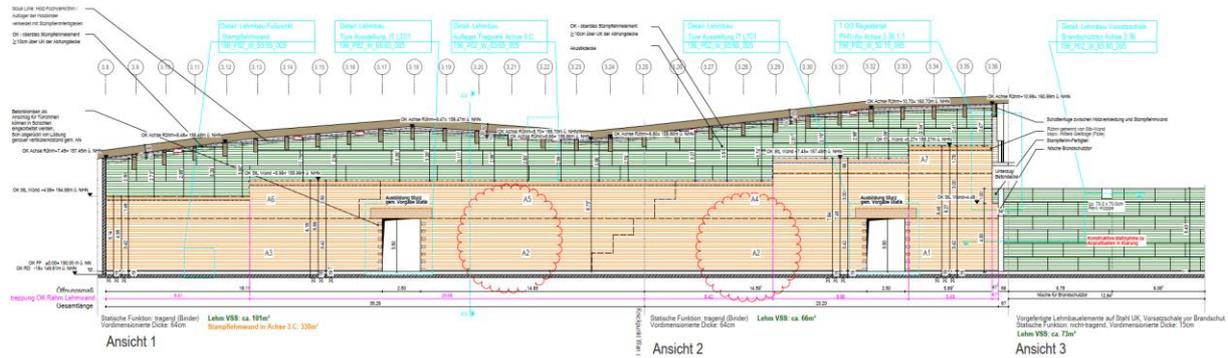


Abb. 16: Montageplan tragende Stampflehmwand und Lehm-Vorsatzschale,
Quelle: Martin Rauch - Lehm Ton Erde Baukunst GmbH

Neben der Montageplanung für die Ausführung ist auch die Schalungsplanung, insbesondere bei der formgebenden Ortbauweise, relevant. Bei größeren Schalungskonstruktionen sind die Rückverankerungen für die Baustellenbedarfe und Folgegewerke abzustimmen, sowie für die eigene Leistungserbringung auch die Schalankerpositionen (vgl. Kapitel 6.3.5.3).

6.3.4 Ausschreibung und Vergabe

Der Markt an qualifizierten Fachunternehmen für die Verarbeitung von Stampflehm zu (tragenden) Bauteilen ist in Deutschland aufgrund seiner Bedeutung für die Baubranche begrenzt. Während Betriebe für die Errichtung kleinerer Vorhaben noch verfügbar sind, ist die Firmenauswahl für größere Vorhaben stark reduziert. Dennoch sind vergaberechtskonforme Verfahren insbesondere für die öffentliche Hand notwendig, für private Bauherrn zumindest empfehlenswert. Die VOB/A unterscheidet im nationalen Bereich („Unterschwellenvergabe“) zwischen der öffentlichen Ausschreibung, der beschränkten Ausschreibung und der freihändigen Vergabe. Bei größeren Bauvorhaben sind dann die entsprechenden europaweiten Verfahren nach VOB/A EU anzuwenden, beispielsweise das Offene oder das Nichtoffene Verfahren, die Verhandlungsverfahren sowie weitere mögliche Vergabearten. Für die Sicherung eines grundsätzlichen Wettbewerbs wird empfohlen, Angebote mehrerer Bauunternehmen einzuholen⁹. Da standardisierte Leistungsbeschreibungen im Standardleistungsbuch (STLB-Bau) für tragende Lehmkonstruktionen aus Stampflehm nicht vorhanden sind, bedarf es individueller Leistungsbeschreibungen. Das im Anhang befindliche Musterleistungsverzeichnis stellt einen beispielhaften Ausschreibungsvorschlag für die Vergabeart Offenes Verfahren nach VOB/A EU dar, welcher bei dem Realisierungsprojekt beim LWL-Freilichtmuseum eingesetzt und zum Vergabeerfolg geführt hat und als Beispiel sowohl für Offene Verfahren als auch andere Vergabearten dienen kann (Anhang A1).

Im Sinne eines „niederschweligen“ Zugangs zu den Verfahren sind einfache Ausschreibungsstrukturen zu präferieren. Aufgrund unterschiedlichster bieterspezifischer Präferenzen bietet es sich an, die Art der Ausführung in den Leistungsbeschreibungen möglichst neutral bzw. offen zu gestalten. Gegebenenfalls erforderliche besondere Leistungen für den Bauprozess können vom Bieter selbst und frei einkalkuliert werden, wohingegen starre Vorgaben in den Leistungsbeschreibungen zu vermeidbaren Mehrkosten für nicht zwingend notwendige Leistungen führen können.

Ein wichtiges Kalkulationsmerkmal stellt die vorhandene oder zu liefernde Infrastruktur dar. Sofern vom Bauherrn Infrastruktur, insbesondere Einrichtungs- und Lagerflächen sowie Kräne, zur Verfügung gestellt werden, sollten diese detailliert beschrieben und bereits für eine mögliche Ausführung des Lehmbaus dimensioniert sein.

Neben den infrastrukturellen Fragestellungen kommt dem Terminablauf eine besondere Bedeutung zu. Sofern tragende Wandstrukturen eingesetzt werden sollen, handelt es sich um ein Rohbau- und kein Ausbaugewerk, welches in den Bau- und letztlich den Ausschreibungsprozess zu terminieren ist. Anders als bei konventionellen Rohbauten ist eine auf das Bauvolumen und das Herstellungsverfahren (vgl. Kapitel 6.3.2) zusätzlich abgestimmte Arbeitsvorbereitungszeit vorzusehen. Die Ausschreibung hat daher frühzeitig zu erfolgen, ähnlich wie beim Holzbau, nicht wie bei Beton- oder Maurerarbeiten.

Sofern aufgrund der Größe oder Art des Vorhabens besondere Zulassungs- oder Genehmigungsverfahren erforderlich werden, sind auch diese vom Grundsatz und der Zuständigkeit zu beschreiben. Besondere Auflagen aus den vorbenannten Zulassungen oder Genehmigungen sollten für eine gute Kalkulationsbasis offengelegt werden.

Der Materialverfügbarkeit kommt ebenfalls eine besondere Bedeutung zu. Sofern Aushubmaterial aus der Baugrube verwendet werden soll, bedarf es einer genauen Schnittstellenklärung bezüglich der Zuständigkeit von Aushub, gegebenenfalls Aufbereitung, Lagerung und Qualitätskontrolle. Wurde hingegen, wie im vorliegenden Fall, externes Material eingesetzt, bspw. auch schon für die besonderen Zulassungen bzw. Genehmigungen, ist eine Nennung von Produktbeispielen meist unumgänglich und bei öffentlichen Vergabeverfahren entsprechend zu begründen. Zur Wahrung der Vergabekonformität sollte die Produktwahl, sofern nicht zwingend Aushubmaterial verwendet werden soll, dem Bieter überlassen bleiben.

⁹ Vgl. Schroeder, H., S. 327

6.3.5 Bauprozess

Bei der Ausführung von Stampflehmwänden gibt es zwischen tragenden und nichttragenden Konstruktionen technisch keinen Unterschied. Der Herstellungsprozess ist geprägt durch die Wahl des Herstellungsverfahrens (vgl. Kapitel 6.3.2).

6.3.5.1 Bemusterung

Ähnlich wie bei Bauteilen aus Sichtbeton empfiehlt sich auch bei später sichtbaren Stampflehmoberflächen die Herstellung von Mustern, um optische Einflüsse des Materials abstimmen und bewerten zu können. Insbesondere bei Grubenlehmischungen können aufgrund der größeren Heterogenität des Materials größere optische Unterschiede in der Wandfläche entstehen. Auch die Auswirkungen der Wahl der Schalhaut und gegebenenfalls zusätzlicher Maßnahmen können auf die spätere Sichtoberfläche geprüft werden (vgl. Kapitel 6.3.5.3). Die bemusterten Oberflächen können als Referenzfläche für die zu erreichende Qualität mit dem Bauunternehmen vereinbart werden und schaffen beidseitig Sicherheit hinsichtlich des erwarteten und leistbaren Ausführungsergebnisses. Auch bei den Sichtbetonklassen hat sich gezeigt, dass selbst umfängliche Beschreibungen von Oberflächeneigenschaften besser durch eine Referenzflächenerstellung ergänzt werden sollten.



Abb. 17: Musterwände

Quelle: ACMS Architekten GmbH

6.3.5.2 Baustelleneinrichtung

Die Fertigung von Stampflehmteilen vor Ort, ob als Ortbauweise oder einer Vorfertigung, bedingt eine Materialinfrastruktur aus geeigneter Anlieferung, Lagerung, gegebenenfalls Vorbereitung und Einbringung. Die Anlieferung erfolgt bei größeren Vorhaben über Sattelzüge, bei kleineren Projekten können auch Big Bags genutzt werden. Bei letzteren ist das Material nach Anlieferung aus den Big Bags zu entnehmen, da in den Transportsäcken unkontrollierte oder ungleichmäßige Feuchtigkeitsverteilungen entstehen können.

Die Lagerung des Lehms auf der Baustelle hat witterungsgeschützt zu erfolgen, um unkontrollierten Feuchteintrag zu vermeiden. Provisorische Lager oder Zelte mit einer ausreichenden Belüftung sind dafür prinzipiell geeignet. Innerhalb des Lagers kann bei Bedarf ein bauseitiges Trocknen bzw. Befeuchten des Lehms stattfinden, sofern das Material nicht zeitnah nach Anlieferung verbaut wird bzw. aufgrund des Feuchtegehalts gute Einbaubedingungen nicht gegeben sind (vgl. Abb. 18).

Bei einer Vorfertigung vor Ort sind vor allem die zur Lagerung zur Verfügung stehenden Platzbedarfe zu prüfen. Im Freilichtmuseum Detmold wäre eine vollständige Vorfertigung der über 1.000 Einzelelemente trotz großer Baustelleneinrichtungsfläche nicht möglich gewesen.

Bei einer zentralen Fertigung vor im Werk ergeben sich vor allem logistische Transportherausforderungen. Dies geht jedoch mit der Reduzierung des Platzbedarfs auf der Baustelle einher, da die Fertigteile nur kurzzeitig zwischengelagert werden müssen.

Unabhängig von der Herstellungsart ist eine Kraninfrastruktur zu dimensionieren, sofern diese bauseits zur Verfügung gestellt wird. Aufgrund des hohen Materialgewichts des Lehms sollten für die Ortbauweise ortsfeste Baukräne eine Mindesttraglast von 2t an der Spitze aufweisen. Bei kleinformatischen oder schlanken Bauteilen sollte die Traglast mindestens 1t an der Spitze betragen. Der Kranradius sollte sowohl Lagerplätze, Einbauplätze und Entladezonen umfassen, um neben dem Lehm auch die Baustelleninfrastruktur erfassen zu können. Mobilkräne sind in der Regel deutlich teurer und daher wirtschaftlich nur in Ausnahmefällen bei kurzer Montagezeit sinnvoll.



Abb. 18: Materialbox

Quelle: ACMS Architekten GmbH

6.3.5.3 Schalung

Bei der Herstellung von Stampflehm kommt eine Schalung zum Einsatz, die unmittelbar nach dem Herstellungsprozess des Lehms entfernt werden kann, um eine Trocknung zu ermöglichen. Als Schalungsart eignen sich sowohl Träger- als auch Rahmenschalungen aus Holz oder Stahl, wobei das gewählte Schalungssystem auf den vorhandenen Verdichtungsdruck von bis zu 60 kN/m² bemessen sein muss. Insbesondere bei Trägerschalungen führt dies zu sehr dichten Abständen der einzelnen Joche, die so im Betonbau eher unüblich sind (vgl. Abb. 19). Damit die Schalungsanker den Stampfprozess und die damit verbundene spätere Sichtoberfläche möglichst wenig beeinflussen, sollte ein Raster gewählt werden, in welchem einzelne Anker temporär entnommen und nach dem Stampfprozess wieder eingesetzt werden können, so dass die Schichtungsstruktur während der Verdichtungsarbeiten im Bereich der Anker nicht gestört wird (vgl. Abb.23).

Sofern Schalhautelemente aus Holz zum Einsatz kommen, eignen sich nichtsaugende bzw. schwachsaugende Holzwerkstoffplatten, um das Feuchtigkeitsverhalten des Frischlehms nicht zu beeinflussen und Anhaftungen beim Ausschalen zu vermeiden. Bei starksaugenden Werkstoffen kann die Verwendung eines Schalhautöls notwendig werden, welches jedoch Auswirkungen auf den Glanzgrad der Sichtoberfläche haben kann (vgl. Kapitel 6.3.5.1). Schalhautstöße lassen sich nachträglich retuschieren, wobei eine Retusche des Frischlehms direkt nach dem Ausschalen deutlich einfacher ist als im gehärteten Zustand.



Abb. 19: Trägerschalungssystem Doka
Quelle: ACMS Architekten GmbH

6.3.5.4 Einbringen und Verdichten

Die Art der Materialeinbringung in die Schalung kann auf zwei Arten erfolgen. Entweder durch händisches Einbringen über Mörtelkübel bzw. Eimer oder über Einbringsilos, die auch im Betonbau Anwendung finden. Wichtig ist, dass die Fallhöhe des Materials in der Schalung nur gering bleibt, damit keine Entmischung des Rohmaterials stattfindet. Idealerweise kann das eingebrachte Material vor dem Verdichtungsprozess noch einmal homogenisiert und feinnivelliert werden, bspw. durch leichtes Harken (vgl. Abb. 22).



Abb. 20 (links): Mörtelkübel
Quelle: ACMS Architekten GmbH



Abb. 21 (rechts): Einbringsilo mit Füllschlauch
Quelle: ACMS Architekten GmbH



Abb. 22 (links): Ausharken und Homogenisieren des Rohmaterials in der Schalung

Quelle: ACMS Architekten GmbH

Abb. 23 (rechts): Lage Schalungsanker auf Schichtenlage abgestimmt

Quelle: ACMS Architekten GmbH

Die Einbringhöhe des Materials je Schicht ist in den Lehmbau Regeln mit 10-15 cm definiert¹⁰. Geringere Schichtdicken sind ineffizient und gefährden eine ausreichende Kornüberdeckung im Verdichtungsprozess. Höhere Schichtdicken führen zu einer inhomogenen Verdichtung über die Stampflage, was sowohl die technischen Wandeigenschaften schwächt und auch optisch nicht den gewünschten Sichtenanforderungen genügt.

Das eigentliche Verdichten kann mit verschiedenen Geräten in Abhängigkeiten zur Wanddicke erfolgen. Pneumatische Handstampfer mit einer Verdichtungsfläche von 5-15 cm haben sich für die meisten Wanddicken bewährt. Bei dickeren Wandkonstruktionen über 45cm können Rüttelplatten eingesetzt werden, was die Arbeitseffizienz und die Verdichtungskontinuität deutlich erhöht. Bei Verwendung derartiger Gerätschaften ist jedoch im Regelfall eine sequenzielle Nachverdichtung in Rand und Eckbereichen notwendig, um eine homogene Verdichtung über den gesamten Wandquerschnitt zu erzielen (vgl. Abb. 24).

¹⁰ Volhard, F., S. 54

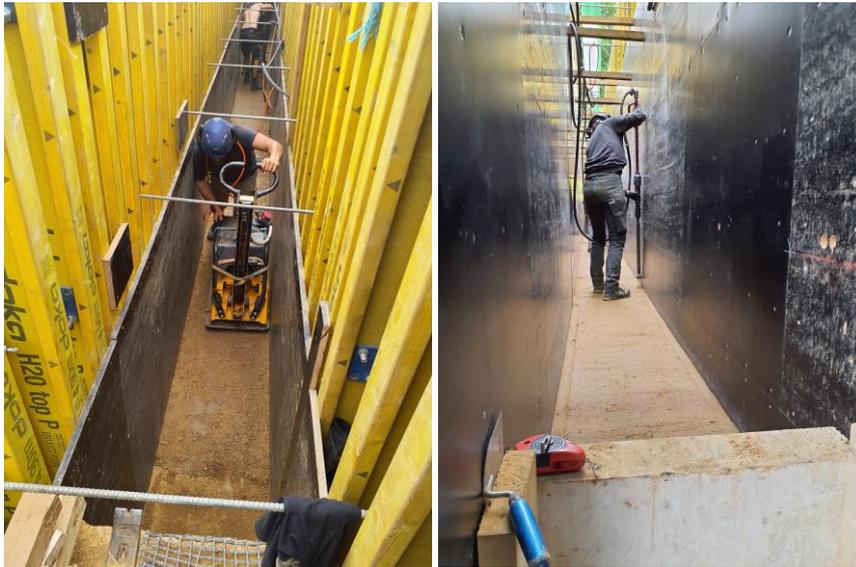


Abb. 24: Verdichtung mittels Rüttelplatte und Handstampfer

Quelle: ACMS Architekten GmbH

An tragkonstruktiven Sonderbereichen wie Stürzen oder Türöffnungen werden sogenannte Betonpolster als Auflager in die Stampflehmwand eingearbeitet (vgl. Kapitel 6.3.3.3). Dazu werden Aussparungen innerhalb der Stampflehmkonstruktion geschalt und die gestampfte Leibung beim Betonieren als verlorene Schalung verwendet.



Abb. 25: Stürze und Betonpolster als Auflager

Quelle: ACMS Architekten GmbH

Innerhalb der Stampflehmteile können zusätzliche Aussparungskörper bspw. für den nachträglichen Einbau von Elektro-Installationen vorgesehen werden (vgl. Abb.14).

Bewehrungen können eingesetzt werden, um konstruktiv an geometrisch anspruchsvollen oder querschnittsbeeinflussten Bereichen (Stürze, Öffnungen etc.) eine Rissbreitenbeschränkung herbeizuführen. Auch bei horizontalen Wandabschnitten empfiehlt sich eine rissüberbrückende Bewehrung (vgl. Abb. 26). Als besonders geeignet haben sich hier Geogitter als Bewehrungsmaterial herausgestellt, welche als Rollenware erhältlich sind und auf die geometrischen Bedarfe zugeschnitten werden können.

Bei großen Wandkonstruktionen sollte ein vertikaler Stampflehmabschnitt nicht höher als drei Meter (empfohlen, maximal jedoch 3,5 m) sein, da das Eigengewicht der Wand und der Verdichtungsdruck für den noch plastischen Lehm sonst zu hoch ist. In horizontaler Richtung kann nach Erstellen eines Wandabschnitts unmittelbar mit dem nächsten Wandabschnitt begonnen werden. Ein Übergriff der Schalung ist dabei sowohl bei horizontalem als auch vertikalem Versatz notwendig, um den noch plastischen Lehm aufgrund des angrenzenden Stampfdrucks zu stabilisieren. Das Maß des Übergriffs steht dabei in Abhängigkeit des Trocknungsstands des Vorabschnitts.

Die Abschnitte in der horizontalen Wandebene ergeben sich neben geometrischen Abhängigkeiten (bspw. Wandöffnungen) aufgrund der Länge der verwendeten Schalung. Schließt ein Wandabschnitt an einen anderen an, wird eine Verzahnung hergestellt (vgl. Abb. 26). Die Stufen der Verzahnung werden mittels Geogittern bewehrt und verstärkt.



Abb. 26: Verzahnte Ausführung Wandabschnitt
Quelle ACMS Architekten GmbH

6.3.5.5 Korsettkonstruktion und Witterungsschutz

Nach dem Ausschalen der frisch gestampften Wand muss diese über den Trocknungsprozess stabilisiert werden. Das Korsett, welches nach Ausschalen eines Stampflehmabschnitts angebracht wird, wird in den Ankerlöchern der Schalung befestigt. Dieses besteht in der Regel aus Kanthölzern mit einem Querschnitt von 10/10 bis 10/12 cm. Neben der Stabilisierung wird durch das Korsett zusätzlich die Maßhaltigkeit im Schwindprozess kontrolliert. Eine Trennlage zwischen Frischlehm und Korstt ist nicht notwendig. Das Korsett kann bei höheren Wandkonstruktionen auch das Auflager für eine Kletterschalung des darauffolgenden Höhentakts bilden.



Abb. 27: Schalung und Korsett der Stampflehmwand
Quelle: ACMS Architekten GmbH

Das Korsett bedarf, sofern es über einen längeren Zeitraum verbleibt, ebenfalls einer tragkonstruktiven Überprüfung als Bauzwischenzustand. Im Fall des Realisierungsprojekts im Freilichtmuseum bedeutet dies, dass die Abstützung bis zum Erreichen der Endfestigkeit und der Einbindung in das statische System die vollen Windlasten einer freistehenden Wand abfangen muss.

Während des Trocknungsprozesses muss die ausgeschaltete Stampflehmwand vor Witterung geschützt werden. Auf der Wandkrone wird dazu eine wasserdichte Folie aufgelegt. Zur Gewährleistung des Trocknungsprozesses sollte seitlich ein diffusionsoffenes Vlies als Witterungs- und Schlagregenschutz mit einer Luftschicht und ausreichender Belüftung vorgesehen werden. Dazu wurde eine Hilfskonstruktion auf der Wandoberseite als Abstandhalter der Abdeckung aufgebracht. Zusätzlich ist die Wand vor Frosteinwirkung zu schützen, nicht nur im Bauprozess, auch noch in der Trocknungsphase. Sofern eine Überlagerung des Trocknungsprozesses mit der Frostperiode nicht ausgeschlossen werden können und aufgrund hoher Restfeuchten Bedenken bestehen, können die Zwischenräume zwischen Abdeckung und Wand mechanisch belüftet und beheizt werden.



Abb. 28: Witterungsschutz
Quelle: ACMS Architekten GmbH

6.3.5.6 Trocknung

Grundsätzlich kann zwischen einer natürlichen und einer technischen Trocknung unterschieden werden. Die natürliche Trocknung ist dabei die ökologischste Variante, zugleich aber auch die zeitintensivste. Insbesondere bei großformatigen Konstruktionen können technische Anlagen den Trocknungsprozess lediglich unterstützen. Die Trocknungsgeschwindigkeit bleibt dabei abhängig vom Anfangswassergehalt der Bauteildicke, den gegebenen Witterungsbedingungen und den projektspezifischen Abhängigkeiten. Eine möglichst über den gesamten Bauteilquerschnitt gleichmäßige Trocknung erzeugt dabei das beste Schwindverformungsverhalten. Insbesondere ungleichmäßige Trocknungsbedingungen, wie bspw. einseitige Sonneneinstrahlung, sollten vermieden werden.

Beim Freilichtmuseum Detmold war der Endfeuchtigkeitszustand auch nach 6 Monaten nicht erreicht, in dem geschlossenen Gebäude der Materialprüfanstalt hingegen war eine 22 cm starke Wand nach 5 Monaten vollständig abgetrocknet, eine 60 cm Prüfwand unter gleichen Trocknungsbedingungen erst nach 8 Monaten. Die Trocknungskontrolle auf der Baustelle erfolgte dabei durch Kernbohrungen über den gesamten Wandquerschnitt. Es wurden über den Wandquerschnitt verschiedene Chargen gebildet und der Feuchtegehalt geprüft: Charge 1: 0-7 cm Tiefe, Charge 2: 7-14 cm Tiefe, Charge 3: 14-21 cm Tiefe, Charge 4: 21-30 cm Tiefe. Zusätzlich wurden die Chargen über die verschiedenen Höhentakte MS1-3 entnommen (vgl. Abb. 29) In Trocknungsschränken wurde der Restfeuchtegehalt der jeweiligen Charge bestimmt und ausgewertet (vgl. Abb. 30 u. 31).

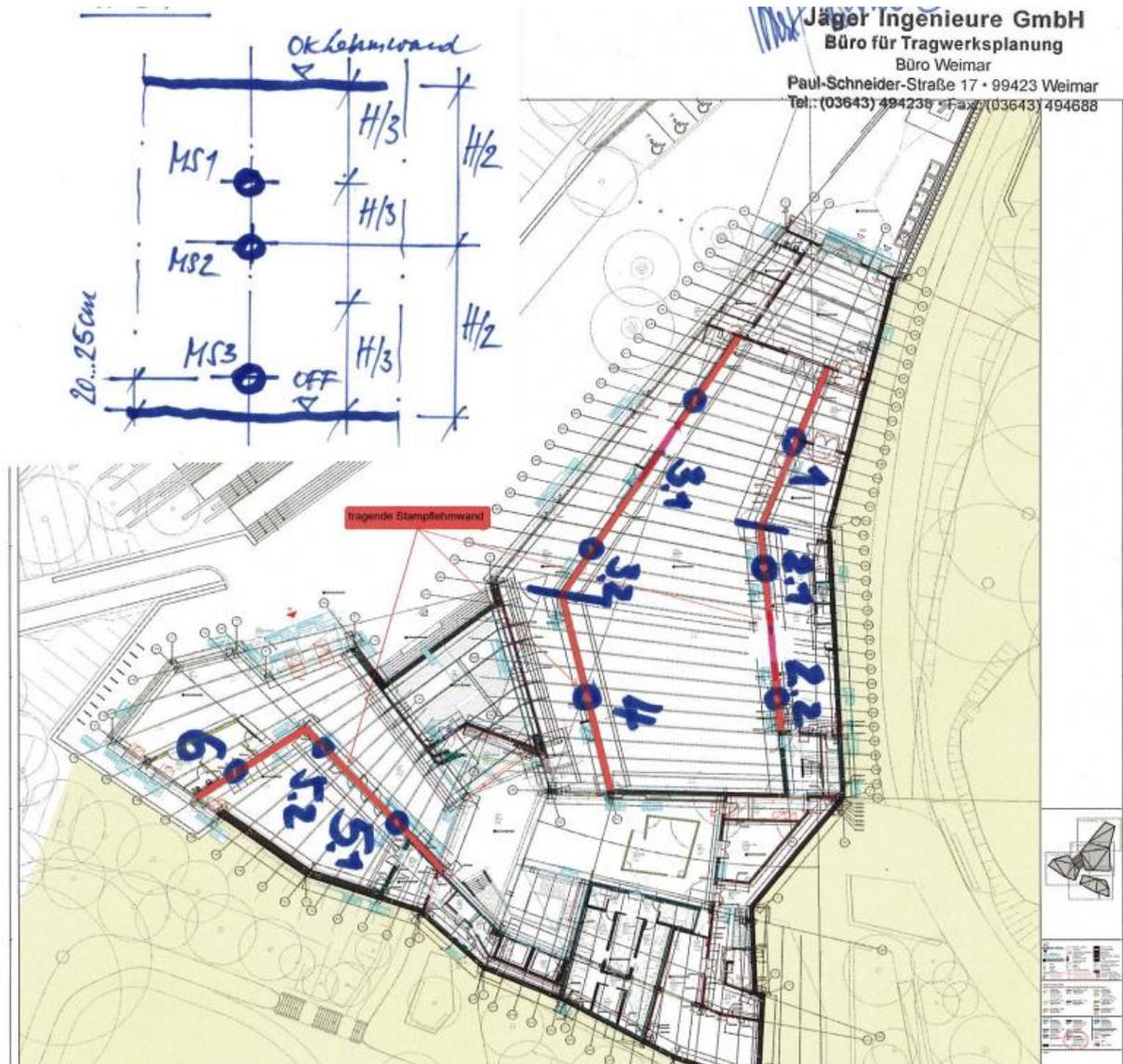


Abb. 29: Lage der Bohrkernentnahmen zur Trocknungsüberwachung
Quelle: Jäger Ingenieure GmbH

		Labor für Geotechnik Prof. Dr.-Ing. C. Schlötzer								Anlage Datum 13.11.2023	
Feuchtebestimmung in Anlehnung an E DIN 18947 : 2023 - 06											
Projekt: Stampflehmwände BV: Neubau Freilichtmuseum Detmold											
Datum:		13.11.2023	15.11.2023		17.11.2023		20.11.2023				
Uhrzeit:		14:00	14:00		10:00		10:00				
Probenbezeichnung		1. Wägung	2. Wägung	Wassergehalt [%]	3. Wägung	Wassergehalt [%]	4. Wägung	Wassergehalt [%]	5. Wägung	Wassergehalt [%]	
5.1.1 - MS 1 - 1	[g]	688,20	665,80	3,36	665,60	3,40	665,50	3,41			
5.1.1 - MS 1 - 2	[g]	846,00	806,40	4,91	806,10	4,95	806,10	4,95			
5.1.1 - MS 1 - 3	[g]	933,60	886,30	5,34	885,90	5,38	885,90	5,38			
5.1.1 - MS 1 - 4	[g]	960,70	909,90	5,58	909,60	5,62	909,50	5,63			
5.2.1 - MS 1 - 1	[g]	629,40	605,80	3,90	605,30	3,98	605,20	4,00			
5.2.1 - MS 1 - 2	[g]	989,10	942,40	4,96	942,00	5,00	941,90	5,01			
5.2.1 - MS 1 - 3	[g]	768,30	726,30	5,78	725,90	5,84	725,80	5,86			
5.2.1 - MS 1 - 4	[g]	1011,40	956,30	5,76	955,80	5,82	955,70	5,83			
	[g]										
	[g]										
	[g]										
	[g]										
	[g]										
	[g]										
	[g]										
	[g]										
	[g]										
Anmerkung:											

Abb. 30: Zwischenergebnisse Trocknungsüberwachung Bauteil Forum nach 80 Tagen
 Quelle: Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe

		Labor für Geotechnik Prof. Dr.-Ing. C. Schlötzer								Anlage Datum 18.12.2023	
Feuchtebestimmung in Anlehnung an E DIN 18947 : 2023 - 06											
Projekt: Stampflehmwände BV: Neubau Freilichtmuseum Detmold											
Datum:		18.12.2023	19.12.2023		20.12.2023		21.12.2023		22.12.2023		
Uhrzeit:		11:00	15:00		12:00		12:00		11:00		
Probenbezeichnung		1. Wägung	2. Wägung	Wassergehalt [%]	3. Wägung	Wassergehalt [%]	4. Wägung	Wassergehalt [%]	5. Wägung	Wassergehalt [%]	
5.1.1.1 - MS 1 - 1	[g]	838,60	810,20	3,51	810,00	3,53	809,90	3,54	809,60	3,58	
5.1.1.1 - MS 1 - 2	[g]	654,70	626,80	4,45	626,80	4,45	626,70	4,47	626,50	4,50	
5.1.1.1 - MS 1 - 3	[g]	799,70	764,70	4,58	764,70	4,58	764,60	4,59	764,40	4,62	
5.1.1.1 - MS 1 - 4	[g]	1086,70	1040,90	4,40	1039,90	4,50	1039,70	4,52	1039,30	4,56	
	[g]										
	[g]										
	[g]										
	[g]										
	[g]										
	[g]										
	[g]										
	[g]										
	[g]										
	[g]										
	[g]										
	[g]										
	[g]										
	[g]										
	[g]										
	[g]										
Anmerkung:											

Abb. 31: Zwischenergebnisse Trocknungsüberwachung Bauteil Forum nach 100 Tagen
 Quelle: Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe

Beispielhaft zeigt der Trocknungsverlauf dabei für die kritischen, innenliegenden Querschnittsbereiche eine Feuchtigkeitsabnahme von ca. 20% innerhalb von 20 Tagen. Die Randbereiche waren zumeist deutlich trockener als die innenliegenden Kernbereiche.

6.3.5.7 Qualitätskontrolle auf der Baustelle

Von der Eingangskontrolle des Rohmaterials über den Herstellungsprozess bis zum Endfestigkeitszustand bedarf es verschiedenster Qualitätskontrollen und Überwachungsmechanismen bei der Ausführung von Lehmwandkonstruktionen. Neben laboratorischen Methoden stehen dabei auch einfache Versuche gemäß den Lehmregeln¹¹ zur Verfügung. Als besondere Schwierigkeit bei der Prüfung erweist sich im Lehm die zeitliche Abstände zwischen Herstellungsprozess und Endzustand mit den finalen mechanischen und bauphysikalischen Eigenschaften des Lehms. Neben der ebenfalls in den Lehmregeln beschriebenen werkseitigen Prüfung des Ausgangsmaterials¹² existieren zur Prüfung der Endfestigkeit des eingebrachten Materials in die Wandkonstruktion auf der Baustelle keine verbindlichen Prüfverfahren. In diesem Fall spielt jedoch die Korrelation von Rohdichte in Verbindung mit dem Verdichtungsgrad, dem Feuchtegehalt und der Druckfestigkeit eine wichtige Rolle (vgl. Kapitel 6.5).

Die Schichtenlagen werden durch den Unternehmer im Stampfprotokoll durch Lagenummer, Einbringhöhe und Verdichtungshöhe dokumentiert.

Zusätzlich wurden beim Realisierungsprojekt in Detmold baubegleitende Großprobekörper mit den gleichen Arbeitsmitteln und identischer Ausführungsart wie die eigentliche Wandkonstruktion erstellt, um aus der erzielten Rohdichte Rückschlüsse zu dem Verdichtungsgrad und der Druckfestigkeit ableiten zu können. Zur Ermittlung der Trockenrohddichte wurden diese Probekörper vermessen und zu verschiedenen Phasen gewogen. Der ursprüngliche Ansatz, Bohrkern aus der Wandkrone zu entnehmen und diese abzudrücken, erwies sich nicht als praxistauglich, da eine Bohrkernentnahme nicht zerstörungsfrei möglich war. Auch die Bestimmung der Rohdichte aus Bohrkernentnahmen erwies sich aus den gleichen Gründen als nicht möglich.

Da zum aktuellen Untersuchungszeitpunkt die Trocknung jedoch noch nicht in Gänze abgeschlossen ist, stehen die finalen Ergebnisse noch aus.

6.3.6 Kosten

Pauschalierte Aussagen zu Kostenangaben für Stampflehmarbeiten können nicht getroffen werden, da eine gewachsene Preisstabilität im Wettbewerb durch eine kommerzielle Breitenanwendung wie beispielsweise im Betonbau oder im Holzbau noch nicht stattgefunden hat. Die Abhängigkeiten an Distanz zur Baustelle, Verfügbarkeit des Materials, Projektspezifikationen im Gewerk selbst und Baustelleninfrastruktur sind zu komplex. Auch in der Literatur finden sich nur wenig Aussagen zu Kosten für Lehmbauweisen, weder in den allgemeinen Büchern des Baukosteninformationszentrums Deutscher Architektenkammern GmbH (BKI) noch in spezifischer Fachliteratur.

Auf Basis der anteiligen Kostenzusammensetzung lassen sich jedoch projektspezifische Kostenaussagen wie nachfolgend ableiten:

¹¹ Volhard, F., S. 6-9

¹² Volhard, F., S. 23

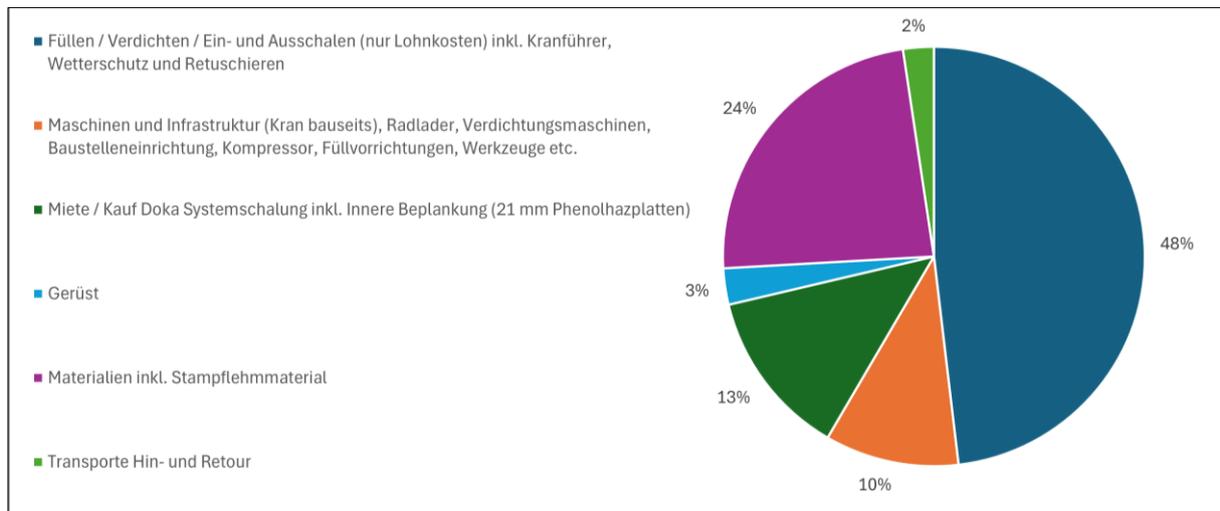


Abb. 32: Kostenverteilung Einheitspreisbildung Stampflehmwandkonstruktion je m²
Quelle: ACMS Architekten GmbH

Aufgrund der Lage des Projekts am Freilichtmuseum in Detmold und der Entfernung des Firmensitzes des Unternehmers in Österreich machen die Lohnkosten und die Lohnnebenkosten im Projekt fast 50% der Einheitspreiskosten aus und bilden damit den größten Kostenanteil. Verrechnungslöhne für Fachunternehmer liegen dabei auf einem ähnlichen Niveau wie das von Zimmerleuten einschließlich der jeweiligen Regionalfaktoren ohne Berücksichtigung besonderer Aufwendungen wie Übernachtungs- und Verpflegungszuschläge. Zweite große Teilposition ist das Rohmaterial, welches im Falle des Projekts durch den Systemhersteller Conluto bereitgestellt wurde mit knapp 25%. Aus Arbeitsgerät einschließlich Transport zur Baustelle sowie den (Miet-)Kosten für Schalung und Bekleidung setzt sich das letzte Viertel der anteiligen Kosten zusammen.

Unter Berücksichtigung der angegebenen Kostenparameter sowie der Kostenzusammensetzung können für Stampflehmkonstruktionen Einheitspreiskosten in Höhe von ca. 1.000 Euro bis 1.400 Euro (zzgl. USt.) pro Quadratmeter bei einer Wanddicke von ca. 60 cm angenommen werden. Schlankere, materialsparende Konstruktionen bieten dabei nur ein eingeschränktes Einsparpotential, da den geringeren Materialkosten schnell höhere Verarbeitungskosten entgegenstehen.

6.3.7 Lebenszyklus des Lehmbaus

Der Baustoff Lehm erfüllt die Vorgaben der ökologischen Nachhaltigkeit in vielerlei Hinsicht. Seine Herstellung ist äußerst unaufwändig: In Deutschland wird er im Tagebau bzw. in Gruben maschinell abgebaut und je nach Erfordernis unter Zugabe von Wasser, Gesteinsmehl und gegebenenfalls Naturfasern (z.B. Stroh) zu einem Bauprodukt verarbeitet. Zur Homogenisierung der Gesteinskörnung kann zusätzlich eine Kollierung des Rohmaterials notwendig sein. Reste aus der Produktion können entweder dem Produktionskreislauf erneut zugeführt oder der Natur zurückgegeben werden. Weder während der Herstellung noch in der Verarbeitung werden schädliche Substanzen beigefügt, so dass auch das eingebaute Material jederzeit wiedereingesetzt oder zurückgeführt werden kann.

Dies ist möglich, da der erhärtete Lehm in seiner reinen Form unter der Zugabe von Wasser replastifiziert und ohne Qualitätsverlust im Kreislauf weiter verarbeitet werden kann. Durch ein Aufschwämmen werden die Kapillarkraftbindungen zwischen den verschiedengroßen Korngrößen aufgelöst und das Grobkorn von den tonhaltigen Agglomeraten, dem Bindemittel, getrennt. Dadurch wird zudem ermöglicht, dass sich der Lehm rückstandslos von anderen Bau- und Störstoffen wie beispielsweise Beton lösen lässt. So kann das Material ohne großen Energieaufwand wiederverwendet oder wieder Teil des Bodens werden, aus dem der Lehm entnommen wurde. Bauteile aus „Lehm mit mineralischen Zuschlagstoffen oder aus Lehm mit weniger als 3 Masse % pflanzlicher Bestandteile [können] als unbelastete mineralische Abfälle auf einer Deponie der Klasse 0 gelagert werden“¹³. Aus diesen Gründen sollte Lehm möglichst nicht mit chemischen Zusatzstoffen, wie hydraulischen Bindemitteln, vermischt werden.

¹³ Hillebrandt, A. et al., S. 104

6.4 Verwendbarkeitsnachweis tragender Stampflehmwände

6.4.1 Bauarten und Bauprodukte

Bauarten und Bauprodukte sind in den 16 Landesbauordnungen geregelt.

Als Bauart bezeichnet man das „Zusammenfügen von Bauprodukten zu baulichen Anlagen oder Teilen von baulichen Anlagen“¹⁴. Als Bauprodukte bezeichnet man Produkte, Baustoffe, Bauteile, Anlagen und Bausätze, die zum dauerhaften Einsatz in bauliche Anlagen (Hoch- und Tiefbau) kommen.¹⁵

„Bauarten dürfen nur angewandt werden, wenn bei ihrer Anwendung die bauliche Anlage bei ordnungsgemäßer Instandhaltung für eine dem Zweck angemessenen Zeitdauer die gesetzlichen Anforderungen erfüllt und für ihren Anwendungszweck tauglich ist.“¹⁶

„Bauprodukte dürfen nur verwendet werden, wenn bei ihrer Verwendung die baulichen Anlagen bei ordnungsgemäßer Instandhaltung, während einer dem Zweck entsprechenden angemessenen Zeitdauer die Anforderungen dieses Gesetzes oder der aufgrund dieses Gesetzes erlassenen Vorschriften erfüllen und gebrauchstauglich sind.“¹⁷

Gemäß der Landesbauordnungen sind diese Anforderungen erfüllt, wenn die Technischen Baubestimmungen oder die allgemein anerkannten Regeln der Technik eingehalten werden. Seit 2019 gilt die Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen bzw. die entsprechenden Vorschriften der Länder. Von den Bestimmungen kann abgewichen werden, wenn nachgewiesen werden kann, dass die Bauarten oder die Bauprodukte sicher ver- bzw. angewendet werden können. In diesen Fällen kommen die bauaufsichtlichen Ver- bzw. Anwendbarkeitsnachweise zum Tragen. Dabei wird differenziert zwischen:

Anwendbarkeitsnachweise für Bauarten:

- allgemeine Bauartgenehmigung (aBG)
- allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis für die Bauart (abP)
- vorhabenbezogene Bauartgenehmigung (vBG)

Verwendbarkeitsnachweise für Bauprodukte:

- allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ)
- allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis für das Bauprodukt (abP)
- Zustimmung im Einzelfall (ZIE)

¹⁴ Ministerium des Innern des Landes Nordrhein-Westfalen, § 2 Abs. 12

¹⁵ Vgl. Ministerium des Innern des Landes Nordrhein-Westfalen, § 2 Abs. 11

¹⁶ Ministerium des Innern des Landes Nordrhein-Westfalen, § 17 Abs. 1

¹⁷ Ministerium des Innern des Landes Nordrhein-Westfalen, § 18 Abs. 1

Trennung von Bauarten und Bauprodukten/Bausätzen gemäß MBO 2016			
Bauarten MBO - zweiter Abschnitt (Allgemeine Anforderungen an die Bauausführung)		Bauprodukte MBO - dritter Abschnitt	
Bauart ist das Zusammenfügen von Bauprodukten zu baulichen Anlagen oder Teilen von baulichen Anlagen.		MBO §16b Allgemeine Anforderungen für die Verwendung von Bauprodukten	
MBO §16a		Bauprodukte und Bausätze mit CE-Kennzeichnung MBO §16 c	Nationale Bauprodukte MBO §17-25
Anwendbarkeit der Bauart		Bauprodukt ist verwendbar, wenn die erklärten Leistungen den Bauwerksanforderungen (MBO/MVV TB) entsprechen!	
„Geregelte Bauarten“	„Nicht geregelte Bauarten“	Bauprodukt/Bausatz entspricht hEN oder EAD/ETA Hersteller erstellt eine Leistungserklärung (DoP) mit der Angabe mindestens einer Leistung bezogen auf ein wesentliches Merkmal der hEN/EAD; weitere wesentliche Merkmale werden als NPD (No Performance Determined) erklärt.	„Geregelte Bauprodukte“ Bauprodukt in Übereinstimmung mit einer technischen Regel/ Baubestimmung VV TB C2 [BRL A Teil 1]
Bauarten in Übereinstimmung mit einer technischen Regel bzw. Baubestimmung z.B. nach DIN 4102-4	Bauarten abweichend von technischer Regel bzw. Baubestimmung VV TB C4 [BRL A Teil 3]	CE-Kennzeichnung ▪ Ggfs. zusätzliche Anwendungsregeln nach VV TB [ehem. LTB II] ▪ Nachweis von zusätzlichen Leistungen über freiwillige technische Dokumentation gemäß VV TB D3	„Nicht geregelte Bauprodukte“ Bauprodukt abweichend von technischer Regel / Baubestimmungen bzw. ohne technische Regel VV TB C3 [BRL A Teil 2]
Übereinstimmungsbestätigung durch den Anwender / Errichter gemäß § 16 a Abs. 5 MBO		Übereinstimmungsbestätigung durch den Hersteller	Kein Verwendbarkeitsnachweis abZ, abP, ZiE
		Ü-Zeichen	

Thomas Krause-Czeranka; Stand Januar 2018

Abb. 33: Übersicht Klassifizierung Bauarten und Bauprodukte

Quelle: Ingenieurbüro Krause-Czeranka

Zudem können Bauprodukte, die den Anforderungen in Vorschriften anderer EU-Mitgliedsstaaten entsprechen, verwendet werden, wenn sie das in Deutschland geforderte Schutzniveau für bauliche Anlagen ebenso erfüllen.¹⁸ Bauprodukte mit CE-Kennzeichnung dürfen eingesetzt werden, wenn die Leistungen den Gesetzen der Landesbauordnungen gleichkommen.¹⁹

Ein allgemein bauaufsichtliches Prüfzeugnis für Bauarten und Bauprodukte kann ebenso anstelle einer allgemeinen Bauartgenehmigung bzw. einer allgemein bauaufsichtlichen Zulassung herangezogen werden, wenn die Beurteilung durch ein allgemein anerkanntes Prüfverfahren beurteilt werden kann.²⁰

Eine vorhabenbezogene Bauartgenehmigung bzw. eine Zustimmung im Einzelfall kann im Fall einer fehlenden allgemeinen Bauartgenehmigung bzw. einer fehlenden allgemein bauaufsichtlichen Zulassung sowie eines fehlenden allgemein bauaufsichtlichen Prüfzeugnisses herangezogen werden. Die Bauart bzw. das Bauprodukt darf dabei nur für ein konkretes Bauvorhaben eingesetzt werden. In der Regel wird die vorhabenbezogene Bauartgenehmigung bzw. die allgemein bauaufsichtliche Zulassung von der Obersten Bauaufsichtsbehörde des Landes erteilt, in dem das Bauvorhaben errichtet wird.²¹

¹⁸ Vgl. Ministerium des Innern des Landes Nordrhein-Westfalen, § 18 Abs. 2

¹⁹ Vgl. Ministerium des Innern des Landes Nordrhein-Westfalen, § 19

²⁰ Vgl. Ministerium des Innern des Landes Nordrhein-Westfalen, § 17 und §22

²¹ Vgl. Ministerium des Innern des Landes Nordrhein-Westfalen, § 17 und §23

6.4.2 Aktueller Stand der Normierung des Lehmbaus

Für den Einsatz von Stampflehmwänden liegen hinsichtlich des verwendeten Materials, den geometrischen Randbedingungen sowie den brandschutztechnischen Eigenschaften aktuell keine ausreichenden normativen Regelungen vor. Aufgrund dessen war für die geplante Ausführungsweise der tragenden Stampflehmwand eine Zustimmung im Einzelfall (im Weiteren ZIE genannt) und eine vorhabenbezogene Bauartgenehmigung notwendig.

Dabei greift das Bauen mit Lehm auf eine lange Tradition zurück. Die Verwendung von Lehm als Bindemittel sowie als massiver, tragender Konstruktionsbaustoff hat in Teilen Asiens und anderen Regionen bereits seit 10.000 Jahren stattgefunden. In Zentraleuropa im zweiten Jahrtausend n. Chr. wurde Lehm als raumbildende Gefachfüllung in Form von Strohlehm eingesetzt. Insbesondere in den 1950er Jahren war Lehm ein bedeutsamer Baustoff, da Produktionsstätten für andere konventionelle Baustoffe in großen Teilen zerstört waren bzw. Transportmöglichkeiten nicht zur Verfügung standen. Aufgrund politischer und wirtschaftlicher Entwicklungen verlor der Lehm in den 1960er Jahren an Bedeutung.

Während der Nachkriegsjahre wurde Lehm als Baustoff erstmalig in Normen geregelt. Die 1944 unter dem Namen „Lehmbauordnung“ erstellte erste technische Baubestimmung in Deutschland für den Lehm wurde Anfang der 1950er Jahre um die DIN-Normenreihe 18951 zu „Vorschriften für die Ausführung“ und „Erläuterung“ ergänzt. Weitere Normen, insbesondere die DIN 18953 Bl. 3 „gestampfte Lehmwände“, in welchen unter anderem auch das Brandverhalten von Lehmteilen definiert war, überschritten jedoch nie das Stadium der Vornorm. Nach dem Rückgang der Bedeutung des Lehmbaus wurden die DIN-Normen 1971 gänzlich zurückgezogen.

Durch eine Renaissance des Lehmbaus in den 1990er Jahren stieg der Bedarf, die seit den 1970er Jahren bestehende Normungslücke zu schließen und damit eine rechtssichere Bauweise in Lehm zu ermöglichen. Im Jahre 1999 veröffentlichte der Dachverband Lehm e.V. die erste technische Baubestimmung - die sogenannten „Lehmbau Regeln“ - basierend auf den alten DIN-Normen und in Verbindung mit aktuellen bautechnischen Standards im Lehm. Im Gegensatz zu DIN-Normen können die „Lehmbau Regeln“ jedoch nicht als Produktnorm verstanden werden. Aus diesem Grund ist die Aufnahme in die Musterliste der technischen Baubestimmungen des DIBt nur als eingeschränkter Nachweis für Wohngebäude der Gebäudeklassen 1 und 2 mit höchstens zwei Vollgeschossen zulässig. Regelungen für Nichtwohngebäude bedürfen weiterhin gesonderter Verwendbarkeitsnachweise in Form von „Zustimmungen im Einzelfall“.

Für den Neubau des Eingangs- und Ausstellungsgebäudes im Freilichtmuseum Detmold ist aufgrund der Einstufung in die Gebäudeklasse 3 sowie der Nutzung als Nichtwohngebäude die Zustimmung im Einzelfall als bauordnungsrechtlicher Verwendbarkeitsnachweis erforderlich. Entsprechend der aus der Gebäudeklassifizierung resultierenden Anforderung zum Feuerwiderstand von tragenden und aussteifenden Wänden und der fehlenden normativen Grundlage sind ebenso Prüfnachweise zum Brandverhalten durch akkreditierte Prüfanstalten gefordert.

Im Gegensatz zu Stampflehmkonstruktionen sind Anwendungen anderer Lehmkonstruktionen wieder in Normen geregelt. Die 2013 erstmalig veröffentlichten Normen DIN 18945 „Lehmsteine“, DIN 18946 „Lehmmauermörtel“ sowie DIN 18947 „Lehmputzmörtel“ konnten bereits seit einigen Jahren erprobt und teilweise aktualisiert werden. 2018 wurde mit der Veröffentlichung der DIN 18948 „Lehmplatten“ eine Ergänzung vorgenommen. Die im Juni 2023 veröffentlichte DIN 18940 „Tragendes Lehmsteinmauerwerk“ stellt erstmalig ein zeitgemäßes Bemessungsverfahren für tragendes Lehmsteinmauerwerk nach Eurocode 6 dar. Resultierend daraus wurden die in den „Lehmbau Regeln“ festgelegten Bemessungsregeln ersetzt, so dass nun tragendes Lehmsteinmauerwerk innerhalb aller Gebäudearten mit bis zu vier Geschossen eingesetzt werden darf.

6.5 Mechanische Untersuchungen

Im Zuge der Zustimmung im Einzelfall (ZiE), die aus bauordnungsrechtlichen, nutzungstechnischen und brandschutztechnischen Gründen notwendig wurde, mussten alle erforderlichen bautechnischen Nachweise der wesentlichen mechanischen und physikalischen Eigenschaften ermittelt werden.

Die mechanischen Untersuchungen wurden durch das Institut für Materialprüfung und Bauwerkserhaltung GmbH (IfMB), Herr Prof. Dr.-Ing. Heinrich Wigger in Kooperation mit der Jade Hochschule ausgeführt. Die Prüfungen haben in enger Zusammenarbeit mit Prof. Dr.-Ing. Toralf Burkert des Gutachterbüros Jäger Ingenieure GmbH stattgefunden. Innerhalb der Arbeitsgruppe Lehm wurden die Arbeitsschritte und -ergebnisse mit Prof. Dipl.-Ing. Jens-Uwe Schulz (Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe), Dipl.-Ing. Oliver Rosenkranz (Projektleiter Tragwerksplanung, Kempen Krause Ingenieure GmbH), Dipl.-Ing. Roland Eisler (Prüfstatik, Engels Ingenieure Detmold), M. Sc. Architekt Simon Waigand (Architektur, ACMS Architekten GmbH), DI Architekt Thomas Honermann (Fa. Lehm Ton Erde Baukunst GmbH) und Hr. Meyer (Stampflehmlieferant, Fa. Conluto) abgestimmt.

Die Untersuchung zur Ermittlung der mechanischen Belastbarkeit sah die Prüfung folgender Materialeigenschaften vor:

- Rohdichte
- Feuchtegehalte
- Gleichgewichtsfeuchte
- Charakteristische Druckfestigkeit
- Statischer Elastizitätsmodul
- Kriechverhalten

Die Prüfberichte zu den mechanischen Untersuchungen vom Institut für Materialprüfung und Bauwerkserhaltung GmbH (IfMB) für sowie die gutachterlichen Stellungnahmen von Jäger Ingenieure sind in vollständiger Fassung im Anhang A2-A4 angefügt.

6.5.1 Prüfkörperherstellung und Lagerung

Die Prüfkörper wurden von der Firma Conluto Vielfalt aus Lehm hergestellt. Dazu wurde eine erdfeuchte Stampflehmischung in sogenannten Big Bags, die jeweils 1.300 kg Stampflehm beinhalten, angeliefert.

„Bei dem Material handelt es sich um eine feinkörnige und gleichmäßige Fertigmischung mit einer Bindekraft über 0,80 N/cm². Sie wird mit mineralischen Zuschlägen wie Grobsand, Kies oder Splitt angereichert. Nach Herstellerangaben reichen die Kornfraktionen bis zu 22 mm mit einer Überkorngröße < 30 mm.“²²

Die im Neubau eingesetzte Stampflehmwand weist eine Schlankheit von $\lambda = 13,3$ auf. Neben kleinformatischen Prüfkörpern (Zylindern und Würfeln) wurden daher großformatige quaderförmige Prüfkörper (Bauteilprüfkörper) mit verschiedenen Schlankheiten ($\lambda = 2,5, 10,0$ und $13,3$) gefertigt. Zudem wurden zwei Stampflehmwände bei der Gesellschaft für Materialforschung und Prüfanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH (MFPA Leipzig GmbH) für die Brandversuche hergestellt. Eine Übersicht der hergestellten Prüfkörpergeometrien ist in Abb. 32 dargestellt.

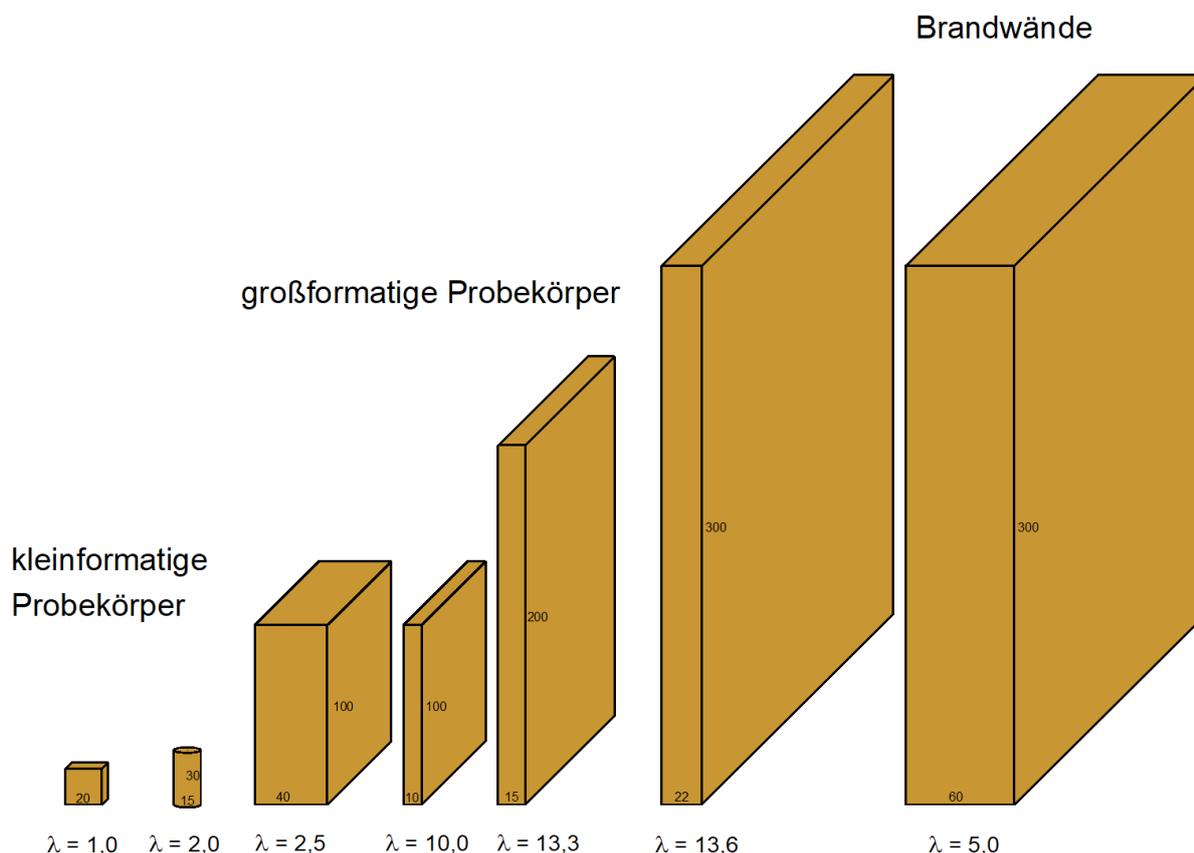


Abb. 34: Prüfkörper

Quelle: IfMB -Institut für Materialprüfung & Bauwerkserhaltung GmbH

Die kleinformatischen Prüfkörper wurden in Stahlschalungen mittels eines elektrischen Stemmhammers auf etwa 2/3 ihrer Schütthöhe verdichtet. Anschließend wurden die Würfel in Klimaschränken mit 23°C und 50% bzw. 80% relativer Luftfeuchte zum Trocknen bis zum Erreichen der Massenkonstanz gelagert.²³ [D]ie zylindrischen Versuchskörper wurden im Labor unter normalen Innenraumbedingungen [bei durchschnittlich 18,9°C und 53,8% r. F.] getrocknet.“²⁴

²² Wigger H. und Ince, M., S. 6

²³ Vgl. Wigger H. und Ince, M., S. 6 - 7

²⁴ Wigger H. und Relishkis, A., S. 6

Zudem ist es für die Prüfung notwendig, dass die Lasteintragungsflächen eine besonders hohe Ebenheit aufweisen. Aus diesem Grund wurde zum Egalisieren der Druckflächen Stuckgips der Firma Knauf Gips KG aufgebracht. Gemäß DIN 18945 wurde das Material maximal 5 mm stark ausgeführt und weist eine Druckfestigkeit von $\geq 7,0 \text{ N/mm}^2$ auf. Die „zylindrischen Prüfkörper wurden anschließend im Klimaschrank mind. 72 h bei $23^\circ\text{C} / 50\% \text{ r. F.}$ und die Würfel bei $23^\circ\text{C} / 80\% \text{ r. F.}$ konditioniert.“²⁵

Die großformatigen Prüfkörper hingegen wurden in individuell gefertigten Holz- bzw. Stahlrahmenschalungen gestampft. Dabei wurden Schüttungen mit Höhen von ca. 15 cm eingebracht und ebenso auf 2/3 ihrer Höhe verdichtet. Das Trocknen hat nach dem Entfernen der Schalung und einer Sicherung durch Kanthölzer innerhalb eines kontrollierten Laborklimas stattgefunden.²⁶

²⁵ Wigger H. und Relishkis, A., S. 6

²⁶ Vgl. Wigger H. und Ince, M., S. 8, S. 10

6.5.2 Durchführung der Untersuchungen

6.5.2.1 Untersuchung: Rohdichte

Das Messen der Rohdichte der kleinformigen Prüfkörper geschah unmittelbar nach dem Erreichen der Massekonstanz der Prüfkörper. Dabei fand das Messen geometrisch mit Hilfe eines Messschiebers statt. Das Gewicht der Prüfkörper wurde mittels Präzisionswaage (Genauigkeit: 0,1 g) festgestellt.²⁷ Die Rohdichte der großformatigen Prüfkörper musste auf eine andere Weise festgestellt werden. „Das Gewicht der Versuchskörper [...] wurde direkt nach der Druckprüfung über eine Wägeeinrichtung am Kran ermittelt. [...] Die geometrischen Abmessungen wurden über ein Maßband bestimmt.“²⁸

6.5.2.2 Untersuchung: Gleichgewichtsfeuchte

Die Gleichgewichtsfeuchten wurden mittels der gravimetrischen Messung im Anschluss an die mechanischen Untersuchungen bestimmt. Von Würfeln und Zylindern wurden jeweils Proben aus dem Kern- sowie Außenbereich entnommen. „Die Proben wiesen eine Dicke von 20 – 30 mm auf und hatten im Durchschnitt ein Gewicht von 450 g.“²⁹

Der 100 cm hohe Bauteilprüfkörper mit einer Schlankheit von $\lambda = 2,5$ wurde eine längere Zeit getrocknet. Ebenso wurde hier der Feuchtegehalt am Ende der mechanischen Prüfungen gemessen.³⁰ Für die 100 cm hohen großformatigen Versuchskörper mit einer Schlankheit von $\lambda = 10,0$ wurde eine Trocknungsdauer von mindestens sechs Wochen angenommen. Die Bestimmung des Feuchtegehaltes hat ebenso über die gravimetrische Messung von Segmenten aus Außen- und Kernbereichen stattgefunden. Zudem wurden parallel gefertigte Würfel „kontinuierlich gewogen, um den Zeitpunkt zu ermitteln, an dem die Ausgleichsfeuchte erreicht wurde.“³¹ Anhand der Einbaufeuchte und dem gemessenen Feuchteverlust wurde die Gleichgewichtsfeuchte bestimmt. Das gravimetrische Messen der Feuchte im Anschluss an die mechanischen Untersuchungen bestätigte die, wie zuvor beschrieben, errechneten Ergebnisse.

6.5.2.3 Untersuchung: Druckfestigkeit

Die Prüfung der Druckfestigkeit der kleinformigen Prüfkörper wurde „kraftgesteuert mit einer Druckprüfmaschine des Typs SWP4000VE vom Hersteller Form + Test Prüfsysteme“³² durchgeführt. Die Belastungsgeschwindigkeit wurde anhand von Erfahrungswerten für die Würfel mit 0,06 N/mm²/s und für die Zylinder mit 0,05 N/mm²/s eingestellt, sodass ein Bruch zwischen 30 bis 90 Sekunden eintrat. Die Ausgangsbelastung betrug annähernd so viel wie die Belastungsgeschwindigkeit (Würfel: 0,06 N/mm² und Zylinder: 0,05 N/mm²).³³

Die Prüfung der Druckfestigkeit der großformatigen Prüfkörper „mit einer Höhe von 100 cm ($\lambda = 2,5$; $\lambda = 10,0$) wurden mit der weggesteuerten Druckprüfmaschine des Typs SWP4000VE vom Hersteller Form + Text Prüfsysteme geprüft.“³⁴ Die Wände mit einer Höhe von 200 cm ($\lambda = 13,3$) wurden mit Hilfe der Druckprüfmaschine der Firma Mohr & Federhaff / SSM Prüftechnik Typ BPPS 6800 geprüft.³⁵

6.5.2.4 Untersuchung: Elastizitätsmodul

„D[er] statische Elastizitätsmodul wurde anhand zehn zylindrischer Prüfkörper mit einer Höhe von 300 mm und einem Durchmesser von 150 mm ermittelt.“³⁶ Die zuvor untersuchte Druckfestigkeit bot die Grundlage zur Festlegung der Spannungswerte für die Prüfzyklen. „Die obere Prüfspannung σ_0 wurde nach DIN EN 12390-13 [...] mit einem Drittel der Druckfestigkeit festgelegt und betrug 0,9 N/mm². Die untere Prüfspannung σ_u wurde auf etwa 10% der zu erwartenden Druckfestigkeit angesetzt und betrug

²⁷ Vgl. Wigger H. und Relishkis, A., S. 6

²⁸ Wigger H. und Ince, M., S. 10

²⁹ Wigger H. und Relishkis, A., S. 7

³⁰ Wigger H. und Ince, M., S. 9

³¹ Wigger H. und Ince, M., S. 10

³² Wigger H. und Relishkis, A., S. 7

³³ Vgl. Wigger H. und Relishkis, A., S. 7

³⁴ Wigger H. und Ince, M., S. 11

³⁵ Vgl. Wigger H. und Ince, M., S. 11

³⁶ Wigger H. und Relishkis, A., S. 7

0,3 N/mm².³⁷ Die obere sowie untere Spannung wurde im 10. Belastungszyklus auf 20 Sekunden festgelegt. Die Dehnungsmessung fand mit Hilfe eines Dehnungsaufnehmers (Fabrikat HBM Typ DD1) im mittleren Drittel des Prüfkörpers statt. Die Untersuchung wurde mit einer Be- und Entlastungsgeschwindigkeit von 0,5 N/mm²/s durchgeführt.³⁸

6.5.2.5 Untersuchung: Kriechverhalten

Zur Untersuchung des Kriechverhaltens wurden sechs gleiche zylindrische Prüfkörper mit einer Schlankheit von $\lambda = 2$ angefertigt. „Die Prüflast bzw. Spannung sollte der Gebrauchslast am Bauwerk entsprechen. Die Gebrauchslast [...] liegt bei 12,5 KN (2,83 N/mm²). Dies entspricht ca. 33 % der charakteristischen Festigkeit ($2,10 * 0,33 = 0,693$ N/mm²) bzw. 12,25 KN am Zylinder mit einem [Durchmesser von 150 mm] [...].“³⁹ Die Prüfung fand im 24 h Intervall so lange statt, bis keine Längenänderungen mehr beobachtet werden konnten: Zeitraum von 70 Tagen.

³⁷ Wigger H. und Relishkis, A., S. 7

³⁸ Vgl. Wigger H. und Relishkis, A., S. 8

³⁹ Wigger H. und Ince, M., S. 9

6.5.3 Untersuchungsergebnisse

6.5.3.1 Untersuchungsergebnisse: Rohdichte

Die Ergebnisse der Bestimmung der Rohdichte sind mit einem Variationskoeffizienten von lediglich 1% gleichmäßig.

- Mittel der Rohdichte der Würfel: 2.143 kg/m³
- Mittel der Rohdichte der Zylinder: 2.186 kg/m³

Würfel Nr.	Seite A	Seite B	Höhe	Masse	Rohdichte
	mm	mm	mm	g	kg/m ³
1	201,0	200,0	200,4	17.239	2.140
2	199,8	199,0	201,2	17.348	2.170
3	198,5	200,6	200,8	17.165	2.147
4	200,6	201,4	201,0	17.347	2.137
5	200,5	200,2	199,4	16.931	2.116
6	200,4	200,3	197,6	16.862	2.128
7	200,3	200,1	198,6	16.944	2.129
8	200,4	199,3	199,6	17.195	2.158
9	200,0	200,6	199,6	17.142	2.142
10	201,3	199,3	201,4	17.486	2.165
Mittelwert					2.143
Standartabweichung					17
Variationskoeffizient					1 %

Abb. 35: Rohdichte Würfel bei 23°C / 80% r. F.
Quelle: IfMB -Institut für Materialprüfung & Bauwerkserhaltung GmbH

Zylinder Nr.	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte
	mm	mm	g	kg/m ³
5	295,0	149,8	11.280	2.170
6	295,3	149,5	11.392	2.200
7	295,7	149,8	11.229	2.156
8	295,0	149,9	11.208	2.154
9	295,4	149,9	11.439	2.194
10	296,9	149,5	11.430	2.194
12	297,4	149,9	11.524	2.197
13	295,3	148,9	11.215	2.183
14	297,1	149,9	11.623	2.217
16	297,9	149,8	11.504	2.193
Mittelwert				2186
Standartabweichung				20
Variationskoeffizient				1 %

Abb. 36: Rohdichte Zylinder bei 23°C / 50% r. F.
Quelle: IfMB -Institut für Materialprüfung & Bauwerkserhaltung GmbH

Sowohl die würfelförmigen als auch die zylindrischen Prüfkörper weisen insgesamt eine hohe Rohdichte, im Vergleich zu den in den Lehmbauregeln angegebenen Rohdichten zwischen 1.700 bis 2.400 kg/m³, auf. Obwohl Abweichungen bis zu 10% gemäß den Lehm-Bau-Regeln zulässig sind, konnten Abweichungen bis 1% erzielt werden. Ursächlich zurückzuführen ist das gleichmäßige Untersuchungsergebnis auf die Homogenität des Ausgangsmaterials und die guten laboratorischen Herstellungsbedingungen, von denen jedoch auszugehen ist, dass diese auf der Baustelle nicht in gleicher Art gewährleistet werden könnten.

Anzahl	Breite	Länge	Höhe	Schlankheit	Rohdichte	Druckfestigkeit*	Variationskoeffizient
n	b	l	h	λ	ρ	f	V
-	cm	cm	cm	-	kN/m ³	N/mm ²	%
12	20	20	20	1,0	2.166	3,47	16
10		15**	30	2,0	2.186	2,49	8
2	40	100	100	2,5	2.095	1,76	12
3	10	100	100	10,0	2.000	1,57	36
3	15	141	200	13,3	2.189	1,18	24

* Mittelwerte ** Durchmesser

Abb. 37: Anzahl, Abmessungen, Rohdichte, Druckfestigkeit, Variationskoeffizient in Abhängigkeit von der Schlankheit λ

Quelle: IfMB -Institut für Materialprüfung & Bauwerkserhaltung GmbH

Die Ergebnisse der Rohdichten zu den Bauteilprüfkörpern mit verschiedenen Schlankheiten können zusammengefasst der Abb. 6.37 entnommen werden. Auch besonders schlanke Probekörper $\lambda > 10$ weisen dabei eine Rohdichte i.M. von mindestens 2.000 kg/m³ auf, was auch für die zu fertigenden Fertigteilelemente auf eine gute Herstellungs- und Verdichtungsmöglichkeit auch unter schwierigen geometrischen Herstellungsbedingungen schließen lässt.

6.5.3.2 Untersuchungsergebnisse: Gleichgewichtsfeuchte

Erreicht wurde die Ausgleichsfeuchte bei den Zylindern nach vier Wochen und bei den Würfeln nach sechs Wochen. Aus den nachfolgenden Grafiken geht hervor, dass nach dem Erreichen der Massekonstanz der Feuchtegehalt innerhalb der jeweiligen Prüfkörper inhomogen verteilt ist. Durch die Geometrie bedingt ist die Inhomogenität bei den Würfeln stärker vorhanden als bei den Zylindern. Zudem führte das Trocknen der Würfel bei einer r. F. von 80% zu einer durchschnittlich höheren Gleichgewichtsfeuchte von 1,9 M.-% (Zylinder: 1,1 M.-%).⁴⁰

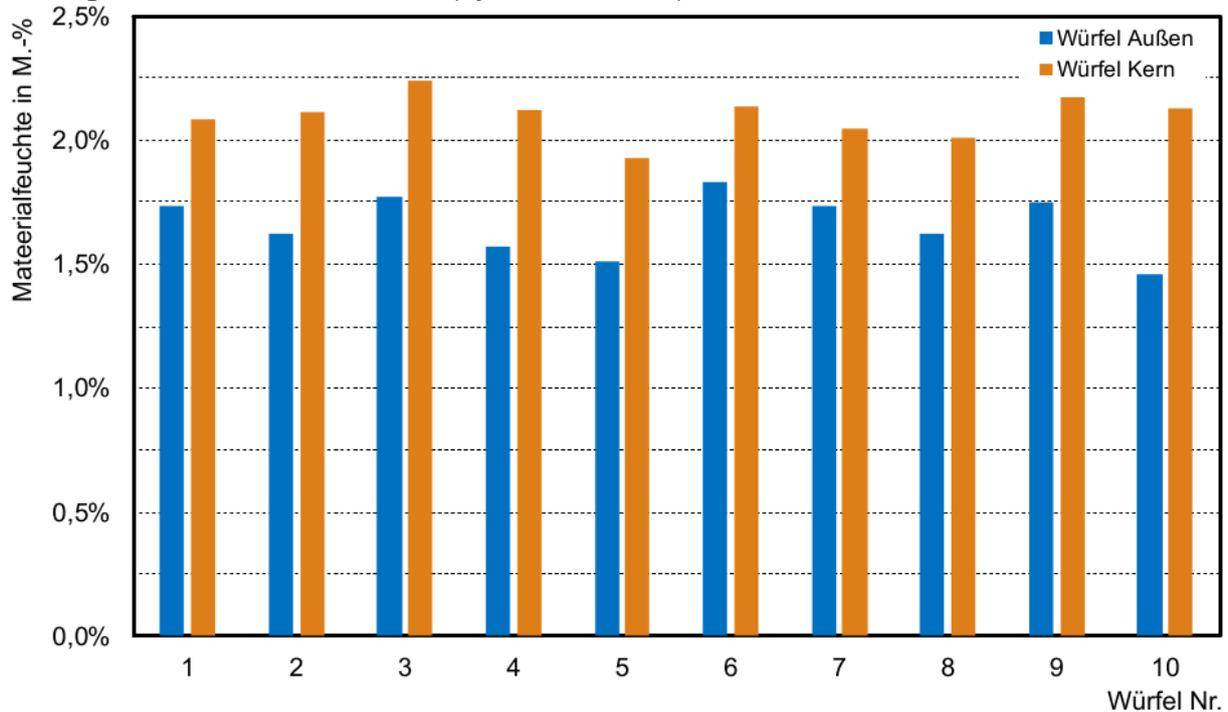


Abb. 38: Gleichgewichtsfeuchte Würfel bei 23 °C / 80 % r. F.
 Quelle: IfMB -Institut für Materialprüfung & Bauwerkserhaltung GmbH

⁴⁰ Vgl. Wigger H. und Relishkis, A., S. 9 - 10

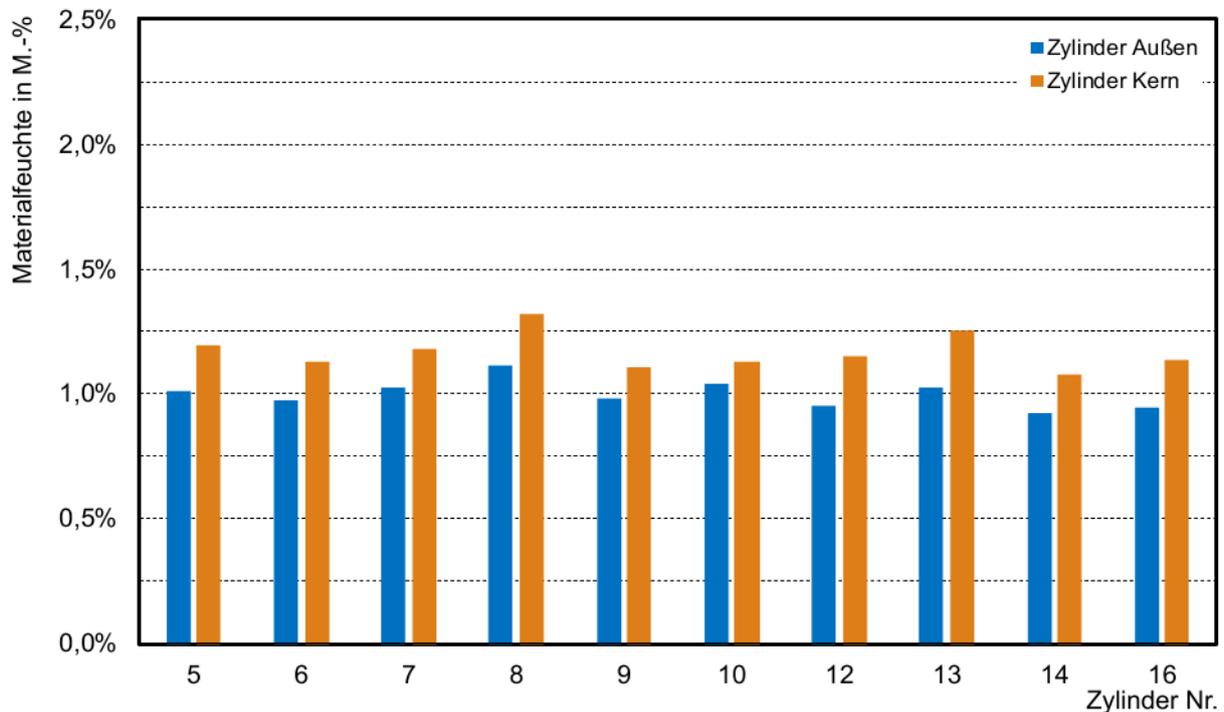


Abb. 39: Gleichgewichtsfeuchte Zylinder bei 23 °C / 50% r. F.

Quelle: IfMB -Institut für Materialprüfung & Bauwerkserhaltung GmbH

Der 100 cm hohe und 40 cm breite Bauteilprüfkörper mit einer Schlankheit von $\lambda = 2,5$ wurde in dreifacher Ausführung hergestellt und zum ersten Mal nach 15 Wochen (106 Tagen) der Druckfestigkeitsuntersuchung unterzogen. Im Anschluss daran wurde der Feuchtegehalt gemessen. Entgegen den Erwartungen wurde die Gleichgewichtsfeuchte im Kernbereich nicht erreicht. Im Abschlussbericht der IfMB GmbH wird festgehalten: „Wie aus den vergangenen Untersuchungen bekannt wirkt sich die Feuchte auf das Drucktragverhalten und somit auf dem Elastizitätsmodul aus. Je höher der Feuchtegehalt[,] umso geringer die Druckfestigkeit und der Elastizitätsmodul.“⁴¹

Insgesamt konnten folgende Ergebnisse an den drei Prüfkörpern festgestellt werden:

- Wand 1: 15 Wochen (106 Tage) keine Ausgleichsfeuchte im Kernbereich, ungleichmäßige Verteilung von Feuchte
- Wand 2: 46 Wochen (323 Tage) 1,35 M.-%
- Wand 3: 38,5 Wochen (270 Tage) 1,04 M.-%

⁴¹ Wigger H. und Ince, M., S. 12

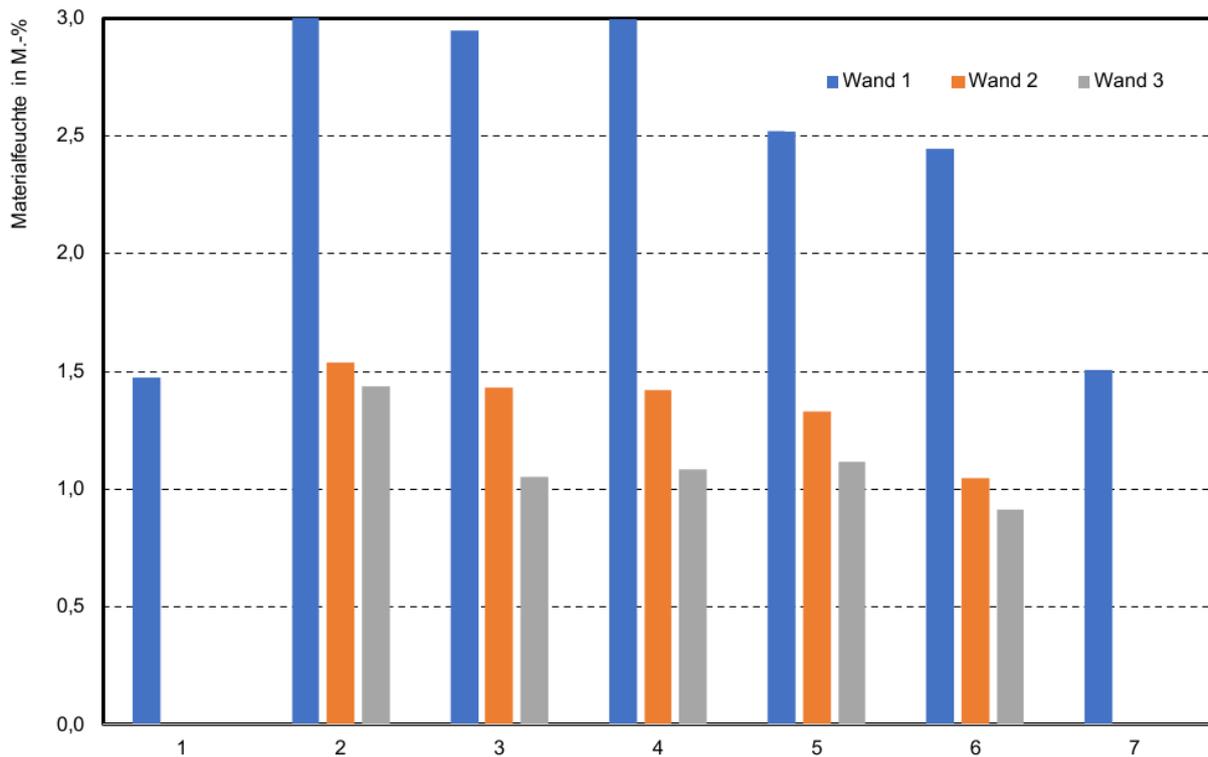


Abb. 40: Materialfeuchten (Bauteilprüfkörper – 100 cm hoch, $\lambda = 2,5$), Querschnittsproben 1-7
 Quelle: IfMB -Institut für Materialprüfung & Bauwerkserhaltung GmbH

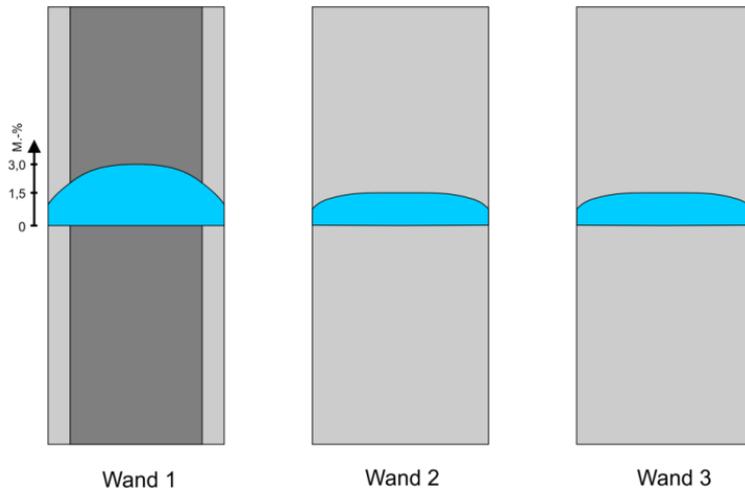


Abb. 41: Schematische Feuchteverteilung über den Querschnitt der Wände
 Quelle: IfMB -Institut für Materialprüfung & Bauwerkserhaltung GmbH

Der 100 cm hohe und 10 cm breite Bauteilprüfkörper mit einer Schlankheit von $\lambda = 10,0$ wurde ebenfalls in dreifacher Ausführung hergestellt. „Nach einer Trocknungszeit von 6,5 Wochen wurde die Ausgleichsfeuchte [...] erreicht und betrug im Durchschnitt 1,32 M.-% [...]“⁴²

⁴² Wigger H. und Ince, M., S. 13

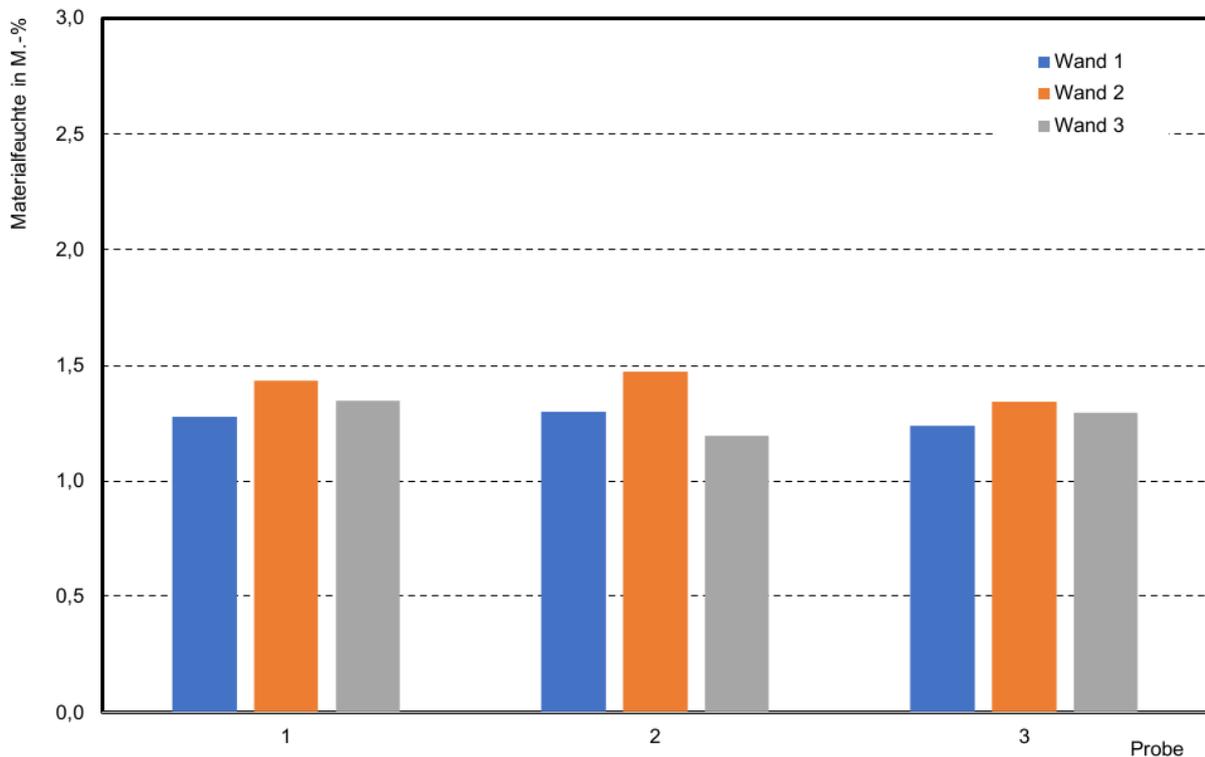


Abb. 42: Materialfeuchten (Bauteilprüfkörper - 100 cm hoch, $\lambda = 10,0$)

Quelle: IfMB -Institut für Materialprüfung & Bauwerkserhaltung GmbH

Der 200 cm hohe und 15 cm breite Bauteilprüfkörper mit einer Schlankheit von $\lambda = 13,3$ wurde in dreifacher Ausführung hergestellt. Parallel dazu wurden Würfel gefertigt, um den Verlauf des Feuchtegehaltes im Material zu bestimmen. Das Material wurde mit einer Einbaufeuchte mit 8 M.-% in die Schalung eingebracht. Die Begleitwürfel erreichten nach 9,5 Wochen (68 Tage) eine Feuchte von 1,5 M.-%.

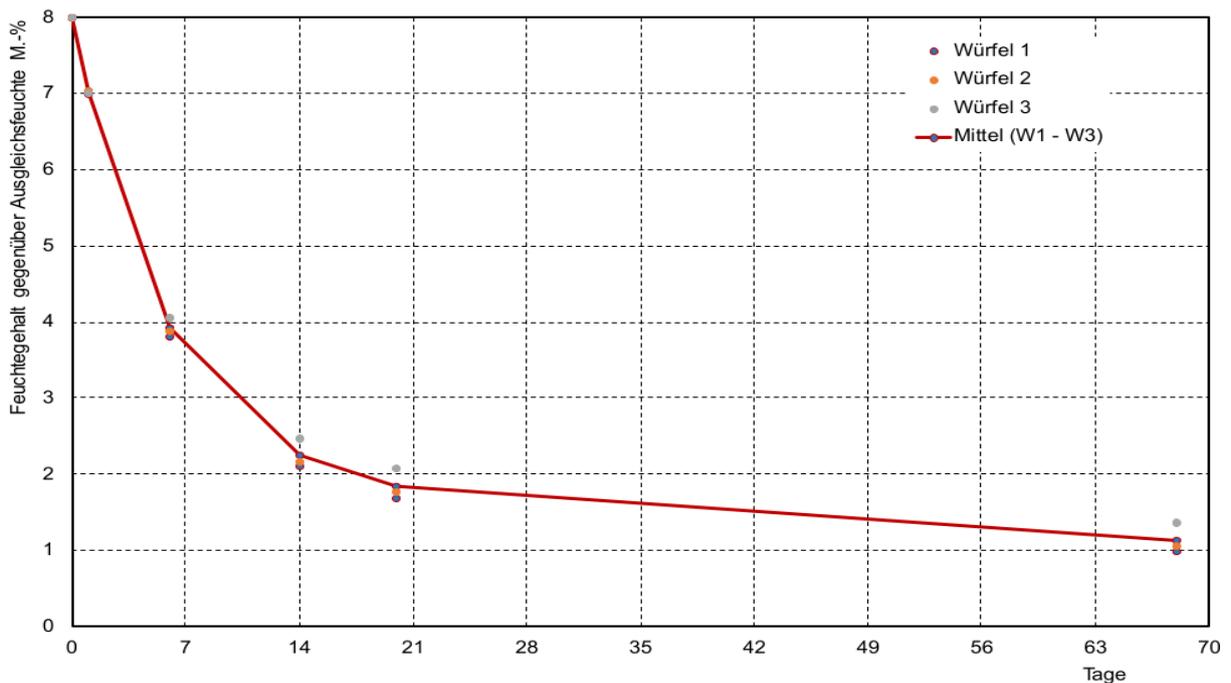


Abb. 43: Verlauf des Feuchtegehaltes der Begleitwürfel W1 – W3 (Bauteilprüfkörper – 200 cm hoch, $\lambda = 13,3$)

Quelle: IfMB -Institut für Materialprüfung & Bauwerkserhaltung GmbH

„Die Materialfeuchten am Prüftag betragen im Mittel bei Wand 1 1,24 M.-% bei der Wand 2 1,20 M.-% und bei der Wand 3 1,05 M.-%. Über alle drei Wände betrug die mittlere Materialfeuchte 1,16 M.-%.“⁴³

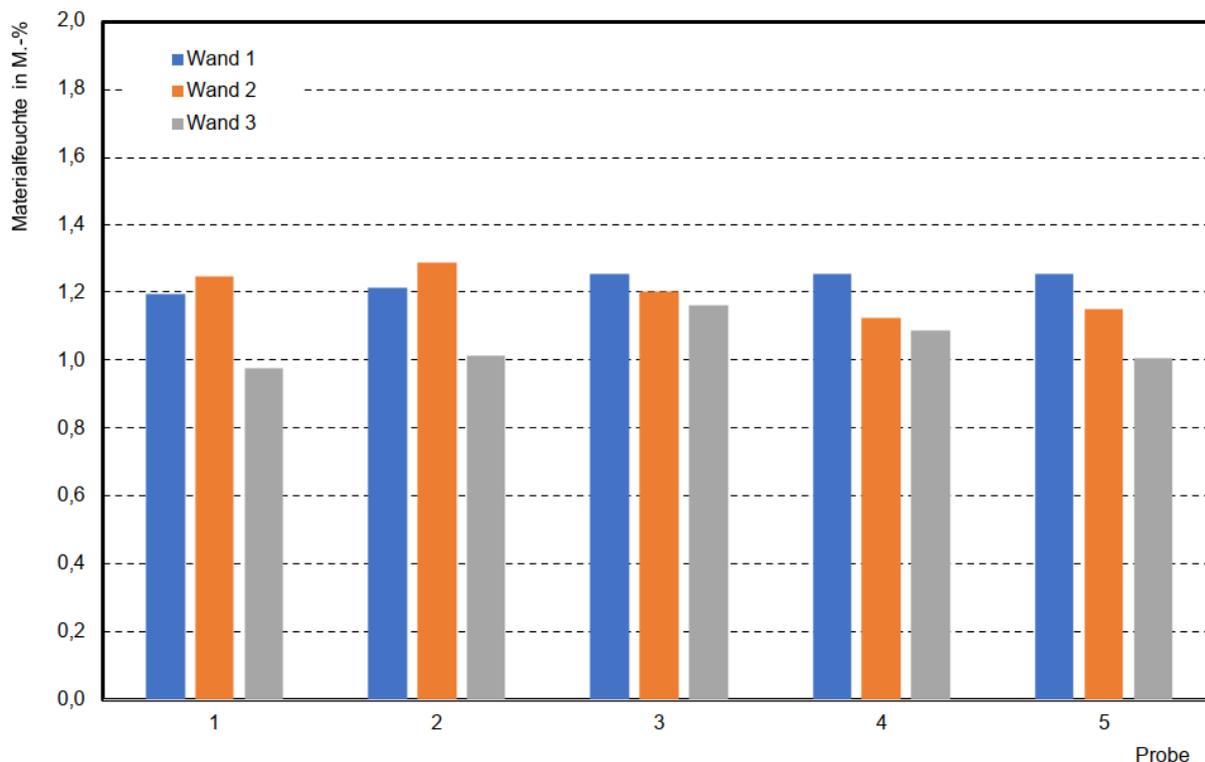


Abb. 44: Materialfeuchten am Prüftag (Bauteilprüfkörper – 200 cm hoch, $\lambda = 13,3$)
Quelle: IfMB -Institut für Materialprüfung & Bauwerkserhaltung GmbH

6.5.3.3 Untersuchungsergebnisse: Druckfestigkeit

Die bei 23°C und 80% r. F. gelagerten Würfel-Prüfkörper wiesen eine Druckfestigkeit von im Mittel 2,75 N/mm² auf. Die mittlere Würfelldruckfestigkeit der gleichartigen Stampflehmischung von Prüfkörpern aus dem Werk von Conluto (23 °C / 50 % r. F.) lag bei 3,11 N/mm².⁴⁴ Zu erkennen ist, dass „eine erhöhte Umgebungsfeuchte eine bis zu 20 %-ige Minderung der Druckfestigkeit verursachen kann.“⁴⁵

Prüfkörper	Anzahl	Schlankheit	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	5%-Quantilfaktor	char. Druckfestigkeit 5%-Quantil
		λ	m_x	s_x	V_x	k_n^*	$X_{k(n)}$
		-	N/mm ²	N/mm ²	-	-	N/mm ²
Würfel (23°C/80% r. F.)	10	1	2,75	0,17	0,06	1,92	2,42
Würfel ¹ (23°C/50% r. F.)	21	1	3,47	0,55	0,16	1,77	2,51
Zylinder (23°C/50% r. F.)	10	2	2,49	0,20	0,08	1,92	2,10

*mit V_x unbekannt [N 6]

Abb. 45: Charakteristische Druckfestigkeiten nach DIN EN 1990:2021-10
Quelle: IfMB -Institut für Materialprüfung & Bauwerkserhaltung GmbH

⁴³ Wigger H. und Ince, M., S. 14

⁴⁴ Vgl. Wigger H. und Relishkis, A., S. 11

⁴⁵ Burkert, T. und Jäger, W. (1), S. 8

Die maximale Druckspannung für die Versuche der großformatigen Prüfkörper wurde anhand der Ergebnisse der Würfel- und Zylinderversuche gewählt. „Nach Aufbringen von ca. 1/3 der Bruchlast wurden Druckhysterese dreimal in Anlehnung an der Norm [...] an den Prüfkörpern mit einer Schlankheit ($\lambda = 2,5, 10,0$) durchfahren.“⁴⁶ Dieses Verfahren konnte auf die 200 cm hohe Wand aufgrund von Einstellungsproblemen der Maschine nicht übertragen werden.

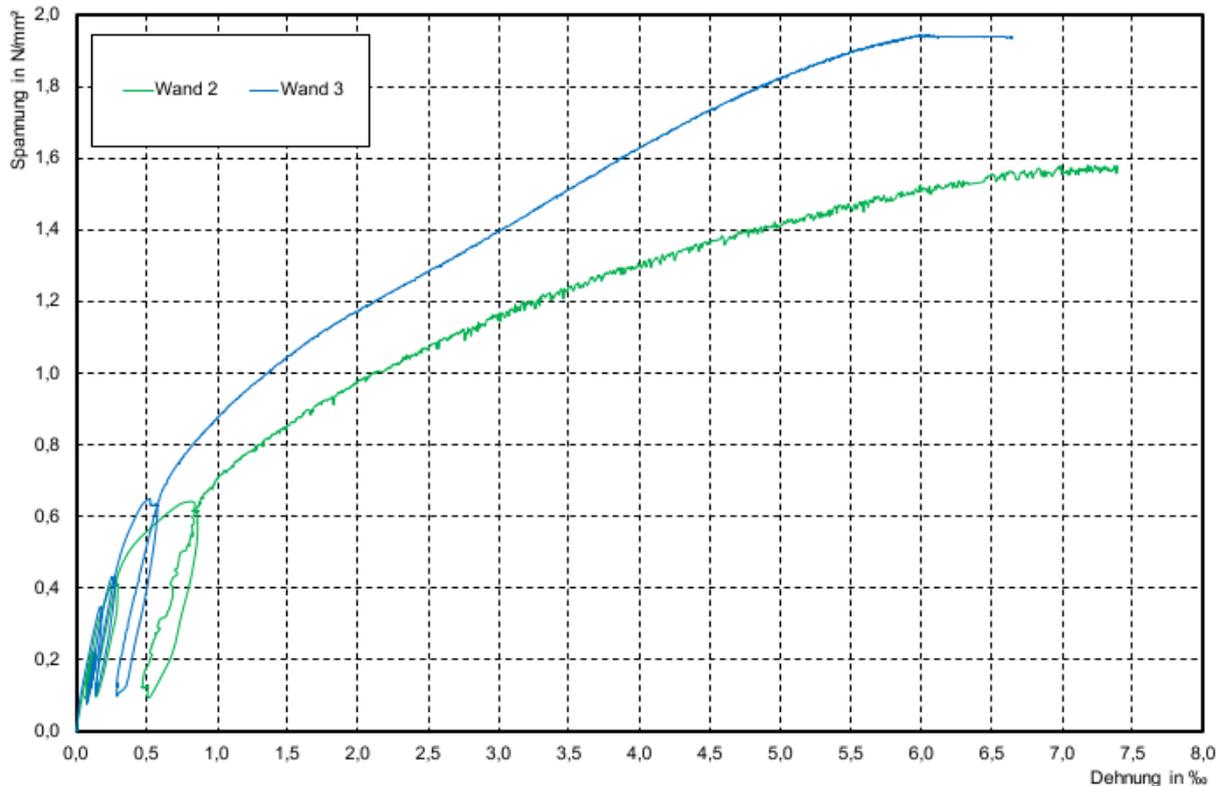


Abb. 46: Mittelwerte der Spannungs-Dehnungslinie der Wand 2 und 3 (Bauteilprüfkörper – 100 cm hoch, $\lambda = 2,5$)

Quelle: IfMB -Institut für Materialprüfung & Bauwerkserhaltung GmbH

Prüfkörper	Prüfalter	Feuchte	Fläche	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	Tage	M.-%	m ²	kg/m ³	kN	N/mm ²
W 1	106	0-10cm: 1,5	0,370	2.095	461,0	1,25
		10-20cm: 2,8				
W 2	323	1,40	0,370	2.108	596,2	1,61
W 3	270	1,10	0,370	2.081	709,8	1,92
Mittelwert*		1,25	0,370	2.095	653,0	1,76

* Mittelwert aus Wand 2 und 3

Abb. 47: Feuchtegehalt, Rohdichte, Bruchlast und Druckfestigkeit (Bauteilprüfkörper – 100 cm hoch, $\lambda = 2,5$)

Quelle: IfMB -Institut für Materialprüfung & Bauwerkserhaltung GmbH

Der 100 cm hohe und 40 cm breite Bauteilprüfkörper mit einer Schlankheit von $\lambda = 2,5$ wurde wie bereits zuvor beschrieben in einem Prüfalter von 15 Wochen (106 Tage) erstmalig hinsichtlich der Druckfestigkeit untersucht. Die Bruchlast lag jedoch deutlich unter dem erwarteten Wert, da

⁴⁶ Wigger H. und Ince, M., S. 18

ungleichmäßig Feuchte im Bauteil vorhanden war. Das hatten Nachuntersuchungen der Materialfeuchte im Bauteil ergeben. Die durchgetrockneten äußeren Bereiche wiesen eine höhere Steifigkeit als die Kernzone auf. Das führte zu einer Schalenbildung und wiederum zu einem Druckversagen der Schalen bzw. zum Druckversagen des gesamten Wandquerschnitts.⁴⁷ Die Materialfeuchten der zwei weiteren Bauteilprüfkörper wurden kontinuierlich während des Trocknungsprozess gemessen. Bei einer Materialfeuchte von 1,25 M.-% lag die Rohdichte i.M. bei 2.095 kg/m³ und die Druckfestigkeit bei 1,77 N/mm² im Mittel der Wand 2 und 3.⁴⁸

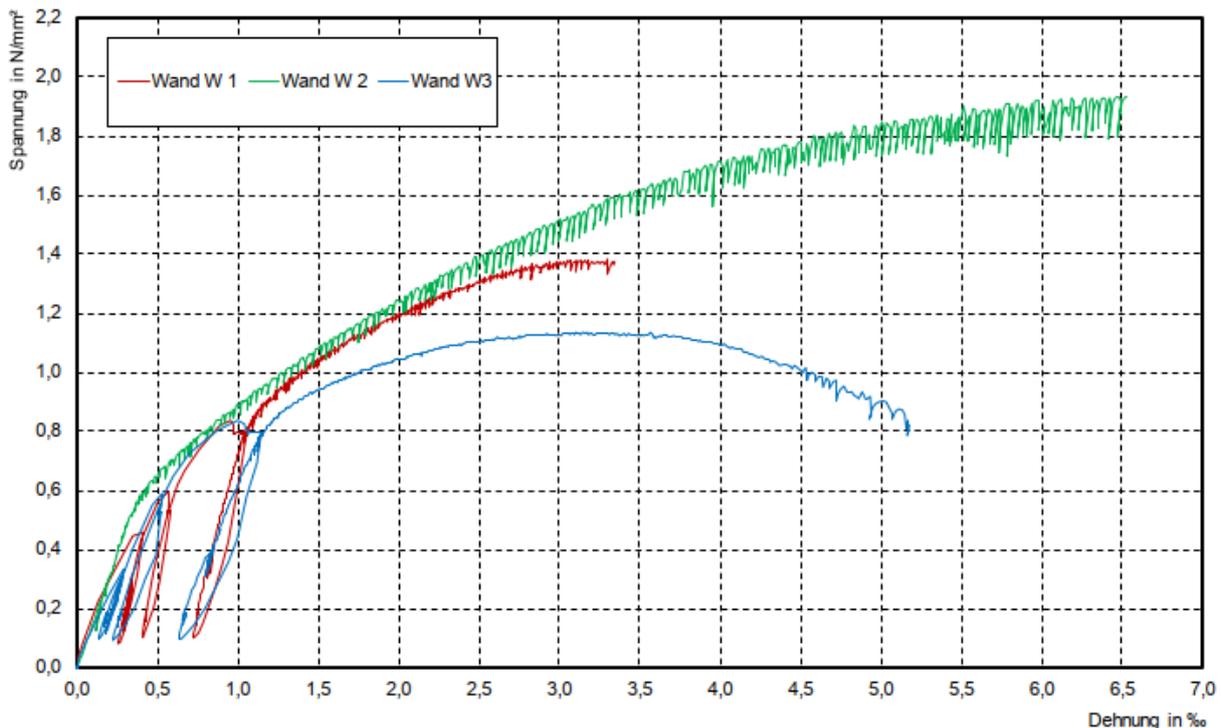


Abb. 48: Mittelwerte der Spannungs-Dehnungslinie der Wände 1 - 3 (Bauteilprüfkörper – 100 cm hoch, $\lambda = 10,0$)

Quelle: IfMB -Institut für Materialprüfung & Bauwerkserhaltung GmbH

Prüfkörper	Prüfalter	Feuchte	Fläche	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	Tage	M.-%	m ²	kg/m ³	kN	N/mm ²
W 1	44	1,27	0,099	1.927	136	1,38
W 2	45	1,41	0,101	2.145	222	2,20
W 3	47	1,28	0,098	1.929	111	1,13
Mittelwert		1,32		2.000	156	1,57

Abb. 49: Feuchtegehalt, Rohdichte, Bruchlast und Druckfestigkeit (Bauteilprüfkörper – 100 cm hoch, $\lambda = 10,0$)

Quelle: IfMB -Institut für Materialprüfung & Bauwerkserhaltung GmbH

Die Druckfestigkeit der 100 cm hohen und 10 cm breiten Bauteilprüfkörper mit einer Schlankheit von $\lambda = 10,0$ wurden nach ca. 45 Tagen geprüft. Bei einer Materialfeuchte von 1,32 M.-% lag die Rohdichte im Mittel bei 2.000 kg/m³ und die Druckfestigkeit bei 1,57 N/mm² im Mittel der Wände 1 bis 3.⁴⁹ Dabei zeigt die deutlich höhere Rohdichte von Prüfkörper W2 eine deutlich besseren Verdichtungsgrad, und im Ergebnis eine höhere Druckfestigkeit. Die unterschiedliche Restfeuchte scheint nur eine

⁴⁷ Burkert, T. und Jäger, W. (1), S. 8

⁴⁸ Vgl. Wigger H. und Ince, M., S. 19

⁴⁹ Wigger H. und Ince, M., S. 20

verminderte Auswirkung auf die Druckfestigkeit zu haben, da die Abweichung zu Prüfkörper W3 lediglich 9% beträgt.

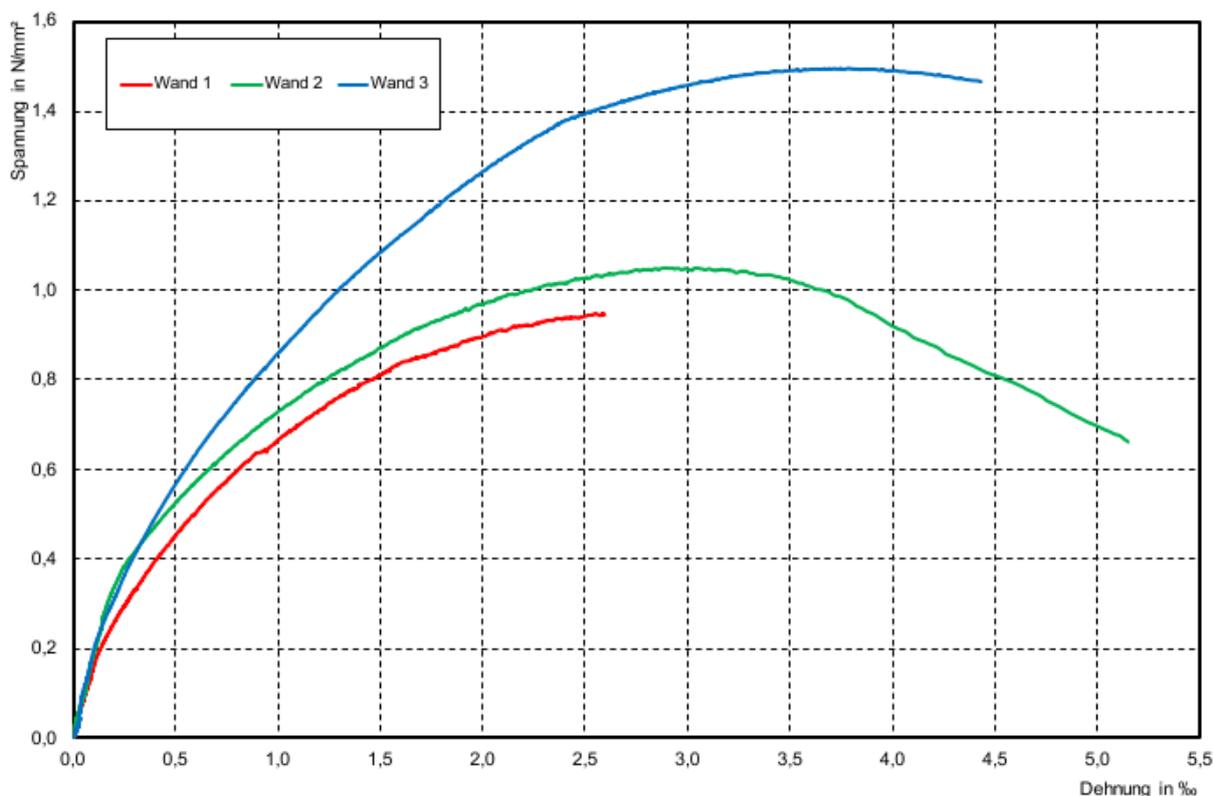


Abb. 50: Mittelwerte der Spannungs-Dehnungslinie der Wände 1 - 3 (Bauteilprüfkörper – 200 cm hoch, $\lambda = 13,3$)

Quelle: IfMB -Institut für Materialprüfung & Bauwerkserhaltung GmbH

Prüfkörper	Prüfalter	Feuchte	Fläche	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	Tage	M.-%	m ²	kg/m ³	kN	N/mm ²
W 1	252	1,24	0,211	2.157	200	0,95
W 2	252	1,20	0,211	2.173	231	1,10
W 3	277	1,05	0,210	2.239	314	1,49
Mittelwert:		1,16		2.189	248	1,18

Abb. 51: Feuchtegehalt, Rohdichte, Bruchlast und Druckfestigkeit (Bauteilprüfkörper – 200 cm hoch, $\lambda = 13,3$)

Quelle: IfMB -Institut für Materialprüfung & Bauwerkserhaltung GmbH

Die Druckfestigkeiten der 200 cm hohen und 15cm breiten Bauteilprüfkörper mit einer Schlankheit von $\lambda = 13,3$ wurden nach ca. 250 Tagen geprüft. Bei einer Materialfeuchte von 1,16 M.-% lag die mittlere Rohdichte bei 2.189 kg/m³ und die Druckfestigkeit bei 1,18 N/mm² im Mittel der Wände 1 bis 3.⁵⁰ Dabei zeigen alle Prüfkörper einen hohen Verdichtungsgrad, sodass der schlanke Wandquerschnitt und der damit verbundene schwierigere Herstellungsprozess nicht ausschließlich ursächlich für das schlechtere Ergebnis der Druckfestigkeit ggü. den Prüfkörpern mit einer Schlankheit von $\lambda = 10$ sind.

In der nachfolgenden Grafik werden zusammenfassend die Druckfestigkeits-Ergebnisse der klein- sowie großformatigen Prüfkörper im Mittel dargestellt.

⁵⁰ Wigger H. und Ince, M., S. 21

Anzahl	Breite	Länge	Höhe	Schlankheit	Rohdichte	Druckfestigkeit*	Variationskoeffizient
n	b	l	h	λ	ρ	f	V
-	cm	cm	cm	-	kN/m ³	N/mm ²	%
12	20	20	20	1,0	2.166	3,47	16
10		15**	30	2,0	2.186	2,49	8
2	40	100	100	2,5	2.095	1,76	12
3	10	100	100	10,0	2.000	1,57	36
3	15	141	200	13,3	2.189	1,18	24

* Mittelwerte ** Durchmesser

Abb. 52: Anzahl, Abmessungen, Rohdichte, Druckfestigkeit, Variationskoeffizient in Abhängigkeit von der Schlankheit λ

Quelle: IfMB -Institut für Materialprüfung & Bauwerkserhaltung GmbH

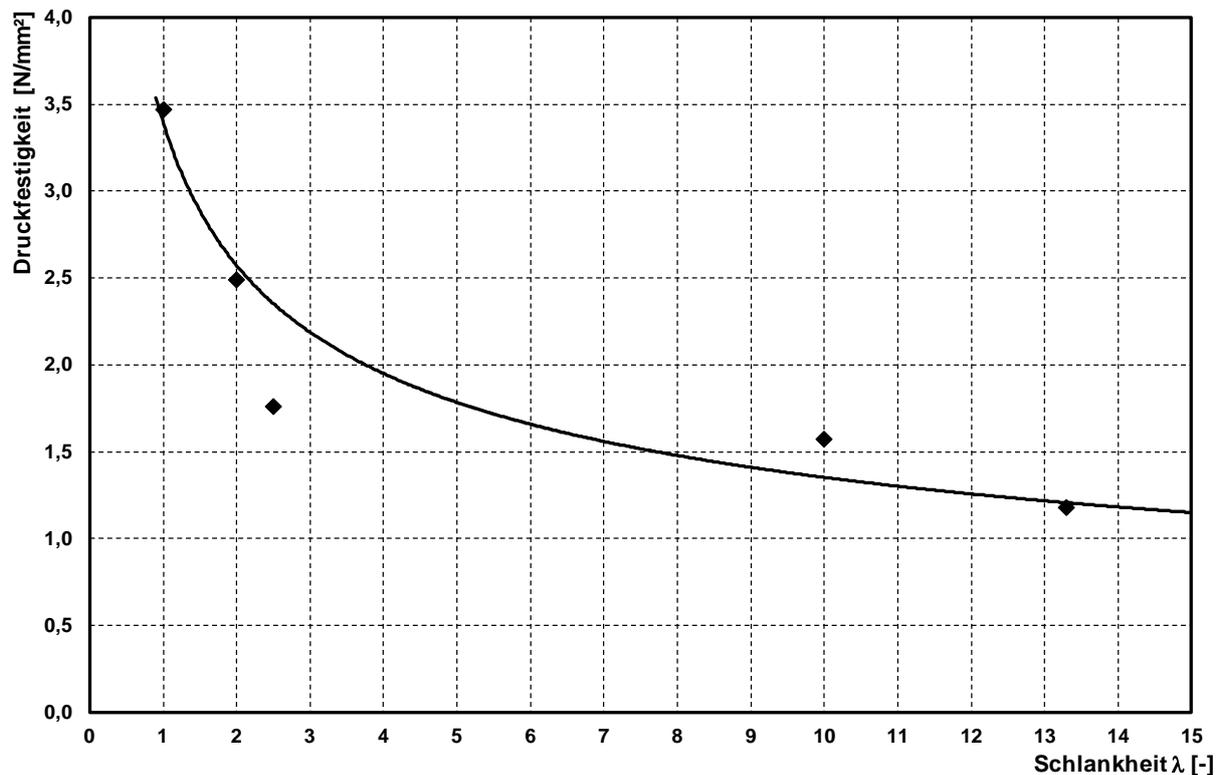


Abb. 53: Abhängigkeit von Schlankheit zu Druckfestigkeit

Quelle: Jäger Ingenieure GmbH

„Anhand der Werte [...] ist der allgemein bekannte Sachverhalt deutlich zu erkennen, dass mit zunehmender Schlankheit die Druckfestigkeit auch beim Stampflehm abnimmt.“⁵¹ Ebenso zeigt sich mit steigender Schlankheit der steigende Variationskoeffizient, der sich durch den schwierigeren Herstellungsprozess und eine inhomogenere Rohmaterialverteilung im Wandquerschnitt begründen lässt. Der Variationskoeffizient resultierend aus der absoluten Schlankheit des Bauteils steigt unter 20cm Bauteildicke um jeweils 50% bei 25%iger Querschnittsabnahme.

⁵¹ Burkert, T. und Jäger, W. (1), S. 7

6.5.3.4 Untersuchungsergebnisse: Elastizitätsmodul

„Die Ergebnisse der [E-Module der] geprüften Zylinder betragen im Mittel 2.901 N/mm² [mit] [...] einer Standardabweichung von 670 N/mm².“⁵²

Zylinder Nr.	Rohdichte (23°C / 50% r. F.)	Druckfestigkeit	E-Modul
	kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²
5	2.170	2,22	1.906
6	2.200	2,41	2.646
7	2.156	2,66	3.116
8	2.154	2,30	n. b.
9	2.194	2,51	2.178
10	2.194	2,52	3.076
12	2.197	2,35	3.023
13	2.183	2,45	2.524
14	2.217	2,61	4.032
16	2.193	2,92	3.612
Mittelwert	2.185	2,50	2.901
Standartabweichung	20	0,20	670
Variationskoeffizient	1 %	8 %	23 %

Abb. 54: E-Modul Zylinder

Quelle: IfMB -Institut für Materialprüfung & Bauwerkserhaltung GmbH

6.5.3.5 Untersuchungsergebnisse: Kriechverhalten

Kriechversuche schließen Verformungen aus Schwindverformungen, elastischen Verformungen und Kriechverformungen mit ein. Da der Versuch mit ca. ein Jahr alten Zylindern stattgefunden hat und Schwindverformungen zu diesem Zeitpunkt bereits abgeschlossen sind, wurden diese nicht näher untersucht. Die elastischen Verformungen konnten anhand von mechanischen Eigenschaften der Zylinder ermittelt werden. Der E-Modul liegt bei 2.901 N/mm². Mit einer Belastung von 0,707 N/mm² wird eine elastische Verformung von 0,244 ‰ erreicht. „Die maximale Kriechverformung liegt bei 1,88 ‰ (PS3), die Minimale bei 0,33 ‰ (PS 6) und der Mittelwert beträgt 1,08 ‰.“⁵³

⁵² Wigger H. und Relishkis, A., S. 11

⁵³ Wigger H. und Ince, M., S. 16

Probe	Gesamtverformung	Spannung	E-Modul	Endkriechzahl
	ϵ_{∞}	σ_c	E_c	ϵ_{∞}
	‰	N/mm ²	N/mm ²	-
PS 1	1,25	0,707	2901	4,15
PS 2	1,19	0,707	2901	3,88
PS 3	1,88	0,707	2901	6,72
PS 4	0,69	0,707	2901	1,85
PS 5	1,12	0,707	2901	3,61
PS 6	0,33	0,707	2901	0,36
Mittelwert	1,08			3,43
Standardabweichung m_x				2,17
Variationskoeffizient V_x				63%

Abb. 55: Gesamtverformung, Spannung, E-Modul und Endkriechzahl der Zylinder
 Quelle: IfMB -Institut für Materialprüfung & Bauwerkserhaltung GmbH

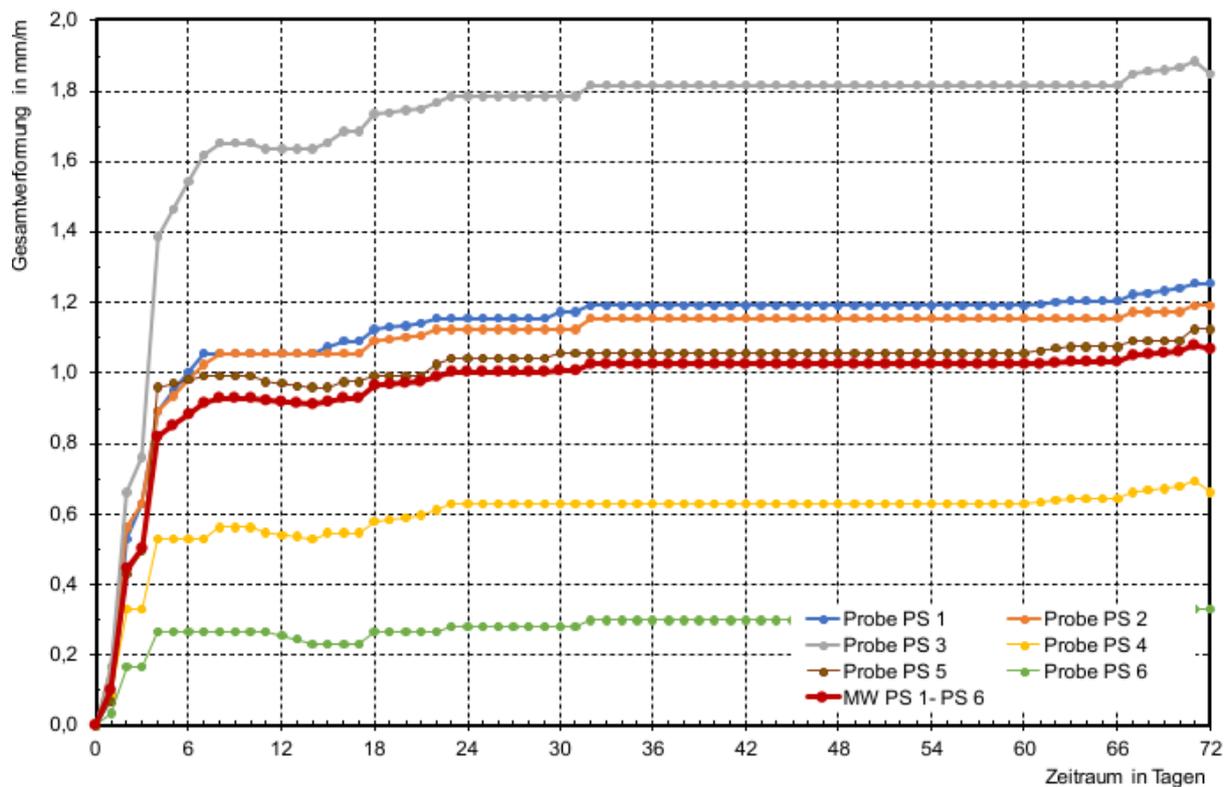


Abb. 56: Kriechverformungen der Zylinder (PS 1 bis PS 6) mit dem Mittelwert (MW) in Abhängigkeit der Zeit

Quelle: IfMB -Institut für Materialprüfung & Bauwerkserhaltung GmbH

6.5.4. Zusammenfassung und Vergleichswerte

Zur Einordnung der Untersuchungsergebnisse wurden die erzielten Materialparameter den Ergebnissen der Masterthesen von Relishkis (2001) und Hofschlag (2009) und den Angaben aus den Lehmbau Regeln gegenübergestellt.⁵⁴

6.5.4.1 Vergleichswerte: Rohdichte

Die ermittelten Rohdichten lassen sich in der Mitte des Wertebereiches der Lehmbau Regeln (1.700 – 2.400 kg/m³) einordnen. Zudem sind diese geringer als die in den Masterthesen angegebenen Werte.⁵⁵ Alle Werte weisen jedoch einen relativ geringen Variationskoeffizienten auf, welche die These der guten Herstellungsbedingungen unter laboratorischen Bedingungen unterstützt.

Institution/Quelle	Anzahl Prüfkörper	Rohdichte	Variationskoeffizient
		kg/m ³	
CONLUTO / IFMB (2021)	31	2.159	1 %
RELISHKIS (2021)	22	2.215	1 %
HOFSCHLAG (2009)	15	2.192	0,4 %

Abb. 57: Vergleichswerte Rohdichte Würfel
Quelle: IfMB -Institut für Materialprüfung & Bauwerkserhaltung GmbH

Institution/Quelle	Anzahl Prüfkörper	Rohdichte	Variationskoeffizient
		kg/m ³	
CONLUTO / IFMB (2021)	10	2.186	1 %
RELISHKIS (2021)	12	2.215	0,3 %
HOFSCHLAG (2009)	15	2.252	1 %

Abb. 58: Vergleichswerte Rohdichte Zylinder
Quelle: IfMB -Institut für Materialprüfung & Bauwerkserhaltung GmbH

6.5.4.2 Vergleichswerte: Druckfestigkeit

In den Lehmbau Regeln werden Druckfestigkeiten (bei Normklima: 23°C und 50% r. F.) als auch Erfahrungswerte von 3 – 5 N/mm² für Rohdichten von 2.000 – 2.200 kg/m³ angegeben. Die untersuchten Würfeldruckfestigkeiten liegen ebenfalls unter den Angaben der Masterthesen.⁵⁶ Dabei zeigt sich eine Korrelation zwischen der erreichten Rohdichte und der Druckfestigkeit, je höher die Rohdichte desto höher die Druckfestigkeit. Der Variationskoeffizient bei den für das Freilichtmuseum Detmold hergestellten würfelförmigen Probekörpern ist dabei überraschend hoch.

Institution/Quelle	Anzahl	Rohdichte (MW)	Druckfestigkeit (MW)	
		kg/m ³	N/mm ²	Variationskoeffizient
CONLUTO / IfMB ² (2021)	21	2.166	3,47	16 %
RELISHKIS (2021)	22	2.215	4,48	7 %
HOFSCHLAG (2009)	15	2.192	3,96	8 %

Abb. 59: Mittelwerte der Würfeldruckfestigkeit bei 23°C / 50% r. F.
Quelle: IfMB -Institut für Materialprüfung & Bauwerkserhaltung GmbH

⁵⁴ Vgl. Wigger H. und Relishkis, A., S. 12

⁵⁵ Vgl. Wigger H. und Relishkis, A., S. 12

⁵⁶ Vgl. Wigger H. und Relishkis, A., S. 13

Institution/Quelle	Anzahl	Rohdichte (MW)	Druckfestigkeit (MW)	
		kg/m ³	N/mm ²	Variationskoeffizient
CONLUTO / IfMB (2021)	10	2.186	2,49	8 %
RELISHKIS (2021)	11	2.214	2,87	5 %
HOFSCHLAG (2009)	15	2.252	2,69	6 %

Abb. 60: Mittelwerte der Zylinderdruckfestigkeit bei 23°C / 50% r. F.
Quelle: IfMB -Institut für Materialprüfung & Bauwerkserhaltung GmbH

6.5.4.3 Vergleichswerte: Elastizitätsmodul

„In den Lehm-Regeln [...] werden hinsichtlich des Elastizitätsmoduls von tragenden Stampflehmwänden keine Mindestanforderungen genannt. [...] [F]ür tragend eingesetzte Lehmsteine [gilt] ein Elastizitätsmodul von mindestens 750 N/mm² [...].“⁵⁷ Der in den Untersuchungen festgestellte E-Modul von 2.901 N/mm² ist im Vergleich zu den in den Masterthesen angegebenen Werten geringer. Der Variationskoeffizient ist mit einem Mittel von 23% ebenfalls relativ hoch.⁵⁸

Institution/Quelle	Anzahl	Elastizitätsmodul (MW)	Variationskoeffizient (MW)
		N/mm ²	
CONLUTO / IfMB (2021)	9	2.901	23 %
RELISHKIS (2021)	11	3.785	13 %
HOFSCHLAG (2009)	15	3.184	6 %

Abb. 61: Mittelwerte der E-Module
Quelle: IfMB -Institut für Materialprüfung & Bauwerkserhaltung GmbH

⁵⁷ Wigger H. und Relishkis, A., S. 14
⁵⁸ Vgl. Wigger H. und Relishkis, A., S. 14

6.5.5 Schlussfolgerungen aus den mechanischen Untersuchungen

Die Ergebnisse aus den mechanischen Untersuchungen haben sowohl für die Planung und Bemessung als auch für den Bauprozess wichtige Anforderungen und Hinweise geliefert.

Die feuchtetechnischen Untersuchungen in Abhängigkeit zur Rohdichte und Festigkeit haben dabei maßgeblichen Einfluss auf den Bauprozess in das Gesamttragwerk eingebundener Lehmwandkonstruktionen. So zeigt sich insbesondere für Bauteile mit Wanddicken von 60cm aufgrund des langsamen Trocknungsverhaltens über den Wandquerschnitt die Erfordernis einer kontinuierlichen Trocknungsüberwachung zur Feststellung und Bewertung von anteiligen Druckfestigkeiten für die Bemessung von Bauzwischenständen. Trocknungsdauern von über 200 Tagen, welche eine Bauunterbrechung bedingen, sind aktuell aufgrund terminkritischer Vorhaben nicht praxistauglich.

Ebenso relevant für die Baupraxis ist das Ergebnis der erzielten Druckfestigkeiten insbesondere bei den schlanken Bauteilgeometrien. Da 60cm starke Wandkonstruktionen in Bezug auf einen optimierten Ressourcenumgang in der Architektur zumindest kritisch zu bewerten sind, zeigt sich, dass auch bei schlankeren Wandkonstruktionen $\lambda > 10$ Rohdichten über 2.000kg/m^3 erzielt werden können.

Der hohe Variationskoeffizient bei den vorgenannten, schlankeren Konstruktionen in der Druckfestigkeit ist jedoch ein Indiz für Herausforderung schlanke Wandkonstruktionen in der gleichen Querschnittshomogenität wie breitere Konstruktionen herzustellen. Die erzielte hohe Rohdichte durch einen sorgfältigen Verdichtungsvorgang im Herstellungsprozess allein reicht für ein gutes Druckfestigkeitsergebnis und daraus resultierendes tragkonstruktives Verhalten von Lehmwänden nicht aus.

6.6 Untersuchungen zu Stampflehmwänden unter Brandbeanspruchung

Für die brandschutztechnischen Eigenschaften des Lehmbaus im Allgemeinen, wie auch im Neubau im Freilichtmuseum Detmold auszuführenden tragenden Stampflehmwände liegen keine normativen Regelungen zur Feuerwiderstandsklasse vor. In Abschnitt 5.5.2 „Brandverhalten von Lehmbauteilen“ der Lehmbau Regeln wird zwar angegeben, dass eine massiv gestampfte Lehmwand mit einer Dicke von 24 cm als feuerbeständig (F 90 A) eingeordnet werden kann. Allerdings bezieht sich die Angabe auf die DIN 18954 von 1956, die sich an die damalige Mauerwerksnorm DIN 1053 anlehnte. Aus dieser geht hervor, dass bei Gebäuden der Gebäudeklassen 1 und 2 auf einen besonderen Nachweis hinsichtlich der Stabilität verzichtet werden kann, sofern eine ausreichende Anzahl von aussteifenden Wänden vorhanden ist. Aufgrund der im Neubau des Freilichtmuseums zum Einsatz kommenden, relativ hohen Wandhöhen der Stampflehmwände, ist davon auszugehen, dass die Regelungen aus den 50er Jahren nicht übertragbar sind.⁵⁹

T 5-7 Feuerwiderstandsklasse von Wänden aus Lehmbaumaterialien	
Bauteil	Klassifizierung
Massive Wände Massive gemauerte oder gestampfte Lehmwände (der Baustoffklasse A) einer Dicke von 24 cm ¹⁾	F 90 A
Fachwerkwände mit ausgefüllten Gefachen Bedingungen: Holzquerschnitte mind. 100x100 mm bei 1seitiger, mind. 120x120 mm bei 2seitiger Brandbeanspruchung, Ausfüllung mit Lehm-schlag (Strohlehmausfachung), mindestens einseitige Bekleidung, z. B. mit 15 mm Putz ²⁾	F 30 B
¹⁾ Nach DIN V 18954: 1956 ²⁾ Vgl. DIN 4102-4 4.11: 1994-03, Abschnitt 4.11, Bedingungen im Einzelnen siehe dort.	

2.2 Aussteifung belasteter Wände

2.21 Belastete Wände müssen durch Querwände ausreichend aussteift sein. Sind die aussteifenden Querwände durch Öffnungen unterbrochen, so muß der Abstand der ersten Öffnung von der aussteifenden Wand $\geq 1/3$ der GeschöÙhöhe sein, mindestens jedoch 50 cm betragen. Dicken und Mindestabstände der aussteifenden Querwände müssen Tafel 2 entsprechen.

Tafel 2 Aussteifende Querwände

Spalte	a	b	c	d	e
Wanddicken und Mittenabstände					
Zeile	Dicke der aussteifenden belasteten Wand in cm	GeschöÙhöhe in m	Aussteifende Querwand		
			im 1. bis 4. Voll-geschöÙ von oben Dicke in cm	im 5. u. 6. Voll-geschöÙ von oben Dicke in cm	Mitten-abstand in m
1	$\geq 11,5 < 17,5$	$\geq 3,25$	$\geq 11,5$	$\geq 17,5$	$\geq 4,50$
2	$\geq 17,5 < 24$	$\geq 3,50$	$\geq 11,5$	$\geq 17,5$	$\geq 6,00$
3	$\geq 24 < 30$	$\geq 3,50$	$\geq 11,5$	$\geq 17,5$	$\geq 8,00$
4	≥ 30	$\geq 5,00$	$\geq 11,5$	$\geq 17,5$	$\geq 8,00$

Die aussteifenden Querwände müssen mit den aussteifenden belasteten Wänden gleichzeitig hochgeführt und mit ihnen im Verband gemauert werden. Ist das gleichzeitige Hochführen der belasteten und der aussteifenden Wände baulich besonders schwierig, so kann Loch- oder stehende Verzahnung in folgenden Fällen angewendet werden:

Abb. 62 (links): Tabelle T 5-7 aus den Lehmbau Regeln

Quelle: Lehmbau Regeln

Abb. 63 (rechts): Auszug aus DIN 1053 (12/1952), Abschnitt 2.2 Aussteifung belasteter Wände

Quelle: DIN 1053

Die Brandversuche wurden durch die MFPA Leipzig GmbH auf deren Gelände durchgeführt. „Planung und Aufbau wurden unter der Leitung des Ingenieurbüros Jäger Ingenieure GmbH festgelegt.“⁶⁰ Die Versuche wurden zur Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer und zur Erlangung der Zustimmung im Einzelfall (ZiE) durchgeführt (vgl. Kapitel 6.4).

Aufgrund der baurechtlichen Einordnung des Neubaus in die Gebäudeklasse 3 gelten die nachfolgenden Anforderungen an tragende und aussteigende Bauteile:

- Ausstellungsgebäude: feuerhemmend (§27 BauO NRW 2018)
- Eingangsgebäude: feuerhemmend (§27 BauO NRW 2018 und §3 (1) SBauVO)
- Servicegebäude: feuerhemmend (§27 BauO NRW 2018 und §3 (1) SBauVO)⁶¹

Entsprechend des Brandschutzkonzeptes müssen die ca. 60 cm starken tragenden Stampflehmwände nicht raumabschließend den Anforderungen an einen Feuerwiderstand von F30 (feuerhemmend)

⁵⁹ Vgl. Burkert, T. und Jäger, W. (2), S. 11

⁶⁰ Juknat, M. und Dorn, E. (1), S. 2

⁶¹ Burkert, T. und Jäger, W. (2), S. 10

entsprechen.⁶² Die Untersuchungen in Bezug auf die Rauchdichtigkeit, den Wärmedurchgang und die mechanische Beanspruchbarkeit wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ergänzend zu den notwendigen Mindestanforderungen durchgeführt.

6.6.1 Prüfkörperherstellung und Lagerung

Wie im Fall der mechanischen Untersuchungen wurden die Prüfkörper mit Stampflehm von der Fa. Conluto Vielfalt aus Lehm gefertigt.

In der Übersicht der Prüfkörper (Abb. 32) bereits zu sehen, wurden für die Untersuchung der Brandauswirkungen zwei großmaßstäbliche Prüfkörper erstellt:

- Prüfkörper 1: b = 3.000 mm, h = 3.000 mm, d = 220 mm, λ = 13,6
- Prüfkörper 2: b = 3.000 mm, h = 3.000 mm, d = 600 mm, λ = 5,0

Aufgrund der derzeit fehlenden Möglichkeit, Brandprüfungen in den Dimensionen der im Neubau des Freilichtmuseums zum Einsatz kommenden Stampflehmkonstruktionen in Deutschland durchzuführen, wurden zwei Prüfkörper angefertigt. Dabei weist Prüfkörper 1 die Schlankheit und Prüfkörper 2 die Originaldicke der geplanten und ausgeführten Innenwand auf.⁶³

Auf Grundlage der Ergebnisse aus den mechanischen Untersuchungen wurde darauf geachtet, dass eine Ausgleichsfeuchte von 1,5 - 1,9 M-% bei beiden Prüfkörpern vor den Brandversuchen erreicht wurde.⁶⁴ Nähere Informationen zur Herstellung und Lagerung sowie zu Baustoffkennwerten der Prüfbaukörper können den nachfolgenden tabellarischen Aufstellungen entnommen werden.

Gesamtabmessungen der geprüften Konstruktion: Breite: b = 3000 mm, Höhe: h = 3000 mm, Dicke: d = 220 mm		
Position	Material/ Abmessungen	Anmerkungen
Wandkonstruktion:  Abbildung: Schalungskonstruktion	<u>Stampflehmwand:</u> Lagenweises (Schichten von 100 mm bis 150 mm) einbringen und verdichten von „Conluto Stampflehm grob“ in eine vorbereitete Holzbrettschalung mit einer Öffnungsbreite von 220 mm Wärmeleitfähigkeit 1,40 W/mK Korngruppe, Überkorngröße 0/22, < 30 mm Druckfestigkeit ≥ 3 N/mm ² Die Verdichtung erfolgte mit einem pneumatischen Stampfer Metallstampffuß 80 mm x 80 mm Verdichtungsenergie 29 Joule <u>Verschluss Schalungslöcher</u> Die Schalungslöcher wurden mit Conluto Stampflehm groß und fein verschlossen. Der Verschluss der Schalungslöcher erfolgte am 16. März 2022	<u>Anmerkung:</u> Der Stampflehm wurde in Big Bags zur Prüfstellung geliefert und vor dem Einbau auf dem Hallenboden ausgebreitet und mittels Lüfter vorgetrocknet Die Stampflehmwand wurde am 19. Januar 2022 hergestellt und bis zum 07. Februar 2022 in der Holzbrettschalung belassen Am 07. Februar 2022 wurde die Stampflehmwand komplett ausgeschalt <u>Anmerkung Schalungslöcher:</u> Durch die Stampflehmwand waren 16 Stück Gewindestangen zur Halterung der Holzbrettschalung geführt. Diese Gewindestangen wurden nach dem Ausschalen entfernt

Abb. 64: Auflistung der konstruktiven Details des Prüfkörpers 1 (d = 220 mm)

Quelle: MFPA Leipzig GmbH - Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH

⁶² Vgl. Burkert, T. und Jäger, W. (2), S. 13

⁶³ Vgl. Burkert, T. und Jäger, W. (2), S. 30

⁶⁴ Vgl. Burkert, T. und Jäger, W. (1), S. 28

Baustoffbezeichnung	Dicke [mm]	Rohdichte Einbauzustand [kg/m³]	Feuchte- gehalt [M.-%]	Baustoffklassifizierung
Stampflehm grob Conluto ³⁾ Firma Conluto (Vielfalt aus Lehm) Wärmeleitfähigkeit 1,40 W/mK Korngruppe, Überkorngröße 0/22, < 30 mm Nennrohddichte (trocken) 2200 kg/m³ Druckfestigkeit ≥ 3 N/mm² Trocknungsschwindmaß < 0,5%	220	2151,4	nach 28 Tagen 4,37	A1 ¹⁾
		1910,5	nach 60 Tagen 2,84	
		2153,5	nach ²⁾ 132 Tagen 1,81	

1) Gemäß Produktdatenblatt der Firma Conluto

2) Die Feuerwiderstandsprüfung erfolgte nach 157 Tagen Trocknungszeit

3) Abschrift Produktdatenblatt der Firma Conluto: Stampflehm ist eine Fertigmischung nach den Lehm-Bau-Regeln (3.9) des „Dachverbandes Lehm“. Er wird hergestellt aus gemischt-körnigem bis steinigem Baulehm mit einer Bindekraft von 80 g/cm³ und mineralischen Zuschlägen aus Grobsand, Kies oder Splitt.

Abb. 65: Baustoffkennwerte des Prüfkörpers 1 (d = 220 mm)

Quelle: MFPA Leipzig GmbH - Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH

Gesamtabmessungen der geprüften Konstruktion: Breite: b = 3000 mm, Höhe: h = 3000 mm, Dicke: d = 600 mm		
Position	Material/ Abmessungen	Anmerkungen
Wandkonstruktion:  Abbildung: Zwischenunterstützung	<u>Stampflehmwand:</u> Lagenweises (Schichten von 100 mm bis 150 mm) einbringen und verdichten von „Conluto Stampflehm grob“ in eine vorbereitete Holzbrettschalung mit einer Öffnungsbreite von 600 mm Wärmeleitfähigkeit 1,40 W/mK Korngruppe, Überkorngröße 0/22, < 30 mm Druckfestigkeit ≥ 3 N/mm² Die Verdichtung erfolgte mit einem pneumatischen Stampfer Metallstampffuß 80 mm x 80 mm Verdichtungsenergie 29 Joule <u>Verschluss Schalungslöcher</u> Die Schalungslöcher wurden mit Conluto Stampflehm groß und fein verschlossen. Der Verschluss der Schalungslöcher erfolgte am 16. März 2022	<u>Anmerkung:</u> Der Stampflehm wurde in Big Bags zur Prüfstelle geliefert und vor dem Einbau auf dem Hallenboden ausgebreitet und mittels Lüfter vorgetrocknet Die Stampflehmwand wurde am 13. Januar 2022 hergestellt und bis zum 07. Februar 2022 in einer Aussteifungskonstruktion mittels zwei vertikalen Holzbohlen, welche beidseitig angeordnet waren, belassen <u>Anmerkung Schalungslöcher:</u> Durch die Stampflehmwand waren 16 Stück Gewindestangen zur Halterung der Holzbrettschalung geführt. Diese Gewindestangen wurden nach dem Ausschalen entfernt

Abb. 66: Auflistung der konstruktiven Details des Prüfkörpers 2 (d = 600 mm)

Quelle: MFPA Leipzig GmbH - Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH

Baustoffbezeichnung	Dicke [mm]	Rohdichte Einbauzustand [kg/m ³]	Feuchte- gehalt [M.-%]	Baustoffklassifizierung
Stampflehm grob Conluto ³⁾ Firma Conluto (Vielfalt aus Lehm) Wärmeleitfähigkeit 1,40 W/mK Korngruppe, Überkorngröße 0/22, < 30 mm Nennrohddichte (trocken) 2200 kg/m ³ Druckfestigkeit ≥ 3 N/mm ² Trocknungsschwindmaß < 0,5%	600	2281,5	nach 28 Tagen 5,90	A1 ¹⁾
		2070,1	nach 60 Tagen 4,68	
		1913,1	nach 174 Tagen 1,62	
		2010,5	nach ²⁾ 204 Tagen 1,79	

¹⁾ Gemäß Produktdatenblatt der Firma Conluto

²⁾ Die Feuerwiderstandsprüfung erfolgte nach 225 Tagen Trocknungszeit

³⁾ Abschrift Produktdatenblatt der Firma Conluto: Stampflehm ist eine Fertigmischung nach den Lehm-Bau-Regeln (3.9) des „Dachverbandes Lehm“. Er wird hergestellt aus gemischt-körnigem bis steinigem Baulehm mit einer Bindekraft von 80 g/cm³ und mineralischen Zuschlägen aus Grobsand, Kies oder Splitt.

Abb. 67: Baustoffkennwerte des Prüfkörpers 2 (d = 600 mm)

Quelle: MFPA Leipzig GmbH - Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH

Der 220 mm starke Prüfbaukörper wurde nach einer Trocknungszeit von 157 Tagen geprüft. Dabei wurde die am 19.01.2022 gestampfte Konstruktion am 07.02.2022 ausgeschalt.⁶⁵ Die 600 mm starke Stampflehmwand hingegen wurde unmittelbar im Anschluss an das Verdichten ausgeschalt und 225 Tage getrocknet. Nach dem Ausschalen wurde die Wand durch zwei vertikal angeordnete Holzbohlen bis zum 07.02.2022 ausgesteift.⁶⁶

⁶⁵ Vgl. Juknat, M. und Dorn, E. (1), S. 2

⁶⁶ Vgl. Juknat, M. und Dorn, E. (2), S. 3

6.6.2 Prüfanordnung und -durchführung

Beide Stampflehmkonstruktionen wurden in einem aus Stahl hergestellten Normtragrahmen, der oben und unten gehalten ist, untersucht. Eine Dichtheit des Ofens wurde durch eine Verfüllung der seitlichen Spalte (ca. 25 mm) mit Mineralwolle (Schmelzpunkt > 1.000°C) erreicht.⁶⁷

15 Minuten vor Beginn der Feuerwiderstandsprüfung wurden die - durch das Gutachterbüro Jäger Ingenieure GmbH vorgegebenen - Belastungen auf die Wandkonstruktionen aufgebracht:

- Prüfkörper 1 (d = 220 mm): 153 kN (51 kN/m)⁶⁸
- Prüfkörper 2 (d = 600 mm): 414 kN (138 kN/m)⁶⁹

„Die Belastung wurde über zwei hydraulische Zylinder, welche die Last über eine lastverteilende und ausreichend biegesteife Traverse gemäß DIN EN 1365-1: 2013-08, Abschnitt 4.3 in die Konstruktion einleiten und während der Feuerwiderstandsprüfung konstant halten.“⁷⁰

Der Brandraum wurde entsprechend der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) aufgeheizt. Acht Platten-Thermometer wurden in einem Abstand von 100 mm zur Oberfläche der Wandkonstruktion zur Messung der Temperaturen im Brandraum positioniert.

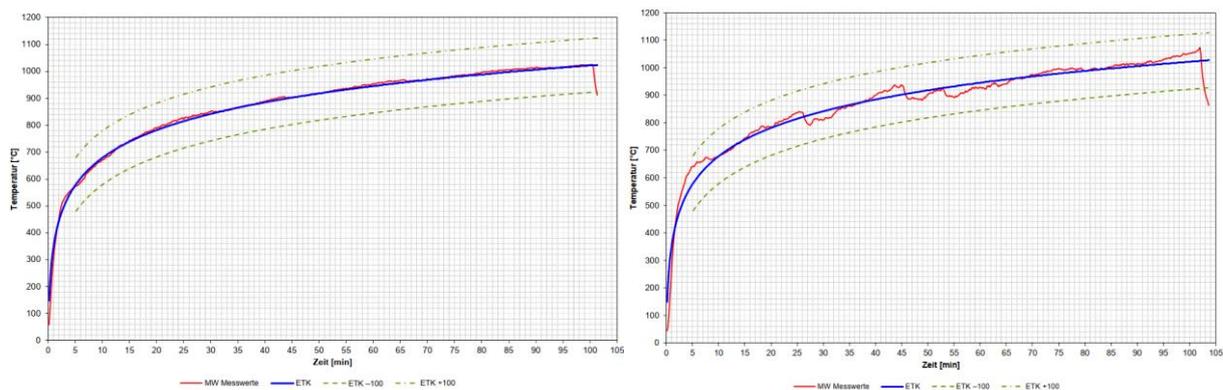


Abb. 68: Temperatur im Brandraum nach ETK für den Prüfkörper 1, d = 220 mm (links) und den Prüfkörper 2, d = 600 mm (rechts)

Quelle: MFPA Leipzig GmbH - Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH

Zusätzlich wurden 11 NiCr-Ni-Thermoelemente auf der feuerabgewandten Seite der Prüfkörper installiert. Weiterhin „wurden fünf Messleitern mit jeweils elf NiCr-Ni-Thermoelemente (Messspitze Perle) innerhalb der Konstruktion angebracht, um den Temperaturverlauf innerhalb des Bauteiles über die Querschnittstiefe aufzuzeichnen.“⁷¹ Eine in 1 m Entfernung zum Prüfkörper installierte Messstelle zeichnete die Umgebungstemperatur auf.⁷²

In 2,90 m Entfernung zum Fußboden des Brandraumes wird ein Differenzdruck-Messumformer angebracht. „Zur Messung und Aufzeichnung der Verformungen wurden an drei verschiedenen Stellen in halber Wandhöhe sowie an zwei Stellen an der unteren Traverse de[r] Probekörper [...] potentiometrische Wegsensoren installiert.“⁷³

⁶⁷ Vgl. Juknat, M. und Dorn, E. (2), S. 3

⁶⁸ Vgl. Juknat, M. und Dorn, E. (1), S. 3

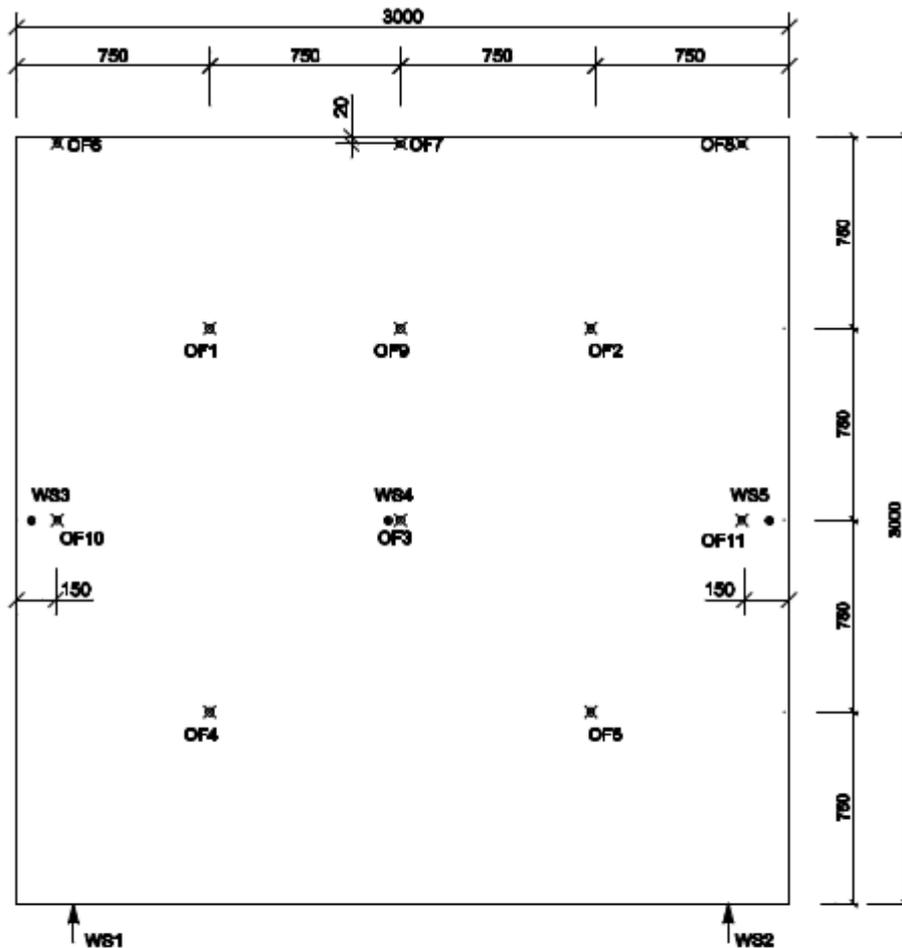
⁶⁹ Vgl. Juknat, M. und Dorn, E. (2), S. 3

⁷⁰ Juknat, M. und Dorn, E. (1), S. 3

⁷¹ Juknat, M. und Dorn, E. (1), S. 4

⁷² Vgl. Juknat, M. und Dorn, E. (2), S. 4

⁷³ Juknat, M. und Dorn, E. (2), S. 4



Messstellenübersicht	Positionsbeschreibung
OF1 bis OF5	Oberflächenmessstellen MW im Bereich der Wandkonstruktion (mindestes 50 mm von den Fugen entfernt) Homogener fugenloser Baustoff
OF6 bis OF11	Oberflächenmessstellen im Bereich der Wandkonstruktion
WS1 bis WS2	Verformungsmessung Stauchung
WS3 bis WS5	Verformungsmessung Durchbiegung

Abb. 69: Messstellenplan der Oberflächenthermoelemente im Bereich der Wandkonstruktion und Lage der Wegsensoren

Quelle: MFPA Leipzig GmbH - Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH

Innerhalb von zehn Sekunden Intervallen wurden folgende Messgrößen aufgezeichnet:

- Brandraumtemperatur
- Oberflächentemperaturen
- Verformungen der Wandkonstruktionen
- Druck im Brandraum



Abb. 70 (links): Ansicht der feuerabgewandten Seite der Stampflehmwandkonstruktion $d = 220$ mm

Quelle: MFPA Leipzig GmbH - Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH

Abb. 71 (rechts): Ansicht der feuerzugewandten Seite der Stampflehmwandkonstruktion $d = 600$ mm

Quelle: MFPA Leipzig GmbH - Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH

„Beide Versuchswände wurden über die avisierte Zeit von 30 min, die für die Einstufung der Wand in feuerhemmend F30 erforderlich wären, hinaus geprüft. Die beiden Versuchswände wurden bis zur vollendeten 90. Minute einseitig mittels ETK brandbeansprucht und danach [...] nacheinander 3 Pendelschläge nach DIN EN 1363-2:1999-10 durchgeführt.“⁷⁴

- Prüfende: Prüfkörper 1 ($d = 220$ mm) nach 100 Minuten
- Prüfende: Prüfkörper 2 ($d = 600$ mm) nach 102 Minuten



Abb. 72: Pendelschläge nach Vollendung der 90. Minute zur Ermittlung der mechanischen Beanspruchung

Quelle: MFPA Leipzig GmbH - Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH

⁷⁴ Burkert, T. und Jäger, W. (2), S. 29

6.6.3 Prüfbeobachtungen

Die Beobachtungen während des Prüfvorgangs können den nachfolgenden Tabellen in Abhängigkeit zur Prüfzeit und Beobachtungsseite entnommen werden. „F“ steht dabei für die Feuerzugewandte Seite und „FA“ für die Feuerabgewandte Seite.

Prüfzeit [min:s]	Beobachtungen während der Prüfung	Beobachtungsseite ¹⁾
23:00	Weitere Rissaufweitung des Vertikalrisses auf der linken Probekörperseite.	FA
28:00	Weiterer Horizontalriss auf der linken Probekörperseite ca. in halber Höhe.	FA
30:00	Verformung der Stampflehmwand Richtung Brandraum zu erkennen.	F/FA
38:00	Rissaufweitung des benannten Vertikalrisses auf der linken Probekörperseite.	FA
48:00	Leichte Verfärbung (Wasserdampf) auf der Probekörperoberfläche in einem lokalen Bereich am Riss auf der linken Probekörperseite.	FA
50:00	Knackgeräusch im Probekörper wahrzunehmen.	---
64:00	Zunehmende Verfärbung (Wasserdampf) auf der Probekörperoberfläche in einem lokalen Bereich am Riss auf der linken Probekörperseite.	FA
67:00	Weiterer Riss auf der linken Probekörperseite zu erkennen.	FA
69:00	Weitere lokale Verfärbungen (Wasserdampf) auf der Probekörperoberfläche an verschiedenen Stellen in den Rissbereichen.	FA
76:00	Zunehmende Verformung der Stampflehmwand Richtung Brandraum.	F/FA
80:00	Weitere lokale Verfärbungen (Wasserdampf) auf der Probekörperoberfläche an verschiedenen Stellen in den Rissbereichen.	FA
90:00	Keine signifikante weitere Veränderung an der Wandkonstruktion.	F/FA
90:00	Wegsensoren für die Durchbiegungsmessung wurden entfernt.	FA
92:00	Ausführung des 1. Pendelschlags:	---
	Ergebnis: Keine sichtbare Veränderung/Beschädigung des Probekörpers aufgrund der Stoßbeanspruchung.	FA
	Ergebnis: Keine sichtbare Veränderung/Beschädigung des Probekörpers aufgrund der Stoßbeanspruchung.	F
93:00	Ausführung des 2. Pendelschlags:	---
	Ergebnis: Keine sichtbare Veränderung/Beschädigung des Probekörpers aufgrund der Stoßbeanspruchung.	FA
	Ergebnis: Keine sichtbare Veränderung/Beschädigung des Probekörpers aufgrund der Stoßbeanspruchung.	F
94:00	Reduzierung der Last auf 5% der Gesamtlast.	---
96:00	Ausführung des 3. Pendelschlags:	---
	Ergebnis: Keine sichtbare Veränderung/Beschädigung des Probekörpers aufgrund der Stoßbeanspruchung.	FA
	Ergebnis: Keine sichtbare Veränderung/Beschädigung des Probekörpers aufgrund der Stoßbeanspruchung.	F
100:00	Beendigung der Feuerwiderstandsprüfung in Abstimmung mit dem Auftraggeber.	---

Abb. 73: Beobachtungen während der Feuerwiderstandsprüfung vom 24.06.22 am Prüfkörper 1 (d = 220 mm)

Quelle: MFPA Leipzig GmbH - Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH

Prüfzeit [min:s]	Beobachtungen während der Prüfung	Beobachtungsseite ¹⁾
-15:00	Vorgegebene Belastung von 138,0 kN/m vollständig aufgebracht.	---
0:00	Start der Prüfung.	---
2:00	Leichter Rauchaustritt am linken Wandanschluss im oberen Bereich (Übergang Mineralwolle).	FA
5:00	Anhaltender leichter Rauchaustritt am linken Wandanschluss (Übergang Mineralwolle).	FA
6:00	Leichte Verfärbungen über der Stampflehmoberfläche.	F
8:00	Zunehmende Verfärbungen über der Stampflehmoberfläche.	F
20:00	Vertikalriss ca. in Probekörpermitte in der oberen Probekörperhälfte.	FA
26:00	Im unteren Bereich bricht ein Teil der Stampflehmoberfläche zusammen, danach rutscht die gesamte obere Stampflehmwandscheibenoberfläche nach und stellt sich vor den Probekörper	F
28:00	Entstehender Vertikalriss in der vorstehenden Stampflehmplattenscholle zu erkennen.	F
32:00	Zunehmender Vertikalriss in der vorstehenden Stampflehmplattenscholle zu erkennen.	F
33:00	Leichter Horizontalriss in der vorstehenden Stampflehmplattenscholle zu erkennen.	F
46:00	Die Stampflehmplattenscholle ist in sich zusammengefallen.	F
48:00	Weitere Stampflehmbestandteile fallen vom Probekörper ab.	F
52:00	Leichter Rauchaustritt am oberen Abschluss zwischen Stampflehm und Mörtelbett.	FA
60:00	Stampflehmbestandteile stehen vom Probekörper ab.	F
62:00	Weitere Stampflehmbestandteile fallen vom Probekörper ab.	F
67:00	Leichter Rauchaustritt an einer lokalen Stelle im benannten Vertikalriss.	FA
70:00	Weitere Stampflehmbestandteile fallen vom Probekörper ab.	F
80:00	Weitere Stampflehmbestandteile fallen vom Probekörper ab.	F
90:00	Weitere Stampflehmbestandteile fallen vom Probekörper ab.	F
90:00	Keine signifikante weitere Veränderung an der Wandkonstruktion.	F/FA
90:00	Wegsensoren für die Durchbiegungsmessung wurden entfernt.	FA
92:00	Ausführung des 1. Pendelschlags:	---
	Ergebnis: Keine sichtbare Veränderung/Beschädigung des Probekörpers aufgrund der Stoßbeanspruchung.	FA
	Ergebnis: Keine sichtbare Veränderung/Beschädigung des Probekörpers aufgrund der Stoßbeanspruchung.	F
93:00	Ausführung des 2. Pendelschlags:	---
	Ergebnis: Keine sichtbare Veränderung/Beschädigung des Probekörpers aufgrund der Stoßbeanspruchung.	FA
	Ergebnis: Keine sichtbare Veränderung/Beschädigung des Probekörpers aufgrund der Stoßbeanspruchung.	F
94:00	Reduzierung der Last auf 5% der Gesamtlast.	---
96:00	Ausführung des 3. Pendelschlags:	---
	Ergebnis: Keine sichtbare Veränderung/Beschädigung des Probekörpers aufgrund der Stoßbeanspruchung.	FA
	Ergebnis: Keine sichtbare Veränderung/Beschädigung des Probekörpers aufgrund der Stoßbeanspruchung.	F
102:00	Beendigung der Feuerwiderstandsprüfung in Abstimmung mit dem Auftraggeber.	---

Abb. 74: Beobachtungen während der Feuerwiderstandsprüfung vom 26.08.22 am Prüfkörper 2 (d = 600 mm)

Quelle: MFPA Leipzig GmbH - Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH

6.6.4 Prüfergebnisse

Alle gemessenen Werte können den Prüfberichten der MFPA Leipzig GmbH in Anlage A3 und A4 (siehe Anlagen) in Form von Diagrammen entnommen werden. Bei einseitiger Brandbeanspruchung wurden in beiden Fällen hinsichtlich der Tragfähigkeit, des Raumabschlusses und der Wärmedämmung gemäß DIN EN 13501-2:2016-12 die Anforderungen für die Feuerwiderstandsklassen REI 90-M erreicht. „Voraussetzung für die Gültigkeit der vorgenannten Aussagen ist, dass die in diesem Prüfbericht angegebenen Randbedingungen eingehalten werden.“⁷⁵ Den nachfolgenden Tabellen können die Prüfergebnisse beider Versuche im Vergleich zu den Leistungskriterien nach DIN EN 1365-1 in Verbindung mit DIN EN 1363-1 für tragende Wandkonstruktionen in Stampflehmbauweise entnommen werden.

Zeile	Norm-bezug Angaben nach DIN EN 1363-1: 2020-05 Abschnitt:	Anforderungen		Prüfergebnisse an der tragenden Stampflehmwandkonstruktion				Vergleich der Prüfergebnisse mit den Leistungskriterien nach DIN EN 1365-1: 2013-08
				Beschreibung				REI 90-M
1	11.1	Tragfähigkeit	Beibehaltung der Tragfähigkeit unter Last:	vorh. max. Belastung		51,0 kN/m		erfüllt
2			Grenzwert der vertikalen Stauchung	Tragfähigkeitserhalt über:		mindestens 100 Minuten		
			Stauchungsgeschwindigkeit	C = h/100 C = 30 mm		Maximal 22,36 mm nach 90 Minuten an WS1		erfüllt
3	11.2	Raumabschluss d.h. Vermeidung von:	Entzündung des Wattebausches	Entzündung des Wattebausches erfolgte nach:		Test nicht erforderlich -nicht erfolgt-		
4			Auftreten von Spalten	Das Durchdringen einer Spaltlehre erfolgte nach:		Test nicht erforderlich -nicht erfolgt-		
5			Flammen auf der abgekehrten Seite	Anhaltende Flammenbildung trat auf nach:		-nicht erfolgt-		erfüllt
6	11.3	Wärmedämmung d.h. Temperaturerhöhung auf der dem Feuer abgekehrten Seite über die Anfangstemperatur: max. zul. Mittelwert ΔT = 140 K max. zul. Einzelwert ΔT = 180 K	Prüfdauer in min:	30	60	90	100	
7			max. festgestellte Temperaturerhöhung: Mittelwert in K:	0	7	37	45	
8			max. festgestellte Temperaturerhöhung: - Einzelwert in K:	1,5	12	45	51	
			- an Messstelle:	OF 6	OF 6	OF 10	OF 3	
9	5.6	Sonstige Angaben	Umgebungstemperatur bei Beginn der Prüfung im Labor:	29°C				Angaben, z.B. über Baustoffe, Rohdichten und Feuchtigkeitsgehalt, siehe Tabelle 2
10			Die Umgebungstemperatur stieg/ sank während der Prüfung um max.:	+ 1 K				
11	5.2.2.1		Druck im Brandraum:	gem. DIN EN 1363-1 vgl. Anlage 4				
12			Rauchentwicklung:	gering				
13			horizontale Verformung:	WS4				
			- Größe	40 mm				
		- Zeitpunkt	90 min					
14	DIN EN 1363-2: 1999-10 Abschnitt: 7	Mechanische Beanspruchung (Stoßprüfung) nach Erreichen der Klassifizierungszeit	Verhalten R-, E- und I nach Stoßprüfung eingehalten	1. Stoß	2. Stoß	3. Stoß	erfüllt	
				ja	ja	ja		

Abb. 75: Vergleich der Prüfergebnisse des Prüfkörpers 1 (d = 220 mm) mit den Leistungskriterien
Quelle: MFPA Leipzig GmbH - Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH

⁷⁵ Juknat, M. und Dorn, E. (1), S. 8

Zeile	Normbezug Angaben nach DIN EN 1363-1: 2020-05 Abschnitt:	Anforderungen		Prüfergebnisse an der tragenden Stampflehmwandkonstruktion d = 600 mm				Vergleich der Prüfergebnisse mit den Leistungskriterien nach DIN EN 1365-1: 2013-08
				Beschreibung				REI 90-M
1	11.1	Tragfähigkeit	Beibehaltung der Tragfähigkeit unter Last:	vorh. max. Belastung	138,0 kN/m			erfüllt
2			Grenzwert der vertikalen Stauchung	C = h/100 C = 30 mm	Maximal 5,42 mm nach 90 Minuten an WS2			
			Stauchungsgeschwindigkeit	dC/dt = 3*H/1000 dC/dt = 9 mm/min	Maximal 0,04 mm/min nach 90 Minuten an WS2			erfüllt
3	11.2	Raumabschluss d.h. Vermeidung von:	Entzündung des Wattebausches	Entzündung des Wattebausches erfolgte nach:	Test nicht erforderlich -nicht erfolgt-			erfüllt
4			Auftreten von Spalten	Das Durchdringen einer Spaltlehre erfolgte nach:	Test nicht erforderlich -nicht erfolgt-			erfüllt
5			Flammen auf der abgekehrten Seite	Anhaltende Flammenbildung trat auf nach:	-nicht erfolgt-			erfüllt
6	11.3	Wärmedämmung d.h. Temperaturerhöhung auf der dem Feuer abgekehrten Seite über die Anfangstemperatur: max. zul. Mittelwert ΔT = 140 K max. zul. Einzelwert ΔT = 180 K	Prüfdauer in min:	30	60	90	102	erfüllt
7			max. festgestellte Temperaturerhöhung: Mittelwert in K:	0	1	1	1	
8			max. festgestellte Temperaturerhöhung: Einzelwert in K:	0,5	1	3	4	
			- an Messstelle:	OF 11	OF 6	OF 6	OF 6	
9	5.6	Sonstige Angaben	Umgebungstemperatur bei Beginn der Prüfung im Labor:	26°C				Angaben, z.B. über Baustoffe, Rohdichten und Feuchtigkeitsgehalt, siehe Tabelle 2
10			Die Umgebungstemperatur stieg/ sank während der Prüfung um max.:	+ 2 K				
11	5.2.2.1		Druck im Brandraum:	gem. DIN EN 1363-1 vgl. Anlage 4				
12			Rauchentwicklung:	gering				
13			horizontale Verformung:	WS4				
			- Größe	16,57 mm				
		- Zeitpunkt	90 min					
14	DIN EN 1363-2: 1999-10 Abschnitt: 7	Mechanische Beanspruchung (Stoßprüfung) nach Erreichen der Klassifizierungszeit	Verhalten R-, E- und I nach Stoßprüfung eingehalten	1. Stoß	2. Stoß	3. Stoß	erfüllt	
				ja	ja	ja		

Abb. 76: Vergleich der Prüfergebnisse des Prüfkörpers 2 (d = 600 mm) mit den Leistungskriterien
Quelle: MFPA Leipzig GmbH - Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH

6.6.5 Erläuterungen einzelner Prüfergebnisse

Die vor der Wandinnenoberfläche gleichmäßig vorherrschenden Brandraumtemperaturen erreichen bereits nach 10 Minuten Temperaturen über 700°C und in den folgenden 80 – 90 Minuten 1.000°C.

Nachfolgend werden die gemessenen Oberflächentemperaturen, Temperaturen innerhalb der Konstruktion sowie die Verformungen des Prüfkörpers 1 (d = 220 mm) näher beschrieben:

„Bis etwa 45 Minuten nach Beginn des Brandversuches erhöht sich die Temperatur auf der brandabgewandten Seite der Lehmwand überhaupt nicht. [...] Danach steigt sie bis zur 100. Minute auf eine Temperatur von 70 °C an [...]“⁷⁶ Nach 90 Minuten und ca. 1.000°C im Brandraum wurden folgende Temperaturen innerhalb der Konstruktion gemessen (die Angaben der Messtiefen werden von der Brandseite aus angegeben):

- 2 cm Tiefe: 650 °C
- 6 cm Tiefe: 320 – 325 °C
- 10 cm Tiefe: 150 °C
- 20 cm Tiefe: 80 – 90 °C

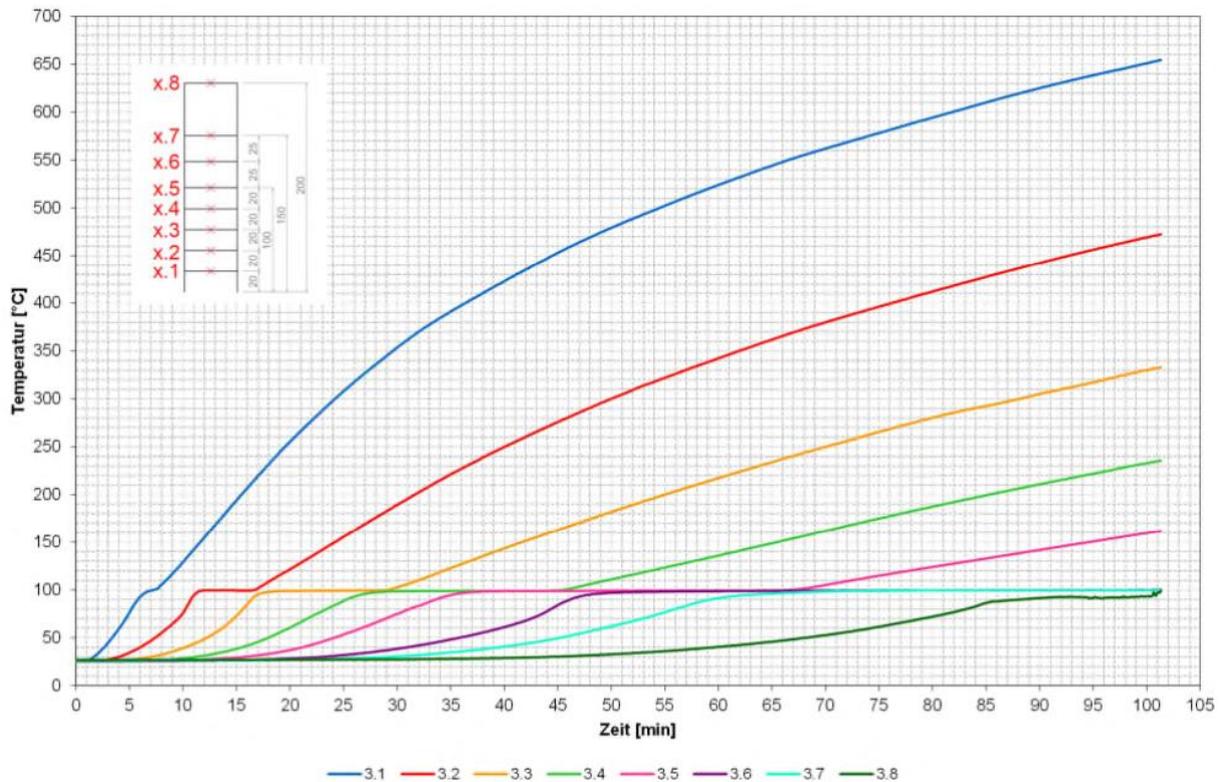


Abb. 77: Temperaturdurchgang durch die Stampflehmwand (d = 220 mm) in der Mitte der Wand (Messleiter 3)

Quelle: MFPA Leipzig GmbH - Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH

„Aufgrund der [...] sehr dünnen Wanddicke und der hohen Temperaturen auf der Brandseite verformt sich die Stampflehmwand in Feldmitte 40 mm [...] und an den beiden Wandenden links und rechts 6 mm [...] bzw. 9 mm [...] in Richtung Brandraum [...]“⁷⁷ Die Verformung in vertikaler Richtung wird aufgrund der vertikalen Lasteinleitung der oben und unten durch den Normtragrahmen gehaltenen Konstruktion stark begrenzt. Durch die seitlichen Fugen, die mit Mineralwolle ausgestopft sind, kann eine horizontale Dehnung und daraus resultierend ein Einspannen stattfinden. Der Rahmen stellt dabei ein Widerlager dar und die - durch die hohen Temperaturen - entstandenen Spannungen entladen sich

⁷⁶ Burkert, T. und Jäger, W. (2), S. 30

⁷⁷ Burkert, T. und Jäger, W. (2), S. 31

durch vertikal entstehende Risse. Diese werden durch Diagonalarisse in den Ecken ergänzt. Wie in den nachfolgenden Abbildungen zu erkennen werden die Risse durch die Pendelschläge verstärkt.⁷⁸



Abb. 78: Rissbild der Stampflehmwand (d = 220 mm) auf der brandabgewandten Seite nach 90 Minuten Brandbeanspruchung vor dem 1. Pendelschlag (links) und nach dem 3. Pendelschlag (rechts)
Quelle: Jäger Ingenieure GmbH

Der den gleichen Versuchseinstellungen ausgesetzte zweite Prüfkörper (d = 600 mm) wies einen anderen Temperaturverlauf über den Wandquerschnitt auf. Die fast dreifache Wandstärke führte dazu, dass auf der feuerabgewandten Seite im Mittel lediglich 1 K Temperaturdifferenz ermittelt wurde. Nach 102 Minuten wurden an einzelnen Stellen Maximalwerte von 4 K gemessen. Zudem konnte festgestellt werden, dass in den ersten 15 – 20 cm - von der feuerzugewandten Seite ausgehend – merkbare Temperaturdifferenzen entstanden. An allen Messleitern wurden in einer Tiefe von 25 cm (gemessen von der feuerzugewandten Seite) Temperaturen zwischen 35 – 45 °C gemessen. In den äußeren 35 cm (gemessen von der feuerabgewandten Seite) stiegen die Temperaturen während des Versuchs nicht über 27 °C. Folglich erhöhte sich die Raumlufttemperatur außen nur minimal um 2 K.⁷⁹

⁷⁸ Vgl. Burkert, T. und Jäger, W. (2), S. 31

⁷⁹ Vgl. Burkert, T. und Jäger, W. (2), S. 33

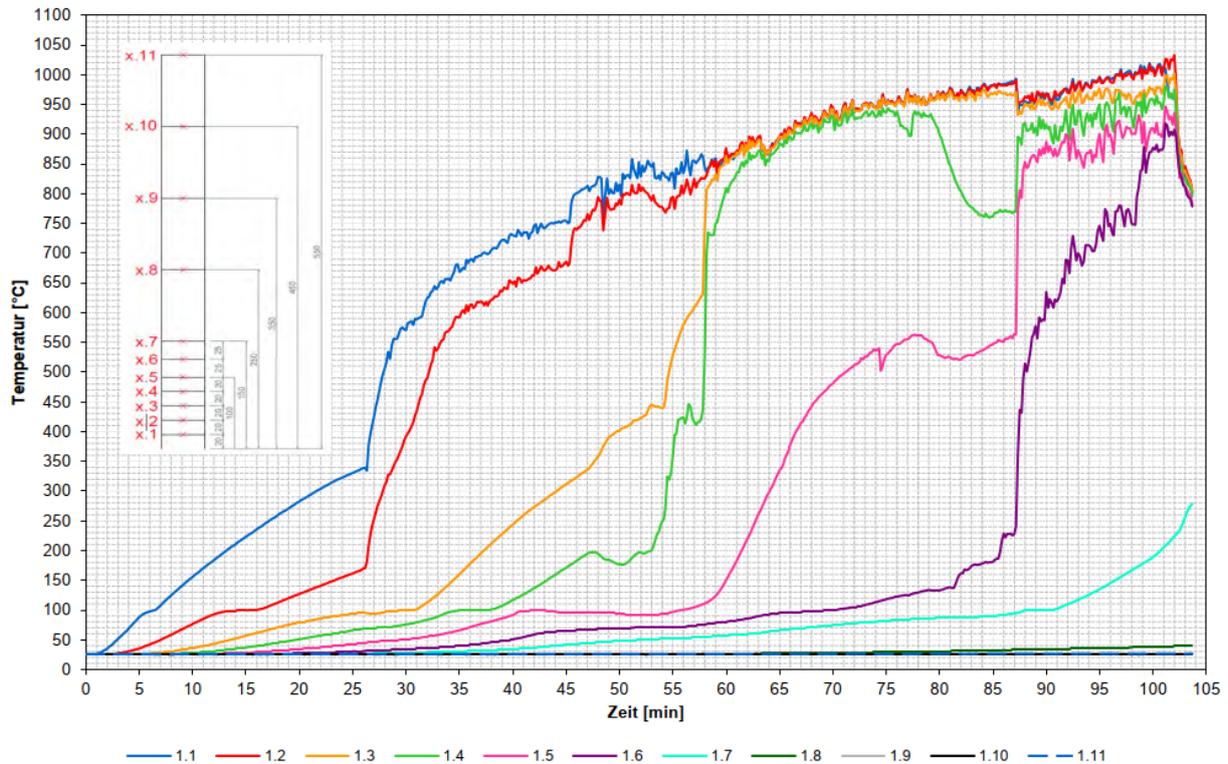


Abb. 79: Temperaturdurchgang durch die Stampflehmwand (d = 600 mm) (Messleiter 1)
Quelle: MFPA Leipzig GmbH - Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH

Die Verformung der Stampflehmwand stellt sich ebenfalls anders als bei der 22 cm starken Wand ein. Herr Prof. Dr.-Ing. Jäger und Herr Prof. Dr.-Ing. Burkert von Jäger Ingenieure GmbH beschreiben die Verformungen in der Gutachterlichen Stellungnahmen zum Prüfversuch wie folgt:

„Der zur brandabgewandten Seite liegende [...] Bereich der Wand bildet zusammen mit dem Stahlrahmen eine Einspannung. Mit zunehmender Branddauer und weiterer behinderter Verformungsmöglichkeit steigen die thermischen Spannungen im oberflächennahen Bereich weiter an. Die Zugkräfte senkrecht zur Wandoberfläche werden im äußeren Bereich immer größer (das Bestreben nach Ausbeulen in den Brandraum hinein wächst), bis die Kohäsion überschritten wird. Dieser Effekt trat in der 26[.] Minute ein.“⁸⁰

Die Entwicklungen führen an einzelnen Stellen dazu, dass Teile der Wand ausbrechen und Lehm-Schollen herunterfallen. Eine in der 26. Minute abfallende große ca. 5 cm dicke Wandscholle stellt sich zunächst nach dem Abrutschen vor die Prüfwand und schützt so die dahinterstehende Wand. In der 30. Minute bildet sich jedoch in dieser ein Vertikalriss, der in der 46. Minute zum Zusammenbrechen der Scholle führt. Ab dann steigen die von den oberflächennahen Messtellen (1.4 und 1.5) gemessenen Temperaturen stark und kontinuierlich an (siehe Abb. 78).⁸¹ „Im unteren Drittel der Wand steht die Scholle mit etwas Abstand vor der Wand [...], sodass sie wie ein [...] Hitzeschild wirkt. [...] Die Temperatur nimmt hier erst einmal ca. 200 K ab, bis dann nach etwa 46 Minuten die Scholle zusammenbricht [...].“⁸² Gemäß der gutachterlichen Einschätzung von Jäger Ingenieure GmbH hat sich das Brandverhalten der Wand an das von Beton angeglichen, bei welchem im Brandversuch ebenfalls Partikel abgesprengt werden. Lediglich das Ablösen der großen Scholle nach der 26. Minute stellt eine Differenz zum Brandverhalten einer Betonwand dar.⁸³

⁸⁰ Burkert, T. und Jäger, W. (2), S. 33

⁸¹ Vgl. Burkert, T. und Jäger, W. (2), S. 34

⁸² Burkert, T. und Jäger, W. (2), S. 34

⁸³ Vgl. Burkert, T. und Jäger, W. (2), S. 35

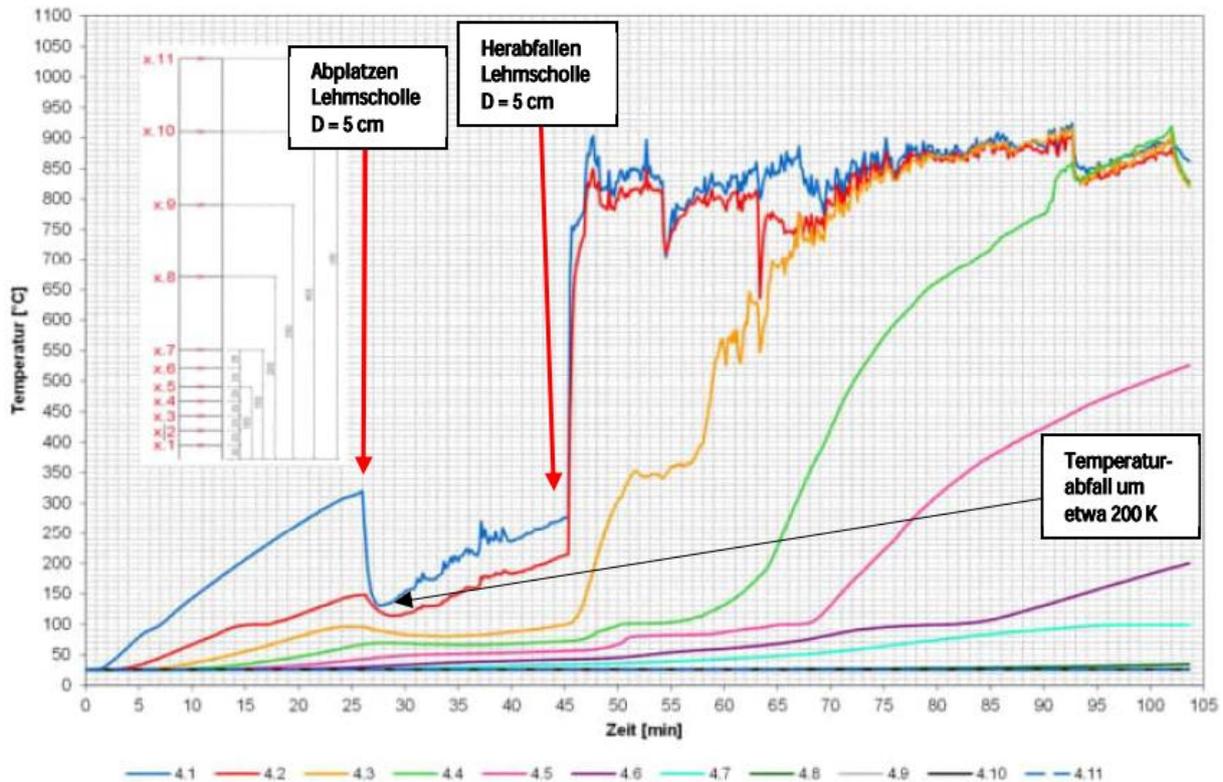


Abb. 80: Temperaturdurchgang durch die Stampflehmwand (d = 600 mm) (Messleiter 4)
 Quelle: MFPA Leipzig GmbH - Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH

Betrachtet man zudem die Fotos vor und nach der Brandbeanspruchung (100 Minuten) fällt auf, dass es ein Ablösen von ca. 10 cm tiefen Wandabschnitten in der linken oberen Ecke gegeben haben muss. Das würde einer Querschnittsschwächung von ca. 17 – 20% entsprechen.⁸⁴



Abb. 81: Abbrand der Mineralwolle in der oberen linken Ecke nach Ablösen von ca. 10 cm tiefen Wandabschnitten
 Quelle: Jäger Ingenieure GmbH

⁸⁴ Vgl. Burkert, T. und Jäger, W. (2), S. 35 - 37

Gegenstand der Prüfung war jedoch eine Betrachtung einer 30-minütigen Brandbeanspruchung. Es kann davon ausgegangen werden, dass nach 30 Minuten eine 5 cm dicke Schicht über den gesamten Wandquerschnitt abgetragen wurde, sodass eine Querschnittsschwächung von 8,3 % vorliegt.⁸⁵ Jäger Ingenieure GmbH stellen - auf Grundlage der Nachweisführung von Herrn Rosenkranz (Tragwerksplanung, Kempen Krause Ingenieure GmbH) und der an der Jade Hochschule Oldenburg ermittelten Festigkeiten - Berechnungen der Tragfähigkeiten von Stampflehmwänden mit Querschnitten von 100%, 92% (ca. 8% Querschnittsschwächung nach 30 Minuten) sowie 80% (ca. 20% Querschnittsschwächung nach 90 Minuten) zusammen.⁸⁶

$N_{Rd,i} = \Phi_{z,i} \cdot \Phi_{y,i} \cdot f_d \cdot t \cdot l$

*f_d aktuell nach Versuchen am IfTB**

	EWK	N _{Rd,o}	N _{Rd,m}	N _{Rd,u}	Wandquerschn. 100%		Wandquerschnitt 92%		Wandquerschnitt 80%	
					f _d	η	f _d	η	f _d	η
Wandkopf:										
		$0,647 \cdot 1,000 \cdot 0,91 \cdot 0,60 \cdot 6,40 \cdot 10^3$			2,261	0,16	2,080		1,809	
	EWK 1:									
	EWK 2:	$0,549 \cdot 1,00 \cdot 0,91 \cdot 3,840$			1,916	0,36	1,765		1,534	
	EWK 3:	$0,536 \cdot 1,00 \cdot 0,91 \cdot 3,840$			1,873	0,40	1,723		1,484	
Wandmitte:										
	EWK 1:	$0,748 \cdot 0,928 \cdot 0,91 \cdot 5,840$			2,426	0,25	2,232		1,941	
	EWK 2:	$0,692 \cdot 0,953 \cdot 0,91 \cdot 3,840$			2,304	0,46	2,120		1,843	
	EWK 3:	$0,684 \cdot 0,964 \cdot 0,91 \cdot 3,840$			2,304	0,48	2,120		1,843	
Wandfuß:										
	EWK 1:	$0,900 \cdot 0,909 \cdot 0,91 \cdot 3,840$			2,827	0,30	2,601		2,262	
	EWK 2:	$0,900 \cdot 0,930 \cdot 0,91 \cdot 3,840$			2,925	0,48	2,691		2,340	
	EWK 3:	$0,900 \cdot 0,946 \cdot 0,91 \cdot 3,840$			2,975	0,49	2,737		2,380	

Zusammenfassung Ausnutzung des vertikalen Traglastwiderstandes

	EWK	N _{Ed} [kN]	für F30 → 92%		für F90 → 80%	
			N _{Rd} [kN]	η = N _{Ed} / N _{Rd} [-]	N _{Rd} [kN]	η = N _{Ed} / N _{Rd} [-]
Wandkopf						
	EWK 1	346	2,080	0,17	1,809	0,19
	EWK 2	695	1,765	0,39	1,534	0,45
	EWK 3	742	1,723	0,43	1,484	0,50
Wandmitte						
	EWK 1	611	2,232	0,27	1,941	0,31
	EWK 2	1052	2,120	0,50	1,843	0,57
	EWK 3	1099	2,120	0,50	1,843	0,60
Wandfuß						
	EWK 1	875	2,601	0,37	2,262	0,39
	EWK 2	1409	2,691	0,52	2,340	0,60
	EWK 3	1456	2,737	0,53	2,380	0,61

→ Nachweis erbracht!

* hier wurde der Design-Wert des Stampflehm-MW nach E DIN 18940:2012-10, "Tragen des Lehmsteinmauerwerk-Konstr., Bemessung, Ausführung" Entwurf ermittelt nach Abschnitt 7.6.5

Abb. 82: Nachweis des vertikalen Traglastwiderstandes mit aktuellen Werten
Quelle: Jäger Ingenieure GmbH

⁸⁵ Vgl. Burkert, T. und Jäger, W. (2), S. 37

⁸⁶ Vgl. Burkert, T. und Jäger, W. (2), S. 38

Jäger Ingenieure GmbH schließen daraus folgendes:

„Wie die Berechnungen zeigen, ist die Wand nach 30 Minuten und einer 8%-igen Querschnittsschwächung nur zu maximal 53% ausgelastet und nach 90-minütiger Brandbeanspruchung und 20 %-iger Querschnittsschwächung auch nur zu 61 %. Das bedeutet, dass hier, sollte der Fall des Vollbrandes im Ausstellungsbereich des Freilichtmuseums in Detmold im unmittelbaren Anschluss an die antragsgegenständliche Stampflehmwand eintreten, noch [...] Reserven in der Stampflehmwand vorliegen. Der Nachweis einer horizontalen Belastung gemäß DIN EN 1991-1-1/NA, Tab. 6.12 DE unter 1 kN/m ist durch den Pendelschlagversuch nach DIN EN 1363-2-1999-10 erbracht.“⁸⁷

⁸⁷ Burkert, T. und Jäger, W. (2), S. 39

6.6.6 Schlussfolgerungen aus den brandtechnischen Versuchen

Die beiden Brandversuche zur Feststellung des Feuerwiderstands von Lehm in tragenden Konstruktionen bestätigen die hohe Leistungsfähigkeit des Materials. Beide Versuche konnten erfolgreich aufzeigen, dass Lehm über die statisch konstruktiven, feuerhemmenden Mindestanforderungen beim Realisierungsprojekt in Detmold hinaus deutlich größere Potentiale bis hin zu einer Feuerbeständigkeit unter zusätzlicher mechanischer Beanspruchung besitzt. Auch die weiteren feuerwiderstandsrelevanten Eigenschaften wie Rauchdichtigkeit und Wärmedurchgang konnten nachgewiesen werden. Erstmals in der Geschichte der Bauteilnormierung konnte der Nachweis für die hervorragenden brandtechnischen Eigenschaften von Stampflehm damit unter laboratorischen Prüfbedingungen erbracht werden.

Im Detail zeigt sich bei Bauteilen verschiedener Geometrien ein unterschiedliches Verhalten bei Brandeinwirkung, welches jedoch die Gesamtleistungsfähigkeit nicht einschränkt. Trotz der hohen Verformung von Prüfkörper 1 ($d = 220 \text{ mm}$) sowie des schollenartigen Bruchs 5 cm starker, oberflächlicher Schichten bei Prüfkörper 2 ($d = 600 \text{ mm}$) wurden alle relevanten Prüfergebnisse zur Klassifizierung in die Feuerwiderstandsklasse REI-90M erreicht. Die vorhandenen Lastreserven aufgrund der Bauteilgeometrie waren ausreichend dimensioniert, um die entstandene Querschnittsschwächung zu kompensieren.

Neben den geprüften tragkonstruktiven Eigenschaften ist das Temperaturdurchgangsverhalten durch Bauteile aus Stampflehm besonders beeindruckend. Durch eine auch nach 100 Minuten Brandprüfdauer noch menschenverträgliche Oberflächentemperatur auf der feuerabgewandten Seite zeigt sich, dass auch im Brandfall in der Praxis nicht von Gefährdungen von Personen oder der Erforderlichkeit besonderer Brandbekämpfungsmaßnahmen durch die Feuerwehr bei tragenden Lehmwandkonstruktionen auszugehen ist.

Die vollständigen Prüfberichte der Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH (MFPA Leipzig) sowie die gutachterliche Stellungnahme von Jäger Ingenieure sind im Anhang A5-A7 beigefügt.

6.7 Fazit & Ausblick

Obwohl die Baubranche signifikant für den Ressourcenverbrauch sowie die emissionsbedingten Umweltwirkungen verantwortlich ist, konzentriert sich nachhaltiges Bauen weiterhin verstärkt auf die Senkung des Gebäudebetriebs. Graue Emissionen aus der Herstellungsphase gewinnen erst in den letzten Jahren im Zuge von Zertifizierungen, erweiterten Förderbedingungen und einer entwickelnden Gesetzgebung eine neue Bedeutung im gesellschaftlichen Diskurs.

Insbesondere bei Großprojekten spielt die gesamtheitliche Betrachtung der Umweltwirkungen über den gesamten Lebenszyklus von der Wiege bis zur Bahre aber eine wichtige Rolle.

Dank eines steigenden Bewusstseins für nachhaltiges Bauen rücken neben den gestalterischen und technischen vor allem die ökologischen Potentiale des Lehmbaus wieder in den Fokus und geben dem Baustoff Lehm einen neuen Impuls für eine Breitenanwendung.

Dabei bedarf es vor allem für größere Vorhaben sowohl für die Planung, die Bemessung und den Brandschutz für eine schadensfreie Umsetzung zusätzlicher Entwicklungen im Bereich der Normung und Grundlagen.

Auch wenn sich die Anforderungen an die Planung aus den hydrophilen und feuchtetechnischen Eigenschaften des Rohmaterials ergeben, sind die Gesamtzusammenhänge in den Schnittstellen zur Fachplanung häufig komplex.

Die bauaufsichtlich eingeführten Lehmbau Regeln geben Grundlageninformationen zu den wichtigsten Themengebieten wie Feuchteschutz, Bauausführung und Bemessung. Für Großprojekte ergeben sich jedoch relevante weitere Fragestellungen zum Herstellungsverfahren, Terminablauf, Baustelleninfrastruktur, planungstechnische Schnittstellen, die über die Informationsinhalte der Lehmbau Regeln hinausgehen.

Die Wahl des Herstellungsverfahrens ist dabei eng mit dem terminlichen Ablauf des Gesamtprojekts verknüpft. Das zeitliche Optimierungspotential einer Vorfertigung kann nur bei frühzeitiger Planung, Vergabe und Fertigstellung der Vorleistungen erfolgen. Sofern eine dezentrale Produktion lokal zur Baustelle eine Option darstellt, sind vor allem die notwendigen Platzbedarfe und die Infrastruktur auf diese Fertigung auszulegen. Bei der zentralen Herstellung im Werk sind vor allem die Materialtransporte zum Werk und auf die Baustelle ausschlaggebend. Beim Freilichtmuseum in Detmold hätten sich durch die ZIE-gebundene Lehmmischung aus Ostwestfalen, einer Elementproduktion in Österreich und einer Verwendung in Detmold Transportwege von über 1.000 km ergeben, was sowohl unter ökonomischen als auch ökologischen Gesichtspunkten nicht sinnvoll gewesen wäre.

Für eine Effizienzsteigerung der Ortbauweise ist vor allem die Planung der Schalungs- und Stampfabschnitte entscheidend. Eine Reduzierung des Wandquerschnitts geht nicht automatisch mit einer wirtschaftlichen Optimierung einher, da vor allem die Lohnaufwendungen eine signifikante Rolle in der Wirtschaftlichkeit spielen.

Vor allem die mechanischen Untersuchungen der Großprüfkörper mit unterschiedlichen, relativen Schlankheiten von $\lambda = 2,5$ - 13,3 haben für die Bemessung und das Sicherheitskonzept wichtige Erkenntnisse geliefert. Bekanntermaßen gibt der Feuchtegehalt mit der Abhängigkeit zur Druckfestigkeit des Bauteils einen wichtigen Ausschlag auf den Gesamtbauprozess. Auch bei Prüfwänden mit geringeren Schlankheiten hat sich gezeigt, dass die maximale Druckfestigkeit um rund 1/3 abnimmt, wenn die Ausgleichsfeuchte nicht erreicht ist. Der Variationskoeffizient resultierend aus der absoluten Schlankheit des Bauteils steigt unter 20cm Bauteildicke um jeweils 50% bei 25%iger Querschnittsabnahme. Während bei den kleinformatischen Prüfkörpern Druckfestigkeiten an Würfeln i. M. von 3,47 N/mm² oder Zylindern i.M. von 2,49 N/mm² ermittelt wurden, liegen die Druckfestigkeiten mit Einfluss der nächsthöheren Schlankheit $\lambda = 2,5$ bei 1,76 N/mm². Bei $\lambda = 10$ liegen die Ergebnisse i. M. bei 1,57 N/mm² und $\lambda = 13,3$ bei 1,18 N/mm².

Auch in Bezug auf den Feuerwiderstand von tragenden Lehmkonstruktionen liefern die Lehmbau Regeln keine genehmigungsrechtlichen anwendbare Grundlagen für Sonderbauten. Die Brandversuche waren daher für die genehmigungsrechtliche Zustimmung im Einzelfall zwingend erforderlich. Dabei konnten die hervorragenden Eigenschaften des Lehms dazu beitragen, nicht nur die geforderte

Klassifizierung „feuerhemmend“ zu erreichen, sondern darüber hinaus auch den Nachweis der Feuerbeständigkeit, Rauchdichtigkeit und Isolation in Verbindung mit mechanischer Beanspruchung (REI 90-M) zu erbringen.

Die Ergebnisse dieses Arbeitspakets haben maßgeblich zur Realisierung tragender Wandkonstruktionen aus Stampflehm beim Freilichtmuseum Detmold beigetragen. Für Planende zukünftiger Vorhaben tragender Wandkonstruktionen aus Stampflehm können die Ergebnisse dieses Arbeitspakets ebenfalls eine Planungs- und Orientierungshilfe darstellen und relevante Fragestellungen für die Planung, Bemessung und Ausführung aufzeigen. Für eine Breitenanwendung ist jedoch insbesondere eine weitere wirtschaftliche Effizienzsteigerung notwendig, um zeitgemäßen ökonomischen Anforderungen gerecht zu werden. Die Vorfertigung und Marktetablierung von Lehm- und Ziegelbau im Objektbereich bieten dazu weitere wichtige Entwicklungspotentiale.

Auch die weitere Normierung von Stampflehmkonstruktionen bleibt ein wichtiges Themenfeld. Die aktuelle DIN 18940:2023-06 zeigt beispielhaft das Potential des Lehmbaus, wenn eine hohe Planungs- und Genehmigungssicherheit vorliegt. Auch für den noch – in Deutschland – exotischen Stampflehm- und Ziegelbau sind solche Entwicklungen wünschens- und erstrebenswert.

6.8 Literaturverzeichnis

BEYOND ZERO EMISSIONS: Rethink Cement. 2017. URL:

<https://www.bze.org.au/research/report/rethinking-cement> Abruf: 30.04.2024

BURKERT, T., INCE, M., SCHULZ, J., WAIGAND, S., WIGGER, H.: Stampflehmwände als tragendes Bauteil – am Beispiel des LWL-Freilichtmuseums in Detmold. Mauerwerk-Kalender 2025.

[Veröffentlichung in Arbeit].

BURKERT, T. UND JÄGER, W. (1): Gutachterliche Stellungnahme zur Zustimmung im Einzelfall – Tragende Stampflehmwände mit Brandschutzanforderungen im Innenbereich – Mechanische und physikalische Eigenschaften des Stampflehms. Jäger Ingenieure GmbH, Radebeul. Radebeul, 06.04.2023.

BURKERT, T. UND JÄGER, W. (2): Gutachterliche Stellungnahme zur Zustimmung im Einzelfall – Tragende Stampflehmwände mit Brandschutzanforderungen im Innenbereich – Feuerwiderstand einer tragenden Lehmwand. Jäger Ingenieure GmbH, Radebeul. Radebeul, 31.03.2023.

HILLEBRANDT, A., RIEGLER-FLOORS, P., ROSEN, A., SEGGEWIES, J.: Atlas Recycling: Gebäude als Materialressource. 1. Auflage. DETAIL Business Information GmbH, München. München, 2018.

JUKNAT, M. UND DORN, E. (1): Prüfbericht Nr. PB 3.2/21-263-1: Feuerwiderstandsprüfung einer 220 mm dicken, tragenden, raumabschließenden und wärmedämmenden Stampflehmwandkonstruktion auf Brandverhalten bei einseitiger Brandbeanspruchung gemäß DIN EN 1363-1: 2020-05 in Verbindung DIN EN 1365-1: 2013-08 sowie Stoßbeanspruchung nach DIN EN 1363-2: 1999-10. Im Auftrag von: LWL – Bau- und Liegenschaftsbetrieb, Münster. MFPA Leipzig GmbH, Leipzig. Leipzig, 30.06.2022.

JUKNAT, M. UND DORN, E. (2): Prüfbericht Nr. PB 3.2/21-263-2: Feuerwiderstandsprüfung einer 600 mm dicken, tragenden, raumabschließenden und wärmedämmenden Stampflehmwandkonstruktion auf Brandverhalten bei einseitiger Brandbeanspruchung gemäß DIN EN 1363-1: 2020-05 in Verbindung DIN EN 1365-1: 2013-08 sowie Stoßbeanspruchung nach DIN EN 1363-2: 1999-10. Im Auftrag von: LWL – Bau- und Liegenschaftsbetrieb, Münster. MFPA Leipzig GmbH, Leipzig. Leipzig, 29.08.2022.

KAPFINGER, O. UND SAUER, M.: Martin Rauch: Gebaute Erde. Gestalten & Konstruieren mit Stampflehm. 1. Auflage. DETAIL Architecture GmbH, München. München, 2015.

MINISTERIUM DES INNERN DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN: SGV Inhalt : Bauordnung für das Land Nordrhein-Westfalen (Landesbauordnung 2018 BauO NRW 2018) in: Ministerium des Innern NRW, Referat 14, o. D., URL:

https://recht.nrw.de/lmi/owa/br_text_anzeigen?v_id=74820170630142752068 Abruf: 03.06.2024.

REESE, M. UND WOEHLIN, S.: Robotische Fabrikation von Bauteilen aus Stampflehm. 2019. In: dbz, Regionales Bauen. URL:

https://www.dbz.de/artikel/dbz_Robotische_Fabrikation_von_Bauteilen_aus_Stampflehm_3390495.html. Abruf: 31.05.2024.

RÖHLEN, U. UND ZIEGERT C.: Lehm-Bau-Praxis: Planung und Ausführung. 3. Auflage. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin. Berlin, 2020.

SCHROEDER, H.: Lehm-Bau: Mit Lehm ökologisch planen und bauen. 3. Auflage. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature, Wiesbaden. Wiesbaden, 2019.

SCHWARZKOPP, F., DRESCHER, J., GORNING, M. UND BLAZEJCZAK, J.: Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine- und -Erde-Industrie bis 2035 in Deutschland. 2019. URL: https://www.baustoffindustrie.de/fileadmin/user_upload/bbs/Dateien/Downloadarchiv/Rohstoffe/Rohstoffstudie_2019.pdf. Abruf: 30.04.2024.

SOBEK, W.: Den Gesetzten der Physik und dem Wohle der Menschen dienen. 2013. In: Deutsche Ingenieur Blatt, 7/8.

UMWELTBUNDESAMT (Herausgeber): Abfallaufkommen. 2019. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/abfallaufkommen#bau-abbruch-gewerbe-und-bergbauabfalle>. Abruf: 30.04.2024

VOLHARD, F. UND RÖHLEN, U.: Lehmbau Regeln: Begriffe – Baustoffe – Bauteile. 3. Auflage. Dachverband Lehm e.V., Weimar. Vieweg + Teubner, Wiesbaden. Wiesbaden, 2009.

WIGGER H. UND RELISHKIS, A.: 1. Zwischenbericht – Mechanische Eigenschaften des Stampflehms, 0075/21 (IMS/AR/HW) | Freilichtmuseum Detmold – Landesmuseum für Alltagskultur Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude. Im Auftrag von: LWL – Bau- und Liegenschaftsbetrieb, Münster. Institut für Materialprüfung und Bauwerkserhaltung GmbH, Oldenburg. Oldenburg, 14.03.2023.

WIGGER H. UND INCE, M.: Abschlussbericht – Mechanische und physikalische Eigenschaften des Stampflehms, 0075/21 (IMS/JB/HW) | Freilichtmuseum Detmold – Landesmuseum für Alltagskultur Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude. Im Auftrag von: LWL – Bau- und Liegenschaftsbetrieb, Münster. Institut für Materialprüfung und Bauwerkserhaltung GmbH, Oldenburg. Oldenburg, 14.03.2023.

6.9 Anhang

ANLAGE A1: Leistungsverzeichnis: Stampflehmwände (Muster-LV), ACMS Architekten GmbH

ANLAGE A2: 1. Zwischenbericht – Mechanische Eigenschaften des Stampflehms
0075/21 (IMS/AR/HW), IfMB -Institut für Materialprüfung & Bauwerkserhaltung GmbH

ANLAGE A3: Abschlussbericht – Mechanische und physikalische Eigenschaften des Stampflehms
0075/21 (IMS/JB/HW), IfMB -Institut für Materialprüfung & Bauwerkserhaltung GmbH

ANLAGE A4: Gutachterliche Stellungnahme zur Zustimmung im Einzelfall – Tragende
Stampflehmwände mit Brandschutzanforderungen im Innenbereich – Mechanische und physikalische
Eigenschaften des Stampflehms, Jäger Ingenieure GmbH

ANLAGE A5: Prüfbericht Nr. PB 3.2/21-263-1: Feuerwiderstandsprüfung einer 220 mm dicken,
tragenden, raumabschließenden und wärmedämmenden Stampflehmwandkonstruktion auf
Brandverhalten bei einseitiger Brandbeanspruchung gemäß DIN EN 1363-1: 2020-05 in Verbindung
DIN EN 1365-1: 2013-08 sowie Stoßbeanspruchung nach DIN EN 1363-2: 1999-10, MFPA Leipzig
GmbH

ANLAGE A6: Prüfbericht Nr. PB 3.2/21-263-2: Feuerwiderstandsprüfung einer 600 mm dicken,
tragenden, raumabschließenden und wärmedämmenden Stampflehmwandkonstruktion auf
Brandverhalten bei einseitiger Brandbeanspruchung gemäß DIN EN 1363-1: 2020-05 in Verbindung
DIN EN 1365-1: 2013-08 sowie Stoßbeanspruchung nach DIN EN 1363-2: 1999-10, MFPA Leipzig
GmbH

ANLAGE A7: Gutachterliche Stellungnahme zur Zustimmung im Einzelfall – Tragende
Stampflehmwände mit Brandschutzanforderungen im Innenbereich – Feuerwiderstand einer
tragenden Lehmwand, Jäger Ingenieure GmbH

Anlage A1:

Abschlussbericht

DBU-Projekt AZ 35442/02

Gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU)

Arbeitspaket 6: Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für die Umsetzbarkeit ökologischer Konstruktionen bei Großprojekten für das Material Lehm

Leistungsverzeichnis: Stampflehmwände (Muster-LV)

Freilichtmuseum Detmold – Landesmuseum für Alltagskultur

Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude

ACMS Architekten GmbH

Im Auftrag von: LWL – Bau- und Liegenschaftsbetrieb, Münster

Autoren: ACMS Architekten GmbH

03.06.2024

Stampflehmwände (Muster-LV)

196_LWL-FLM Detmold, Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude

03.06.2024 . Seite 1 von 19

LEISTUNGSVERZEICHNIS

Gewerk: Stampflehmwände (Muster-LV)

Bauvorhaben: LWL-FLM Detmold, Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude
32760 Detmold, Paderborner Straße

Auftraggeber: Landschaftsverband Westfalen-Lippe (LWL)
48147 Münster, Freiherr-vom-Stein-Platz 1

Haftungsausschluss

Das nachfolgende Muster-Leistungsverzeichnis soll lediglich Anhaltspunkte für individuell projektbezogen zu erstellende Leistungsverzeichnisse liefern. Die Verfasser übernehmen keine Haftung hinsichtlich Richtigkeit, Vollständigkeit, Zwecktauglichkeit und Aktualität der Informationen für jedes individuelle Bauvorhaben. Die Besonderheiten des Einzelfalls können abweichende Vorgehensweisen bzw. Leistungen erfordern; dies ist durch den Anwender eigenverantwortlich zu prüfen.

Alle Währungsangaben in EUR

Stampflehmwände (Muster-LV)

196_LWL-FLM Detmold, Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude

03.06.2024 . Seite 2 von 19

Position	Beschreibung	Menge	Einh	EP	GP ohne USt.
----------	--------------	-------	------	----	--------------

BTV Stampflehmwände (Muster-LV)**für Bauvorhaben "LWL-FLM Detmold, Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude"**

Besondere technische Vertragsbedingungen

Bauvorhaben

Der Landschaftsverband Westfalen-Lippe (LWL) plant am Standort Freilichtmuseum Detmold den Neubau eines multifunktionalen Eingangs- und Ausstellungsgebäudes mit besonderem Schwerpunkt auf konstruktive und energetische Nachhaltigkeit. Das Freilichtmuseum am Fuße des Teutoburger Waldes ist das größte Freilichtmuseum Deutschlands und zieht pro Jahr mehr als 200.000 Besuchern an. Es zeigt auf über 90 Hektar etwa 120 historische Gebäude aus den Regionen Westfalens als Darstellung einer historisch gewachsenen Kulturlandschaft mit ihren regionalen Besonderheiten.

Oberhalb des Geländes tritt das Gebäude als drei polygonale Baukörper in Erscheinung, die sich spielerisch den Hang hinauf entwickeln und von einer Freitreppe durchschnitten werden. Die Baukörper sind auf der unteren Ebene miteinander verbunden, auf der sich Kassenbereich und der große Ausstellungsraum befinden. In den Obergeschossen sind Gastronomie, Seminar- und Verwaltungsräume untergebracht. Das Gebäude erhält eine Primärstruktur aus Holz, Lehm und Beton. Die nichttragende Fassadenkonstruktion besteht aus Glasfassaden und Holztafelelementen mit Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen. Die Wärmebereitung besitzt ein adiabates Kühlsystem mit Regenwassernutzung und wird mit Photovoltaikstrom betrieben.

Auch für die Dauer des Bauvorhabens bleibt der Museumseingang in unmittelbarer Nähe des Baubereichs und erfordert entsprechende Rücksichtnahme. Insbesondere die Nutzung- und Rettungswege sind unbedingt freizuhalten.

Hinweis Zertifizierung Nachhaltigkeit

Für die nachhaltige Ausführung des Gebäudes ist eine DGNB-Zertifizierung mit Platinstandard nach Fertigstellung vorgesehen. Die Umweltverträglichkeit der Bauprodukte, die Qualität der Ausführung, der Verzicht auf Schadstoffe, die Rückbaufähigkeit sowie die Minimierung der Umweltbelastungen durch die Baustelle sind hierbei besonders wichtig. Die im Leistungsverzeichnis definierten Vorgaben und Einschränkungen zu Bauprodukten und Bauarten sind daher zwingend einzuhalten. Im Rahmen der Ver-/Anwendbarkeitsnachweise sind hierzu vor Ausführung durch den Auftragnehmer aussagefähige Angaben zu allen eingesetzten Produkten zu machen, diese Angaben werden durch ein Fachbüro besonders geprüft.

Leistungsumfang des Auftragnehmers

Durch den Auftragnehmer sind alle tragenden Stampflehmwände als Innenwände um Ausstellungsraum und Forum (Vortragsraum) in örtlicher Bauweise auszuführen. Diese tragenden Innenwände sind nach einer Zustimmung im Einzelfall auszuführen, die durch den Auftraggeber zur Verfügung gestellt wird und deren Anforderungen einzuhalten sind. Zusätzlich sind einzelne Wandflächen mit optisch gleichen vorgehängten Elementen als vorgefertigte Bauteile auszuführen, hinter denen sich bauseitige tragende Stahlbetonwände oder aufgesetzte bauseitige Tragkonstruktionen befinden. Für die in den Stampflehmwänden befindlichen Türöffnungen sind durch den Auftragnehmer verdeckte Trag- und Sturzkonstruktionen aus Stahlbeton einzubauen, ebenso ist am oberen Wandabschluss ein verdeckter Ringbalken aus Stahlbeton auszuführen.

Vorgabe Material und Bautechnik gemäß Zustimmung im Einzelfall

Aufgrund des aktuell nicht ausreichenden Normenwerks für Lehm-bau wird der Verwendbarkeitsnachweis über eine Zustimmung im Einzelfall nachgewiesen, die vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt wird. Den im Rahmen eines Forschungsprojekts erstellten Prüfbauteilen für die Zustimmung im Einzelfall liegt die Materialmischung eines Lehmherstellers aus der Region zugrunde, der auch den regional vorkommenden Lehm hierzu verarbeitet. Die bautechnische Herstellung der Prüfbauteile erfolgte durch eine ausführende Fachfirma. Die besonderen Eigenschaften von Material und Bautechnik sind in die Prüfungen eingeflossen und nicht ohne weiteres durch abweichende Mischungen oder alternative Bautechniken austauschbar.

Ausführungszeitraum / Ablauf mit anderen Gewerken

Die Bauausführung ist mit dem Gewerk Rohbau abgestimmt, Voraussetzung sind die Fertigstellung der

Alle Währungsangaben in EUR

Stampflehmwände (Muster-LV)

196_LWL-FLM Detmold, Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude

03.06.2024 . Seite 3 von 19

Position	Beschreibung	Menge	Einh	EP	GP ohne USt.
----------	--------------	-------	------	----	--------------

Bodenplatte und deren Abdichtung sowie ein besonderer, später durch den Fußbodenaufbau verdeckter Wandsockel durch das bauseitige Gewerk Rohbau. Einige der dargestellten Rohbauteile direkt neben Stampflehmwänden haben Einfluss auf Schalung (und deren Grundkonstruktion) der Stampflehmwand, an diesen Kollisionspunkten erfolgt die Detailabstimmung und die zeitliche Abfolge der Leistungen vor Ort zwischen den beteiligten Gewerken und der Bauleitung des Auftraggebers.

Die Grundkonstruktionen der Wandschalungen der Stampflehmwände (Stützen, horizontale Gurtungen, Abstreben nach hinten und alle Verbindungen dieser Elemente, aber nicht die Schalungsflächen an sich und auch nicht eventuelle Arbeitspodeste) sollen bis zur vollständigen Austrocknung und dem weitgehenden Baufortschritt der Gebäudehülle um die Wände verbleiben.

Die Montage der vorgehängten Elemente sind erst nach Fertigstellung der Dachträger und Abdichtung der Dachfläche möglich. Für diese Arbeiten des Auftragnehmers ist im Terminplan ein gesonderter Zeitraum ausgewiesen.

In den Zeichnungen dargestellte Lehmputze sind als gesondertes Gewerk im Rahmen des späteren Innenausbaus vorgesehen.

Keine bauseitigen Gerüste für Lehmbau vorgesehen

Für die Arbeiten des Auftragnehmers sind keine bauseitigen Gerüste vorgesehen. Entsprechend den in den Leistungstexten angegebenen Arbeitshöhen hat der Auftragnehmer eigenständig für geeignete Gerüste, Arbeitsebenen o.ä. und deren Zugänglichkeit zu sorgen. Diese Leistungen sind in die Einheitspreise der entsprechenden Positionen einzurechnen.

Hinweis Materialtransporte / Kräne durch Gewerk Baulogistik

Alle Materialtransporte führen durch Tür- und Fensteröffnungen sowie durch Räume des Gebäudes entsprechend dem Baufortschritt. Der Auftragnehmer hat eigenverantwortlich anhand der beiliegenden Zeichnungen oder durch Ortsbesichtigung für ihn sinnvolle Transportwege auszuwählen und den Transportaufwand und erforderliche Geräte, Hilfsmittel u.ä. dafür einzukalkulieren.

Bauseitige Transportmöglichkeiten - mit Ausnahme der gemeinsam zu nutzenden Kräne des Gewerks Baustellenlogistik - sind nicht vorgesehen (zur Krannutzung siehe gesonderte BTV).

Zufahrt / Lagerflächen

Die Stadt Detmold ist aus Richtung Bielefeld über A2, B66 und B239 sowie aus Richtung Paderborn über A33 und B1 anfahrbar. Das Freilichtmuseum befindet sich südlich vom Detmolder Stadtkern und ist von dort über die Straße "Neustadt" sowie weiterführend über die Paderborner Straße zu erreichen, auf deren östlicher Seite sich Besuchereingang und Baustellenzufahrt befinden. Die Paderborner Straße hat den Charakter einer Überlandstraße.

Der Baustellenbereich innerhalb des Bauzauns weist je nach Baufortschritt in begrenztem Umfang Lagerflächen aus. Lagerungen außerhalb des Baustellenbereiches sind unzulässig. Für das Parken von Mitarbeiterautos ist ein Parkplatz ca. 200m vom Baustellenbereich entfernt zu nutzen, der Besucherparkplatz direkt am Museumseingang darf für die Baustellennutzung nicht verwendet werden. Innerhalb des Baustellenbereichs dürfen nur Fahrzeuge mit Material und Werkzeugen über längere Zeiträume abgestellt werden.

Stampflehmwände (Muster-LV)

196_LWL-FLM Detmold, Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude

03.06.2024 . Seite 4 von 19

Position	Beschreibung	Menge	Einh	EP	GP ohne USt.
----------	--------------	-------	------	----	--------------

BTV Bauvorbereitende Leistungen G12_Lehmbau**für Bauvorhaben "LWL-FLM Detmold, Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude"**

Besondere technische Vertragsbedingungen

Bauvorbereitende Leistungen des Auftragnehmers nach Auftragserteilung

Die nachbeschriebenen Leistungen sind vom Auftragnehmer innerhalb der jeweils angegebenen Fristen zu erbringen. Die geforderten Angaben und Unterlagen sind wichtige Voraussetzungen für die beteiligten Planer und Bauüberwacher und dienen insbesondere zur Abstimmung zwischen den beteiligten Gewerken. Alle Unterlagen sind in deutscher Sprache zu übergeben. Unterlagen, die nicht in deutscher Sprache abgefasst sind, ist eine Übersetzung in die deutsche Sprache beizufügen.

Grundlagen für die Ausführung und die vom Auftragnehmer vorzulegenden Unterlagen

Vom Auftraggeber bzw. von dessen Planern werden Zeichnungen als Grundrisse, Schnitte, Ansichten und Details sowie auch weitere Dokumente (Leistungsbeschreibungen, Terminpläne u.ä.) zur Baumaßnahme zur Verfügung gestellt. Der Auftragnehmer hat den Erhalt dieser Unterlagen in Textform zu bestätigen. Diese Unterlagen sind Grundlage für die vorliegende Ausschreibung, für die Ausführung der Leistungen selbst sowie für alle vom Auftragnehmer vorzulegenden Unterlagen - auf wesentliche Abweichungen seiner Unterlagen und seiner Leistungen zu diesen Grundlagen hat der Auftragnehmer die Bauleitung des Auftraggebers rechtzeitig und eindeutig hinzuweisen.

Übergabeform: als PDF-Datei; auf Anforderung auch als DWG-/DXF-Datei;

Montagekonzept / Terminplanung

Vom Auftragnehmer ist ein Montagekonzept für seine Leistungen mit Terminangaben für die einzelnen Arbeitsschritte vorzulegen. Dieses ist vom Auftragnehmer mit der Bauleitung des Auftraggebers und dem SiGeKo abzustimmen. Montagekonzept und Terminplanung sind bei Änderungen im Bauablauf auf Anforderung des Auftraggebers zu aktualisieren. Die vom Auftragnehmer eigenverantwortlich gewählten Arbeitsabläufe sind in die Einheitspreise einzurechnen, ebenso alle Leistungen zu Konzepterstellung und Terminplanung. Auf Anforderung des Auftraggebers ist das Montagekonzept vom Bieter/Auftragnehmer über wesentliche Leistungen bereits mit Angebotsabgabe (also vor Vertragsschluss) vorzulegen.

Frist für die Vorlage: 12 Werktagen nach Aufforderung durch die Bauleitung des Auftraggebers;

Art der Vorlage: Terminliste oder Balkenplan;

Übergabeform: als PDF-Datei oder 1fach in Papier;

Gefährdungsbeurteilung

Vom Auftragnehmer sind die nach Arbeitsschutzgesetz zu erstellende Gefährdungsbeurteilung für seine Mitarbeiter und die daraus abgeleiteten von den Mitarbeitern unterzeichneten Arbeitsanweisungen der Bauleitung des Auftraggebers in Absprache mit dem SiGeKo zur Information vorzulegen.

Diese Leistungen sind in die Einheitspreise einzurechnen.

Frist für die Vorlage: 12 Werktagen nach Aufforderung durch die Bauleitung des Auftraggebers;

Art der Vorlage: Format DIN A4 (ggf. gefaltet oder verkleinert auf DIN A4);

Übergabeform: als PDF-Datei oder 1fach in Papier;

Baustelleneinrichtungsplan

Vom Auftragnehmer ist ein Baustelleneinrichtungsplan vorzulegen. In diesen Plan sind die einzelnen Baucontainer für Personal und Material sowie Lagerflächen und Standorte der benötigten Geräte einzutragen. Der Auftragnehmer hat in diesem Zusammenhang gewissenhafte Auskünfte über Einbauten im Boden wie Versorgungsleitungen, Kanäle und Kabel einzuholen und diese in den Baustelleneinrichtungsplan einzutragen. Der beigefügte Lageplan zur Baustelleneinrichtung dient ausschließlich der Lagebeschreibung und ersetzt nicht den o.g. eigenverantwortlich zu erstellenden Baustelleneinrichtungsplan des Auftragnehmers. Alle Leistungen zum Baustelleneinrichtungsplan sind in die Einheitspreise einzurechnen.

Frist für die Vorlage: 12 Werktagen nach Aufforderung durch die Bauleitung des Auftraggebers;

Alle Währungsangaben in EUR

Stampflehmwände (Muster-LV)

196_LWL-FLM Detmold, Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude

03.06.2024 . Seite 5 von 19

Position	Beschreibung	Menge	Einh	EP	GP ohne USt.
----------	--------------	-------	------	----	--------------

Art der Vorlage: maßstäbliche Lageskizze oder skizzenhafte Markierungen in vorhand. Zeichnungen;
 Übergabeform: als PDF-Datei oder 1fach in Papier;

Verwendbarkeitsnachweise / Anwendbarkeitsnachweise / Angaben Nachhaltigkeit

Vom Auftragnehmer sind für alle zum Einsatz kommenden Baumaterialien und Bauprodukte die jeweiligen Verwendbarkeitsnachweise (CE-Kennzeichen/Leistungserklärung, allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen oder Prüfzeugnisse), für alle zum Einsatz kommenden Bauarten die jeweiligen Anwendbarkeitsnachweise (allgemeine Bauartgenehmigungen, allgemeine bauaufsichtliche Prüfzeugnisse für Bauarten) sowie ergänzend technische System-/Produktbeschreibungen, Einbauhinweise der Hersteller u.ä. sowie auch die geforderten Angaben zur Nachhaltigkeit geordnet an die Bauleitung des Auftraggebers zu übergeben.

Vor Begehungen zur Vorbereitung der Abnahme sind zur Ergänzung der Ver-/Anwendbarkeitsnachweise z.B. Fachunternehmererklärungen, Prüfberichte, Einbaudokumentationen, aktualisierte Zulassungen etc. der Bauleitung des Auftraggebers zu übergeben.

Alle Leistungen zu den Ver-/Anwendbarkeitsnachweisen sowie den ergänzenden Unterlagen zur Nachhaltigkeit sind in die Einheitspreise einzurechnen.

Frist für die Vorlage: 12 Werktage nach Aufforderung durch die Bauleitung des Auftraggebers
(Ergänzungen nach Abschluss der Bauleistungen 12 Werktage vor Abnahme);

Art der Vorlage: Format DIN A4 (ggf. gefaltet oder verkleinert auf DIN A4);
 Übergabeform: 1fach in Papier, zusätzlich als PDF-Datei erwünscht;

Bemusterungen

Vom Auftragnehmer sind für alle eingesetzten sichtbaren Materialien und Oberflächen aussagefähige Muster anzufertigen und rechtzeitig dem Auftraggeber oder Architekten zur Kontrolle und Freigabe vorzulegen. Diese Arbeiten zur Bemusterung sind in die Einheitspreise einzurechnen.

Die Angabe von Referenzfarben und -mustern erfolgt nach Farbangaben bzw. aus aktuellen Kollektionen der Hersteller oder nach markt gängigen Farbsystemen wie z.B. RAL oder NCS. Für alle Farbtonbereiche ist eine maximale Toleranz der Farben von Delta E max. 1,5 (entsprechend CIELab) gegenüber dem Urmuster bzw. der Referenzfarbe zulässig. Erstellte Muster sind vom Auftragnehmer bis zur Abnahme der betreffenden Leistung gemäß Anweisung des Auftraggebers oder dessen Bauleitung an geeigneter Stelle aufzubewahren oder zu übergeben.

Frist für die Vorlage: 18 Werktage nach Aufforderung durch die Bauleitung des Auftraggebers;

Art der Vorlage: Format DIN A4 (Mindestgröße);

Übergabeform: nach Erfordernis auf stabile Grundplatte aufgebracht (z.B. bei Farbmustern);

Zu größeren Mustern oder besonderen Ausführungen sind in den nachfolgenden Leistungsbeschreibungen Angaben gemacht oder besondere Positionen beschrieben.

Montageplanungen

Vom Auftragnehmer sind in diesem Gewerk allenfalls skizzenhafte Zeichnungen zur Detailabstimmung zu erstellen oder skizzenhafte Eintragungen in die Ausführungs-/Detailplanung der Architekten vorzunehmen.

Frist für die Vorlage: 18 Werktage nach Aufforderung durch die Bauleitung des Auftraggebers;

Art der Vorlage: maßstäbliche Skizzen oder skizzenhafte Eintragungen in vorhand. Zeichnungen;

Übergabeform: als PDF-Datei oder 1fach in Papier;

Stampflehmwände (Muster-LV)

196_LWL-FLM Detmold, Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude

03.06.2024 . Seite 6 von 19

Position	Beschreibung	Menge	Einh	EP	GP ohne USt.
----------	--------------	-------	------	----	--------------

BTV Baukräne durch gesondertes Gewerk Baulogistik (Bedienung durch Auftragnehmer selbst)

Besondere technische Vertragsbedingungen

Für das Abladen von Baustoffen und Bauteilen sowie für Transport und Montage im Baustellenbereich stehen bauseits durch ein gesondertes Gewerk Baulogistik mehrere Kräne zur Verfügung. Anzahl, Typ und technische Angaben zu den Kränen sind im Baustelleneinrichtungsplan dargestellt. Ausführbar sind nur vorbeschriebene Leistungen, die von den Kränen zum Zeitpunkt des Einsatzes technisch machbar sind, insbesondere sind durch den Baufortschritt nicht mehr erreichbare Flächen (z.B. überdeckt durch Geschossdecken o.ä.) zu beachten.

Eine Verrechnung für Betrieb der Kräne erfolgt nicht.

Die Bedienung der Kräne liegt in der Verantwortung des Auftragnehmers, entsprechend qualifiziertes Bedienpersonal ist in die Einheitspreise einzurechnen.

In der Nutzung der Kräne sind sämtliche Aufwendungen für den Einsatz, insbesondere aller Kosten für Betriebsstoffe und erforderliche Wartungen enthalten. Nicht enthalten ist die Bereitstellung besonderer Transportaufhängungen; diese sind vom Auftragnehmer beizustellen oder gesondert mit dem kranstellenden Gewerk abzustimmen und untereinander abzurechnen.

Die Anforderung des Kraneinsatzes insbesondere zur Terminabstimmung hat der Auftragnehmer direkt mit dem kranstellenden Gewerk durchzuführen. Bei gleichzeitigen Anforderungen durch mehrere Gewerke haben Leistungen Vorrang, die für den Gesamtbauablauf des Projekts terminkritisch und/oder nicht durch andere Transport- oder Montagemittel durchführbar sind.

Der Auftragnehmer hat dem kranstellenden Gewerk die für die Bedienung der Kräne eingesetzten Mitarbeiter rechtzeitig vor dem ersten Kraneinsatz zu benennen und für diese Mitarbeiter alle erforderlichen Nachweise und Bescheinigungen zur Berechtigung der Kranbedienung vorzulegen; diese Mitarbeiter haben zusätzlich an einer örtlichen Einweisung durch das kranstellende Gewerk teilzunehmen. Nicht vorher benannten und nicht ausgewiesenen Mitarbeitern des Auftragnehmers ist die Kranbedienung ausdrücklich verboten.

Eine Gewähr für die ununterbrochene Nutzung der Kräne wird vom Auftraggeber nicht übernommen.

Für alle Leistungen, die nicht mit den ausdrücklich beschriebenen Kränen durchführbar sind, sind durch den Auftragnehmer eigene geeignete Transporte und Montagehilfen einzukalkulieren.

Folgende Kräne sind vorgesehen (Standorte siehe Baustelleneinrichtungsplan):

Kran 1, 2 und 3

max. Traglast: 3.000kg;

max. Ausladung: 40m;

Stampflehmwände (Muster-LV)

196_LWL-FLM Detmold, Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude

03.06.2024 . Seite 7 von 19

Position	Beschreibung	Menge	Einh	EP	GP ohne USt.
----------	--------------	-------	------	----	--------------

1 LEHMBAU

1.1 Stampflehmwände

Leitbeschreibung Stampflehmwände tragend

Konstruktion

Im Gebäude sollen mehrere Stampflehmwände zur Ausführung kommen, die sowohl tragende als auch in Wandlängsrichtung aussteifende Funktion übernehmen. Die Wände dienen auch als Auflager für das bauseitige Dachtragwerk. An Öffnungen und als oberer Wandabschluss sind durch den Auftragnehmer ergänzende Stahlbetonbauteile einzusetzen, da hier das Tragverhalten der Stampflehmwand allein nicht ausreicht.

Zustimmung im Einzelfall erforderlich

Aufgrund des aktuell nicht ausreichenden Normenwerks für Lehmbau wird der Verwendbarkeitsnachweis über eine Zustimmung im Einzelfall nachgewiesen, die vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt wird. Bestandteil der Zustimmung im Einzelfall ist auch der statische Nachweis der Wände. Diese Nachweise sind in Anlehnung an die Mauerwerksnormen geführt (z.B. DIN EN 1996-1-1).

Den im Rahmen eines Forschungsprojekts erstellten Prüfbauteilen für die Zustimmung im Einzelfall liegt die Materialmischung eines Lehmherstellers aus der Region zugrunde, der auch den regional vorkommenden Lehm hierzu verarbeitet (siehe dazu auch nachfolgenden Punkt "Material"). Die bautechnische Herstellung der Prüfbauteile erfolgte durch eine ausführende Fachfirma. Die besonderen Eigenschaften von Material und Bautechnik sind in die Prüfungen eingeflossen und nicht ohne weiteres durch abweichende Mischungen oder alternative Bautechniken austauschbar.

Material

Zur Ausführung ist eine Fertigmischung für Stampflehm nach den Lehmbauregeln des Dachverbandes Lehm einzusetzen. Diese muss gemischt-körnigen bis steinigen Baulehm mit einer Bindekraft von $\geq 80\text{g/cm}^3$ sowie mineralische Zuschläge aus Grobsand, Splitt oder Kies enthalten. Im Ergebnis muss die verwendete Mischung eine Korngröße 0/22mm mit Überkorn $< 30\text{mm}$ sowie ein Trockenschwindmaß $< 0,5\%$ aufweisen. Mit der eingesetzten Fertigmischung müssen sich nach Verdichtung eine Rohdichte von ca. 2.200kg/m^3 sowie eine Druckfestigkeit $\geq 3\text{N/mm}^2$ im trockenen Zustand erreichen lassen, wobei das Material bereits kurz nach Verdichtung formstabil sein muss.

Hersteller/Typ Beispiel: conluto Stampflehm grob 0-22mm;

angebotener

Hersteller/Typ: '.....'
vom Bieter einzutragen, ohne Eintrag
gilt das Beispielprodukt als angeboten

Für die Erstellung von Wänden ist das Material lagenweise mit Schichthöhen ca. 10 bis 15cm in eine Schalung einzubringen und mechanisch zu verdichten. Nach Wahl des Auftragnehmers kann die Verdichtung durch elektrische, pneumatische aber auch durch manuelle Stampfgeräte erfolgen. Für die Einbringung ist das Material homogen und mit gleichmäßiger Feuchte erdflecht zu mischen, diese Eigenschaften sind während des gesamten Einbringprozesses vom Auftragnehmer ständig zu überwachen, nach Erfordernis ist häufiger nachzumischen. Bereits kurz nach Einbringung und Verdichtung des Material sind die Schalungen zu entfernen, um eine gute Austrocknung der erstellten Bauteile zu ermöglichen.

Sichtoberflächen

Das Material soll ungefärbt in seinem naturbraunen Farbton verwendet werden, wobei bei den verwendeten Mischungen auf Farbähnlichkeit zu achten ist, farblich stark abweichende Mischungen sind nicht zu verwenden; hierbei ist besonders bei den in der Höhe aufeinanderfolgenden Arbeitsabschnitten zu achten. Farbabweichungen (jedoch ähnliche Helligkeit und Farbcharakter) einzelner Wandabschnitte zueinander

Alle Währungsangaben in EUR

Stampflehmwände (Muster-LV)

196_LWL-FLM Detmold, Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude

03.06.2024 . Seite 8 von 19

Position	Beschreibung	Menge	Einh	EP	GP ohne USt.
----------	--------------	-------	------	----	--------------

(nach Ecken, Knicken o.ä.) sind zulässig. Nach Möglichkeit sind für die gleichen Wandabschnitte die gleiche Charge des Materialherstellers einzusetzen.

Die Bautechnik als Stampflehm soll gestalterisch an der Wandoberfläche sichtbar bleiben; es sind rissarme Oberflächen herzustellen, hierfür sind ausreichende verdeckte Bewehrungen nach Wahl des Auftragnehmers in die Bauteile einzulegen. In den Wänden bzw. zwischen den einzelnen Wandabschnitten sind ausdrücklich keine dauerhaft verbleibenden Dehnfugen vorgesehen. Die horizontalen und vertikalen Arbeitsfugen zwischen den einzelnen Arbeitsabschnitten sind so nachzuarbeiten, dass diese als solche nicht gestalterisch ablesbar sind. Dies gilt auch für die Fugen zwischen vorgefertigten vorgehängten Elementen. Darüber hinaus sind keine übermäßigen nachträglichen Ausbesserungen vorzunehmen. Ausbesserungen sollten sich kleinflächig auf gestalterisch auffällige Abweichungen oder unbedingte technische Erfordernisse beschränken, z.B. der Schließung von Lunkern, Reparatur abgeplatzter Flächen vor Bewehrungen o.ä.).

Kantenausbildungen

Alle Kanten der Wände an Ecken, Knicken, Laibungen etc. sind mit möglichst geringem Radius scharfkantig auszubilden (keine auffällige Fase oder größere Rundung). Ausbrüche durch das Ausschalen o.ä. sind möglichst unauffällig zu retuschieren.

Ausführung

Der geplante Bauablauf sieht die Ausführung in mehreren Höhenabschnitten analog einer Bauweise mit Gleitschalung vor. Hierbei wird an den Schalungsstützen (Grundkonstruktionen) die eigentliche Schalung Zug-um-Zug mit Baufortschritt hochgezogen, diese Grundkonstruktion kann bereits über die gesamte Höhe vorgehalten werden oder ebenfalls Zug-um-Zug aufgestockt werden.

Ragen Stützen oder andere Teile der Grundkonstruktion über die Oberkante der entsprechenden zu erstellenden Wand hinaus, sind diese so anzuordnen, dass später darüberliegende bauseitige Bauteile nicht behindert werden (Grundkonstruktion steht noch bei Fortschritt bauseitiger Arbeiten).

Nach dem Einbringen des Lehms sind die Schalungen zur Austrocknung des Materials zu entfernen, die Grundkonstruktionen verbleiben regelmäßig zur Stützung der noch austrocknenden Wände ("Stützkorsett"). Durch den Auftragnehmer sind hier zwischen Grundkonstruktionen und Wandflächen für die Zeit der Austrocknung nach Erfordernis Abstandshalter einzubringen. Die Grundkonstruktionen werden ggf. auch als Montagehilfen für die weiteren bauseitigen Arbeiten benutzt.

Zu den Schalungen (also nicht zu den Grundkonstruktionen) gehören auch die erforderlichen Arbeitsebenen sowie deren unfallsichere Zugänglichkeit (Gerüsttreppen), die vom Auftragnehmer eigenständig zu erstellen und in die Einheitspreise einzurechnen sind. Die planerisch erarbeiteten Fertigungsabschnitte sind in den Zeichnungen dargestellt und berücksichtigen gleichzeitig die Arbeiten übriger Gewerke.

Dem Bieter/Auftragnehmer ist es freigestellt, unter Berücksichtigung auch der übrigen Bauabläufe gemäß Terminplan abweichende Schalungstechniken und Fertigungsabschnitte zu kalkulieren und einzusetzen. Im Zweifel ist im Vergabeverfahren eine Bieterfrage zu stellen, die dann an alle Bieter beantwortet wird.

Bewehrungen / Einbauteile

Bewehrungen und Einbauteile sind grundsätzlich in die Einheitspreise der Wand- und Öffnungspositionen einzurechnen, insbesondere auch einzelne Bewehrungsseisen, Geogitter o.ä. zur Vermeidung von Rissen in Eckbereichen oder kleinere Einbauteile zur Anbindung der Stampflehmwand an bauseitige Bauteile (z.B. an Stahlbetonwände).

Knicke in Wänden u.ä. nichtrechtwinklig

Das Gebäude enthält entwurfsbedingt überwiegend nichtrechtwinklige Knicke und Ecken in Wänden, nichtrechtwinklige Ausbildungen von Wandstirnkanten und vergleichbarer Bauteile. Diese Ausführungen stellen im vorliegenden Fall die Regel dar und sind in den nachbeschriebenen Positionen immer einzurechnen. Dies gilt auch für schräge obere Abschlüsse von Wänden und wandartigen Bauteilen. Die Wände und wandartigen Bauteile stehen jedoch immer mit beiden Wandseiten senkrecht zur Geschossdecke.

Planungsmaße sind Fertigmaße / Schwindverhalten durch Auftragnehmer zu berücksichtigen

Die in den Zeichnungen und Leistungstexten angegebene Planungsmaße sind Fertigmaße nach Austrocknung der Lehmbauteile. Das materialtypische Schwindverhalten von Lehm ist vom Auftragnehmer z.B. durch größere Schalungsabstände bei Fertigung, Abwarten der Setzungen vor Sturzerstellung bei

Stampflehmwände (Muster-LV)

196_LWL-FLM Detmold, Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude

03.06.2024 . Seite 9 von 19

Position	Beschreibung	Menge	Einh	EP	GP ohne USt.
----------	--------------	-------	------	----	--------------

Öffnungen o.ä. eigenverantwortlich zu berücksichtigen.

Witterungsschutz / Schutz für kontrollierte Austrocknung

Die Ausführung der örtlich hergestellten Stampflehmwände erfolgt vor Herstellung des Gebäudedachs und daher ohne bauseitigen Witterungsschutz. Ein geeigneter Witterungsschutz ist durch den Auftragnehmer in die Einheitspreise einzurechnen, dieser Witterungsschutz ist auch bis zur (provisorischen) Herstellung des Gebäudedachs zu unterhalten.

Gleiches gilt für Schutzabdeckungen zur Verhinderung einer zu raschen oder ungleichmäßigen Austrocknung z.B. durch Sonneneinstrahlung.

Zeitfenster für Ausführung

Die Ausführung der örtlich herzustellenden Stampflehmwände erfolgt außerhalb der Frostperioden.

Stampflehmwände (Muster-LV)

196_LWL-FLM Detmold, Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude

03.06.2024 . Seite 10 von 19

Position	Beschreibung	Menge	Einh	EP	GP ohne USt.
----------	--------------	-------	------	----	--------------

1.1.1

Innenwände aus Stampflehm herstellen

gemäß Leitbeschreibung "Stampflehmwände tragend";

als tragende Innenwände, Brüstungen u.ä.;
einschl. aller Eck- und Stirnkantenausbildungen;

Wanddicke: ca. 65cm;
Wandhöhe: bis ca. 1.000cm;
Druckfestigkeit: >=3,0N/mm²;
Rohdichte: ca. 2.200kg/m³;
Elastizitätsmodul: >=1.000MN/m²;

Baustoffklasse: nichtbrennbar A1 nach DIN 4102;
Feuerwiderstand: statisch konstruktiv feuerhemmend,
Raumabschluss ohne Anforderungen;
Oberflächen: beidseitig als Sichtoberflächen;

einschl. gestalterisch nicht ablesbare Vermörtelung aller Arbeitsfugen,
Schalungslöcher, Wandanschlüsse an bauseitige Wände etc. in Material,
Oberfläche und Farbton der Wandflächen (als Ausführung Nass-in-Nass),
nach Erfordernis auch als Nacharbeitung nach Austrocknung der Wand
(Schwindfugen);

einschl. Schalungen und eigenverantwortlich durch den Auftragnehmer zu
wählender Bewehrungen (insbesondere in Eckbereichen);
einschl. Aussteifungen der noch trocknenden Wandbereiche nach
Entfernung der Schalungen;
einschl. Grundkonstruktionen für alle Schalungen und Aussteifungen
("Stützkorsett");

einschl. aller Bohrungen und Befestigungen am Untergrund jeweils an
den Wandenden zu oder in Bereichen vor bauseitigen Wänden über
vertikale Halfenschienen mit eingesetzten Gleitankern o.ä. mit
bauaufsichtlicher Zulassung;

Befestigungsuntergr.: Stahlbeton;

Arbeitshöhe: bis einschl. 10,00m
einschl. erforderlicher Gerüste;

810 m²

1.1.2

Innenwände aus Stampflehm herstellen

analog Leitbeschreibung "Stampflehmwände tragend"

wie vor, jedoch
als selbsttragende Einzelelemente im Sinne von Fertigteilen für
Innenwände, Brüstungen u.ä.;
Ausführung nach Wahl des Auftragnehmers als werkseitige oder im
Baustellenbereich vorproduzierte Fertigteile in möglichst großen
Einzellängen und -höhen oder als örtliche Herstellung am Einbauort;

Wanddicke: ca. 15 bis ca. 18cm;
Wandhöhe: bis ca. 300cm (nach Wahl des Auftragnehmers);
Druckfestigkeit: >=3,0N/mm²;
Rohdichte: ca. 2.200kg/m³;

Stampflehmwände (Muster-LV)

196_LWL-FLM Detmold, Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude

03.06.2024 . Seite 11 von 19

Position	Beschreibung	Menge	Einh	EP	GP ohne USt.
----------	--------------	-------	------	----	--------------

Übertrag:

Baustoffklasse: nichtbrennbar A1 nach DIN 4102;
 Feuerwiderstand: ohne Anforderungen;
 Oberflächen: einseitig als Sichtoberflächen,
 rückseitig ohne Anforderungen;

einschl. gestalterisch nicht ablesbare Vermörtelung aller Stoß- und Lagerfugen in Material, Oberfläche und Farbton der Wandflächen (als Ausführung Nass-in-Nass);
 einschl. Schalungen und eigenverantwortlich durch den Auftragnehmer zu wählender Bewehrungen (insbesondere in Eckbereichen);

einschl. Transport und Montage am endgültigen Einbauort;
 einschl. aller Bohrungen und Befestigungen am Untergrund über Z-Winkelstücke und Anker aus Edelstahl, vertikale Halfenschienen mit eingesetzten Gleitankern o.ä. mit bauaufsichtlicher Zulassung sowie alle erforderlichen Einbauteile, Nuten, Aussparungen o.ä. in den Einzelementen;

Befestigungsuntergr.: Stahlbeton ODER
 Holzwerkstoffplatten auf Stahl-Unterkonstr.;

Arbeitshöhe: bis einschl. 10,00m
 einschl. erforderlicher Gerüste;

470 m2

1.1.3 Unterkonstruktion für freistehende Stampflehmwand vor Brandschutztor liefern und einbauen

zur Befestigung vorbeschriebener vorgehängte Elemente;
 aus tragenden Metallprofilen mit flächiger Beplankung, obere Anbindung als gleitender Anschluss;
 einschl. Befestigungsmittel, Zubehör etc.;

Gesamthöhe: ca. 550cm;

als vertikale tragende Rechteck-Hohlprofile über die Gesamthöhe;

Abmessungen: ca. 60 / 60 / 3mm;
Material/Oberfl.: Stahl, mit Korrosionsschutz grundiert;
 Abstand Profile: ca. 60cm;

einschl. Bohrungen und Befestigungen an Boden und Decke direkt am Rohbau mit teleskopartig geführten Verbindungswinkeln aus Stahl und bauaufsichtlich zugelassenen Befestigungsmitteln;

Befestigungsuntergr.: Stahlbeton;

sowie
 als vollflächige, dicht gestoßene Beplankung aus OSB3-Platten mit Dicke mind. 22mm;
 einschl. Bohrungen und Befestigungen an vorbeschriebenen tragenden Metallprofilen;

Arbeitshöhe: bis ca. 5,50m

Stampflehmwände (Muster-LV)

196_LWL-FLM Detmold, Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude

03.06.2024 . Seite 12 von 19

Position	Beschreibung	Menge	Einheit	EP	GP ohne USt.
----------	--------------	-------	---------	----	--------------

Übertrag:

einschl. erforderlicher Gerüste;

77 m2

Anford. Nachhaltigkeit zu verb. Pos.: Korrosionsschutz als wasserverdünnbares Produkt mit VOC<100g/l;

1.1.4 Revisionstüren in Stampflehmwand liefern und einbauen

nach Wahl des Auftragnehmers als Fertigprodukt oder als Eigenbau; Ausführung ähnlich einer Möbeltür vor einem vollständig durch die Tür verdecktem Rahmen;

Öffnungsbreite: ca. 70cm;
Öffnungshöhe: ca. 70cm;

Material Rahmen: Holzleisten / Streifen aus Holzwerkstoffplatten;
 Material Türblatt: Holzwerkstoffplatte wasserfest;

einschl. 2 St. dreidimensional einstellbare Türbänder als Ganzmetall-Topfbänder (aus dem Möbelbau), von außen nicht sichtbar, mit Federmechanismus zur Selbstschließung und Zuhaltung der Tür unter einem Öffnungswinkel von ca. 5°;

einschl. Aufbringen eines Putzträgers auf dem Türblatt sowie Herstellen einer Oberfläche in Optik der Oberflächen der angrenzenden Stampflehm-Wandflächen;
 einschl. umlaufende unauffällige Flächenabschlussprofile um diese Lehmoberfläche auf dem Türblatt;

einschl. Montage an bzw. in vorbeschriebene Unterkonstruktion;

einschl. Anlegen der Wandöffnung im Zuge der Neuerstellung der zugehörigen Stampflehmwand;
 einschl. Ausbildung des vorbeschriebenen verdeckten Türrahmens gleichzeitig als Sturzbauteil zur Überdeckung der Öffnung oder vergleichbare gesonderte verdeckte Sturzausbildung nach Wahl des Auftragnehmers;

Wanddicke: bis einschl. 20cm;

Einbauhöhe: ca. 5,50m (Oberkante)
 einschl. erforderlicher Gerüste;

Einbauort: Revisionszugänge Brandschutztor Foyer;

1 St

Anford. Nachhaltigkeit zu verb. Pos.: FSC- oder PEFC-Zertifikat und Handelszertifikat (CoC) notwendig;

1.1.5 Wandsockel aus Stampfbeton herstellen

als wasserbeständiger Sockel unter tragenden Innenwänden u.ä.; alle Kanten scharfkantig (keine Dreikantleisten!); Ausführung nach Wahl des Auftragnehmers als werkseitige oder im Baustellenbereich vorproduzierte Fertigteile in möglichst großen Einzellängen oder als örtliche Herstellung am Einbauort;

Stampflehmwände (Muster-LV)

196_LWL-FLM Detmold, Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude

Position	Beschreibung	Menge	Einh	EP	GP ohne USt.
----------	--------------	-------	------	----	--------------

Übertrag:

einschl. Schalungen und erforderlicher Bewehrungen;

Sockelbreite: ca. 60cm;
Sockelhöhe: ca. 6cm
Druckfestigkeit: >=3,0N/mm²;
Rohdichte: ca. 2200kg/m³;

Baustoffklasse: nichtbrennbar A1 nach DIN 4102;
 Feuerwiderstand: statisch konstruktiv feuerhemmend,
 Raumabschluss ohne Anforderungen;
 Material: Stampfbeton
 (Rezeptur nach Wahl des Auftragnehmers);

einschl. beidseitiges Herunterführen der Sichtoberflächen ähnlich Oberfläche und Farbton der darüberliegenden Stampflehmwand als vor den Wandsockel über die Sockelhöhe geführte mit max. 5% Trasskalk verstärkte Retuschestreifen aus dem Material der darüberliegenden Stampflehmwand (dieser Streifen soll durch die Zugabe des Trasskalks beständig gegen mechanische und feuchtebedingte Einflüsse z.B. durch Reinigungsgeräte sein);

einschl. Ausbildung einer Schattennut beidseitig entlang der Längskanten unterhalb der seitlichen Retuschestreifen (zum Fußboden) mit Querschnitt ca. 2/2cm sowie Flächenabschlussprofil als Blechstreifen aus Edelstahl mit Dicke ca. 3mm und Breite ca. 80mm in den Wandsockel unterhalb des Retuschestreifens bzw. oberhalb der Schattennut;

einschl. Verlängerung von Retuschestreifen, Flächenabschlussprofil und Schattennut an Wandenden und Türöffnungen auch auf den Wandstirnseiten, hier jedoch nur an später sichtbaren Flächenbereichen (nicht durchlaufend! - Schallschutz);

einschl. Vermörtelung der Stoßfugen (bei Fertigteilen);
 einschl. oberseitig vollflächiger Mörtelschicht mit Dicke ca. 5mm zur Verbindung von Sockel und darüberliegender Wand;
 einschl. vorherigem oberseitig vollflächigem Auftrag einer mineralischen Dichtschlämme;

140 m

1.1.6 Wandsockel aus Stampfbeton herstellen

wie vor, jedoch
Sockelbreite: ca. 16cm;
Sockelhöhe: ca. 6cm

einschl. Retuschestreifen, Flächenabschlussprofil und Schattennut nur **einseitig** entlang einer Längskante sowie erforderliche stirnseitige Verlängerungen wie vorbeschrieben;

21 m

1.1.7 verdeckten Ringbalken am oberen Wandabschluss herstellen

auf vorbeschriebener Stampflehmwand in örtlicher Bauweise am oberen Wandabschluss;

Stampflehmwände (Muster-LV)

196_LWL-FLM Detmold, Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude

03.06.2024 . Seite 14 von 19

Position	Beschreibung	Menge	Einh	EP	GP ohne USt.
----------	--------------	-------	------	----	--------------

Übertrag:

aus Stahlbeton als Normalbeton DIN1045 C25/30 XC1 W0;
 Oberseite glatt abgerieben;
 einschl. Bewehrung nach Vorgabe Statik;

Abmessungen (B/H) ca. 30 / 30cm;

einschl. verdecktem Einbau des Ringbalkens beidseitig mit Überdeckung
 mind. 15cm (gleichzeitig Schalung des Ringbalkens) sowie
 kraftschlüssiger Verbindung des Ringbalkens mit der Überdeckung;

*Der Ringbalken soll sich in der Wandoberfläche nicht abzeichnen. Die
 seitlichen Überdeckungen sind in Material, Oberfläche und Farbton der
 übrigen Wandflächen - also in Optik des Stampflehms - auszuführen.*

140 m

Anford. Nachhaltigkeit zu verb. Pos.: Schalöl hat GIS-Code BTMS

1.1.8 Türöffnungen anlegen und Öffnungen mit Stürzen überdecken

im Zuge der Neuerstellung vorbeschriebener Stampflehmwände in allen
 Ausführungen und Abmessungen;

Wanddicke: bis einschl. 20cm;
Öffnungsbreite: ca. 205cm;
Öffnungshöhe: ca. 350cm;

einschl. Sturzbauteile zur Überdeckung der Öffnung als L-Winkel ca.
 170/170/20mm aus Stahl;
 einschl. verdecktem Einbau der Sturzbauteile unterseitig mit
 Überdeckung mind. 2cm sowie beidseitig mit Überdeckung mind. 3cm
 (bei örtlicher Ausführung gleichzeitig Schalung) sowie kraftschlüssiger
 Verbindung der Sturzbauteile mit der Überdeckung;

*Der Sturzbereich soll sich in der Wandoberfläche nicht abzeichnen. Die
 seitlichen Überdeckungen sind in Material, Oberfläche und Farbton der
 übrigen Wandflächen - also in Optik des Stampflehms - auszuführen.*

einschl. Schutz der senkrechten Laibungsflächen und der jeweils
 angrenzenden Kanten auf beiden Tür- und beiden Wandseiten durch
 Anbringung einer Beplankung aus Holzleisten/Holzwerkstoffplatten mit
 Höhe ca. 200cm sowie mit Zwischenlage aus Malervlies o.ä. nach
 Erfordernis;
 einschl. späterem Rückbau und Entsorgung des Laibungsschutzes (das
 eingesetzte Material bleibt Eigentum des Auftragnehmers);

Einbauort: Forum zum Lagerraum;

1 St

1.1.9 Türöffnungen anlegen und Öffnungen mit Stürzen überdecken

im Zuge der Neuerstellung vorbeschriebener Stampflehmwände in allen
 Ausführungen und Abmessungen;

Wanddicke: über 50 bis einschl. 70cm;

Stampflehmwände (Muster-LV)

196_LWL-FLM Detmold, Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude

03.06.2024 . Seite 15 von 19

Position	Beschreibung	Menge	Einh	EP	GP ohne USt.
----------	--------------	-------	------	----	--------------

Übertrag:

Öffnungsbreite: ca. 250cm;
Öffnungshöhe: ca. 350cm;

einschl. Sturzbauteile zur Überdeckung der Öffnung, Ausführung nach Wahl des Auftragnehmers als werkseitige oder im Baustellenbereich vorproduzierte Fertigteile oder als örtliche Herstellung am Einbauort; aus Stahlbeton als Normalbeton DIN1045 C25/30 XC1 W0; einschl. Schalungen und Bewehrungen;

Sturzhöhe: ca. 70cm nach Vorgabe Statik;

einschl. verdecktem Einbau der Sturzbauteile unterseitig mit Überdeckung mind. 2cm sowie beidseitig mit Überdeckung mind. 15cm (bei örtlicher Ausführung gleichzeitig Schalung) sowie kraftschlüssiger Verbindung der Sturzbauteile mit der Überdeckung; einschl. ausreichende seitliche Fortführung der Sturzbauteile und zusätzliche Maßnahmen zur Auflagerausbildung nach Wahl des Auftragnehmers z.B. durch Zwischenlage einer Stahlplatte oder Betonpolster;

Der Sturzbereich soll sich in der Wandoberfläche nicht abzeichnen. Die seitlichen Überdeckungen sind in Material, Oberfläche und Farbton der übrigen Wandflächen - also in Optik des Stampflehms - auszuführen.

einschl. unterhalb des Sturzes zur Abgrenzung der Montagefuge für das bauseitige Türelement durchlaufend über die gesamte Öffnungsbreite am Fertigteilsturz mit Öffnung nach unten angebrachtes U-Profil ca. 80/80/0,8mm aus Edelstahl mit allen Bohrungen und Befestigungen;

einschl. beidseitig im Laibungsbereich jeweils mittig punktweise im Abstand von ca. 50cm eingesetzte Betonplomben zur Befestigung der bauseitigen Türelemente, Einbringung der Betonplomben mit ca. 5cm Überdeckung zur Sichtoberfläche der Laibungen;

einschl. Schutz der senkrechten Laibungsflächen und der jeweils angrenzenden Kanten auf beiden Tür- und beiden Wandseiten durch Anbringung einer Beplankung aus Holzleisten/Holzwerkstoffplatten mit Höhe ca. 200cm sowie mit Zwischenlage aus Malervlies o.ä. nach Erfordernis; einschl. späterem Rückbau und Entsorgung des Laibungsschutzes (das eingesetzte Material bleibt Eigentum des Auftragnehmers);

Einbauort: Eingänge Ausstellungsraum;

4 St

1.1.10 Türöffnungen anlegen und Öffnungen mit Stürzen überdecken

im Zuge der Neuerstellung vorbeschriebener Stampflehmwände in allen Ausführungen und Abmessungen;

Wanddicke: über 50 bis einschl. 70cm;
Öffnungsbreite: ca. 880cm;
Öffnungshöhe: ca. 400cm;

einschl. Sturzbauteile zur Überdeckung der Öffnung, Ausführung hier als

Stampflehmwände (Muster-LV)

196_LWL-FLM Detmold, Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude

03.06.2024 . Seite 16 von 19

Position	Beschreibung	Menge	Einh	EP	GP ohne USt.
----------	--------------	-------	------	----	--------------

Übertrag:

Fertigteil aus Stahlbeton als Normalbeton DIN1045 C25/30 XC1 W0;
einschl. Schalungen und Bewehrungen;

Sturzbreite: ca. 30cm nach Vorgabe Statik;
Sturzhöhe: ca. 120cm nach Vorgabe Statik;

einschl. beidseitig durchlaufend über die gesamte Öffnungsbreite und beiden Auflagerbereichen am Fertigteilsturz angebrachte L-Winkel je ca. 220/170/20mm aus Stahl mit dreieckigen Rippen als Aussteifungen im Profilquerschnitt, allen Bohrungen und Befestigungen sowie Aussparungen im Sturzbauteil zur flächenbündigen Einarbeitung des vertikalen Winkelschenkels;
einschl. verdecktem Einbau der Sturzbauteile beidseitig mit Überdeckung ca. 17cm sowie kraftschlüssiger Verbindung der Sturzbauteile mit der Überdeckung (unterseitige Überdeckung hier wie nachbeschrieben);
einschl. ausreichende seitliche Fortführung der Sturzbauteile und zusätzliche Maßnahmen zur Auflagerausbildung nach Wahl des Auftragnehmers;

Der Sturzbereich soll sich in der Wandoberfläche nicht abzeichnen. Die seitlichen Überdeckungen sind in Material, Oberfläche und Farbton der übrigen Wandflächen - also in Optik des Stampflehms - auszuführen.

einschl. unterhalb des Sturzes beidseitig der Montagefuge für das bauseitige Türelement durchlaufend über die gesamte Öffnungsbreite am Fertigteilsturz angebrachte L-Winkel ca. 60/60/0,8mm aus Edelstahl mit allen Bohrungen und Befestigungen;
einschl. unterseitig durchlaufend über die gesamte Öffnungsbreite befestigte Leichtlehmbauplatten mit Dicke je 20mm als Putzträger, Ausführung jeweils zweilagig auf beiden Türseiten als Streifen mit Breite je ca. 25cm (links und rechts von der Montagefuge für den Türeinbau);
einschl. unterseitig auf diesen beiden Streifen vollflächig aufgebracht Lehmputz mit Dicke ca. 2cm (nach Erfordernis bestehend aus Unterputz, Oberputz und Feinputz als getrennte Arbeitsgänge) in Farbton und Oberfläche ähnlich der angrenzenden Stampflehmwand;

einschl. beidseitiges Herunterführen der Sichtoberflächen ähnlich Oberfläche und Farbton der darüberliegenden Stampflehmwand als vor der Sturzunterseite mit Höhe ca. 8cm geführte mit max. 5% Trasskalk verstärkte Retuschestreifen aus dem Material der darüberliegenden Stampflehmwand;
einschl. Eckausbildung zwischen Putz der Laibungsunterseite und den aufgehenden Retuschestreifen nach Wahl des Auftragnehmers (einschl. ggf. verdeckt verbauter Eckprofile);

einschl. beidseitig im Laibungsbereich jeweils mittig punktweise im Abstand von ca. 50cm eingesetzte Betonplomben zur Befestigung der bauseitigen Türelemente, Einbringung der Betonplomben mit ca. 5cm Überdeckung zur Sichtoberfläche der Laibungen;

einschl. Schutz der senkrechten Laibungsflächen und der jeweils angrenzenden Kanten auf beiden Tür- und beiden Wandseiten durch Anbringung einer Beplankung aus Holzleisten/Holzwerkstoffplatten mit Höhe ca. 200cm sowie mit Zwischenlage aus Malervlies o.ä. nach Erfordernis;

Stampflehmwände (Muster-LV)

196_LWL-FLM Detmold, Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude

03.06.2024 . Seite 17 von 19

Position	Beschreibung	Menge	Einh	EP	GP ohne USt.
----------	--------------	-------	------	----	--------------

Übertrag:

einschl. späterem Rückbau und Entsorgung des Laibungsschutzes (das eingesetzte Material bleibt Eigentum des Auftragnehmers);

Einbauort: Eingang Forum vom Foyer;

1 St

1.1.11 Fugen Lehmwand an bauseitige Einbauteile schließen und anarbeiten

in verschiedenen Einbausituationen, z.B. um die Träger des konstruktiven Holzbaus;
 als nachträgliches Ausfüllen der Fugen mit örtlich vorgefertigten, in die Fugen dicht eingebrachten plastischen Lehmsträngen;
 einschl. Anbringen einer durch vorherbeschriebenen Fugenschluss verdeckte Trenn- bzw. Gleitschicht an bauseitige Bauteile sowie nachträgliches Rückschneiden überstehender Teile der Trenn- bzw. Gleitschicht nach Erfordernis;
 einschl. Hinterfüllen der Fugen nach Erfordernis;

Arbeitshöhe: bis ca. 10,00m
 einschl. erforderlicher Gerüste;

250 m

1.1 Stampflehmwände

Stampflehmwände (Muster-LV)

196_LWL-FLM Detmold, Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude

03.06.2024 . Seite 18 von 19

Position	Beschreibung	Menge	Einh	EP	GP ohne USt.
----------	--------------	-------	------	----	--------------

1.2 Muster

1.2.1 Großmuster Stampflehmwand in örtlicher Bauweise herstellen und liefern

als Ausführung im Baustellenbereich;
mit Originalmaterial sowie in Oberfläche und Farbton wie vorbeschrieben;

Abmessungen (B/H): ca. 150 / 150cm;
Wanddicke: ca. 60cm;

in unterschiedlichen Ausführungen und Farb-/Oberflächenvarianten (nur bei mehreren Großmustern);

Eines der ausgeführten Muster wird durch den Auftraggeber zur Ausführung freigegeben und dient als Referenz für die Ausführung der Gesamtfläche.

1 St

1.2.2 Großmuster Stampflehmwand als vorgefertigte Elemente herstellen und liefern

als Ausführung im Baustellenbereich;
mit Originalmaterial sowie in Oberfläche und Farbton wie vorbeschrieben;

Abmessungen (B/H): ca. 150 / 150cm;
Wanddicke: ca. 15cm;

in unterschiedlichen Ausführungen und Farb-/Oberflächenvarianten (nur bei mehreren Großmustern);

Eines der ausgeführten Muster wird durch den Auftraggeber zur Ausführung freigegeben und dient als Referenz für die Ausführung der Gesamtfläche.

1 St

1.2 Muster

1 LEHMBAU

Stampflehmwände (Muster-LV)

196_LWL-FLM Detmold, Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude

03.06.2024 . Seite 19 von 19

ZUSAMMENSTELLUNG

1.1	Stampflehmwände
1.2	Muster
1	LEHMBAU
	Summe
	zzgl. USt. %
	Gesamtsumme	<u>.....</u>

Anlage A2:

Abschlussbericht

DBU-Projekt AZ 35442/02

Gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU)

Arbeitspaket 6: Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für die Umsetzbarkeit ökologischer Konstruktionen bei Großprojekten für das Material Lehm

1. Zwischenbericht – Mechanische Eigenschaften des Stampflehms 0075/21 (IMS/AR/HW)

Freilichtmuseum Detmold – Landesmuseum für Alltagskultur
Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude

Institut für Materialprüfung und Bauwerkserhaltung GmbH, Oldenburg
Im Auftrag von: LWL – Bau- und Liegenschaftsbetrieb, Münster

Autoren: H. Wigger und A. Relishkis

14.03.2023

1. Zwischenbericht

REVIEWED (10.03.2023)

Nr.: 0075/21 ME (IMS/AR/HW)

_ . Ausfertigung

Auftraggeber: LWL – Bau- und Liegenschaftsbetrieb
Warendorfer Straße 24**48145 Münster**Projekt: **Freilichtmuseum Detmold – Landesmuseum für Alltagskultur**
Neubau Eingangs- und AusstellungsgebäudeInhalt: **Mechanische Eigenschaften des Stampflehms**

Der Bericht umfasst 41 Seiten (einschl. Anlagen)

Der Bericht darf nur ungekürzt veröffentlicht oder vervielfältigt werden; eine **auszugsweise** Wiedergabe bedarf der vorherigen schriftlichen Einwilligung.

IfMB GmbHZeughausstraße 15
26121 Oldenburg
Amtsgericht Oldenburg
HRB 214442**Kontakt**Tel.: 0441 / 71131
Fax: 0441 / 76203
E-Mail: info@ifmb-ol.de
<http://www.ifmb-ol.de>**Geschäftsführer**Prof. Dr.-Ing. Heinrich Wigger
Sitz: Oldenburg
St. Nr.: 64/211/05975**Bankverbindung**Bank: LZO Oldenburg
IBAN: DE 22 2805 0100 0093 0091 73
BIC: SLZODE22XXX

Inhaltsverzeichnis:

1	Veranlassung und Vorgang	4
2	Normen, Richtlinien, Literatur und Unterlagen	4
2.1	Normen und Richtlinien	4
2.2	Literatur	4
2.3	Unterlagen	5
3	Durchgeführte Untersuchungen.....	5
3.1	Überblick	5
3.2	Ausgangsmaterial	5
4	Mechanische Untersuchungen	6
4.1	Prüfkörper.....	6
4.2	Untersuchung der Rohdichte an Kleinprüfkörpern	6
4.3	Untersuchung der Gleichgewichtsfeuchte.....	7
4.4	Untersuchung der Druckfestigkeit an Kleinprüfkörpern	7
4.5	Untersuchung des Elastizitätsmoduls an Kleinprüfkörpern	7
5	Untersuchungsergebnisse	8
5.1	Ergebnisse der Rohdichteuntersuchungen an Kleinprüfkörpern	8
5.2	Ergebnisse der Gleichgewichtsfeuchte	9
5.3	Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen an Kleinprüfkörpern	11
5.4	Ergebnisse der Prüfung des Elastizitätsmoduls an Kleinprüfkörpern	11
6	Zusammenfassung und Vergleichswerte	12
6.1	Überblick	12
6.2	Rohdichte	12
6.3	Druckfestigkeit	13
6.4	Elastizitätsmodul.....	14
7	Anlagen A.....	15
7.1	Bilder	15
7.2	Ergebnisse der Untersuchungen	17
7.2.1	Bestimmung charakteristischer Druckeigenschaften	17
7.2.2	Spannungs-Dehnungs-Diagramme Zylinder	19
8	Anlage B.....	21
8.1	Prüfprotokolle Würfeldruckfestigkeiten Schomburg GmbH & Co. KG	21

8.2	Kalibrierschein Waage	28
8.3	Kalibrierschein Druckprüfmaschine	29
8.4	Kalibrierschein Ansetzdehnungsaufnehmer	33
8.5	Kalibrierscheine Klimaschränke	37

1 Veranlassung und Vorgang

Das Freilichtmuseum Detmold – Landesmuseum für Alltagskultur plant den Neubau eines Eingangs- und Ausstellungsgebäudes. Im Zuge des geplanten Neubaus sollen tragende und aussteifende Wände aus STAMPFLEHM zur Ausführung kommen. Da es sich bei Stampflehm um ein unregelmäßiges Bauprodukt handelt, muss für die geplante Ausführung eine ZUSTIMMUNG IM EINZELFALL (ZIE) erteilt werden. In Verbindung mit der ZIE müssen alle erforderlichen bautechnischen Nachweise für das Bauprodukt erbracht werden. Hierfür ist die Ermittlung der Materialkennwerte erforderlich. Die erforderlichen Prüfungen wurden vom Gutachterbüro JÄGER INGENIEURE GMBH und dem Mitarbeiter PROF. DR.-ING. T. BURKERT ausgearbeitet. In mehreren Sitzungen der Arbeitsgruppe Lehm unter Mitarbeit von Herrn PROF. SCHULZ, (TH OWL) Herrn ROSENKRANZ (Tragwerksplaner, KEMPEN KRAUSE INGENIEURE GMBH), Herrn EISLER (Prüfstatter), Herrn WEIGAND (Architekt) und Herrn MEYER (Stampflehmliedant) wurde der Umfang der Prüfungen besprochen und abgestimmt.

Vor diesem Hintergrund hat der LWL BAU- UND LIEGENSCHAFTSBETRIEB das INSTITUT FÜR MATERIALPRÜFUNG UND BAUWERKSERHALTUNG GMBH am 30.08.2021 beauftragt, die mechanischen sowie bauphysikalischen Materialeigenschaften des Stampflehms zu ermitteln. Die Ergebnisse der bauphysikalischen Materialeigenschaften werden in einem gesonderten Bericht angefertigt.

2 Normen, Richtlinien, Literatur und Unterlagen

2.1 Normen und Richtlinien

- [N 1] DIN EN 18945, (12-2018): Lehmsteine – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung.
- [N 2] DIN EN 18948, (12-2018): Lehmplatten – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung.
- [N 3] DIN EN 12390-1, (09-2021): Prüfung von Festbeton – Teil1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen
- [N 4] DIN EN 12390-3, (10-2019): Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern.
- [N 5] DIN EN 12390-13 (09-2021): Prüfung von Festbeton – Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul).
- [N 6] DIN EN 1990:2021-10 (10-2021): Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010 (D)

2.2 Literatur

- [L 1] Volhard, F.; Röhlen, U. (2009): Lehmhaus Regeln, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 3. Überarbeitete Aufl.
- [L 2] Dierks, K.; Ziegert, C. (2000): Lehm 2000 - Materialprüfung und Begleitforschung im tragenden Lehmhaus, Hrsg. Peter Steingass, Overall Verlag, Berlin.

2.3 Unterlagen

- [U 1] Schomburg GmbH & Co. KG (2021): Lehmwürfel Prüfprotokolle 1-21, 2-21, 3-21, 4-21, 5-21, 6-21, 7-21
- [U 2] Conluto – Vielfalt aus Lehm: Produktmerkblatt 02.005 – 02.006 – Stampflehm grob 0-22 mm, Version 20.1.0
- [U 3] Relishkis A., (2021): Tragfähigkeit von Stampflehmwänden. Masterthesis, Oldenburg (unveröffentlicht).
- [U 4] Hofschlag H., (2009): Untersuchungen zum Tragverhalten unbewehrter Stampflehmwände. Masterthesis, Holzminden (unveröffentlicht).

3 Durchgeführte Untersuchungen

3.1 Überblick

Die Materialuntersuchungen erfolgten im Zusammenhang mit der geplanten Ausführung der tragenden und aussteifenden Konstruktionen aus Stampflehm. Die zu untersuchenden Materialparameter wurden in einem gemeinsamen Austausch zwischen den Projektbeteiligten festgelegt.

Im vorliegenden Zwischenbericht werden die ersten Ergebnisse der mechanischen Materialeigenschaften von Stampflehm dargelegt. Im Rahmen der Untersuchungen an kleinformatigen Prüfkörpern wurden folgende Materialkennwerte identifiziert:

- Druckfestigkeiten der Würfel bei 23°C/ 80 r. F.
- Druckfestigkeiten der Zylinder bei 23°C/ 50 r. F.
- Elastizitätsmodul

Darüber hinaus werden für die Auswertung der Materialeigenschaften die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen von Schomburg GmbH & Co. KG [U 1] herangezogen.

Die Grundlage für die Materialuntersuchungen bilden in erster Linie die bestehenden Lehm- bau Regeln [L 1]. Ergänzend zu den Lehm- bau Regeln wurden auch Teilaspekte anderer Prüfmetho- den für Baustoffe mit ähnlichen Materialeigenschaften herangezogen. Dies hängt damit zusammen, dass es für den Baustoff Stampflehm keine genormten Versuchsanord- nungen gibt bzw. diese nicht im Detail beschrieben werden.

3.2 Ausgangsmaterial

Das für die Herstellung der Prüfkörper verwendete Material wurde von der Firma CONLUTO VIELFALT AUS LEHM zur Verfügung gestellt. Die verarbeitungsfertige Stampflehm- mischung wurde im erdfeuchten Zustand in mehreren „Big Bags“ (à 1300 kg) angeliefert. Bei dem Ma- terial handelt es sich um eine Fertigmischung, die sich aus gemischt-körnigem bis steinigem Baulehm mit einer Bindekraft über 0,80 N/cm² und mineralischen Zuschlägen wie Grobsand,

Kies oder Splitt zusammensetzt. Nach Herstellerangaben reichen die Kornfraktionen bis zu 22 mm mit einer Überkorngröße < 30 mm [U 1].

4 Mechanische Untersuchungen

4.1 Prüfkörper

Die Prüfkörper für die mechanischen Untersuchungen wurden von der Firma CONLUTO VIELFALT AUS LEHM beauftragten Fachkräften (Herr FECHLER) hergestellt, s. Bild A 1.

Die quadratischen und zylindrischen Prüfkörper wurden in Schalungsformen (Bild A 2) und mit Hilfe eines pneumatischen Verdichtungsgerät hergestellt. Die Schütthöhe der Stampflehmschichten betrug ca. 15 cm. Durch den Verdichtungsvorgang wurden die aufgeschütteten Schichten auf etwa 2/3 ihrer Schütthöhe komprimiert.

Nach dem Herstellungsprozess wurden die zylindrischen Prüfkörper im Labor unter normalen Innenraumbedingungen getrocknet. Die Raumtemperatur sowie die Raumlufffeuchte wurden mit einem Datenlogger erfasst. Im Durchschnitt betrug die Temperatur 18,9°C und die rel. Luftfeuchte 53,8%, s. Bild A 3. Die Trocknung der Würfel erfolgte in einem Klimaschrank bei 23°C und 80% rel. Luftfeuchte. Alle Prüfkörper wurden bis zum Erreichen der Massekonstanz ($\Delta m = 0,05\%$) getrocknet [N 2].

Für die Druckfestigkeitsprüfung sowie die Ermittlung des Elastizitätsmoduls muss die Ebenheit der Lasteintragungsflächen gewährleistet sein. Angesichts der Tatsache, dass in den Lehmregeln das Abgleichen der Prüfkörper aus Stampflehm nicht vorgesehen ist, erfolgte die Bewertung der zulässigen Abweichung der Ebenheit in Anlehnung an DIN EN 12390-1 [N 3]. Die Wahl des Ausgleichsmaterials sowie die Rahmenbedingungen für die Konditionierung nach dem Abgleichen werden aus DIN EN 18945 [N 1] entnommen.

Zum Abgleichen der Druckflächen wurde Stuckgips der Firma KNAUF GIPS KG mit einer Druckfestigkeit von $\geq 7,0 \text{ N/mm}^2$ verwendet. Die Ausgleichsschichten wurden, wie in DIN 18945 [N 1] vorgegeben, nicht dicker als 5 mm ausgebildet. Im Anschluss an das Abgleichen, wurden die zylindrischen Prüfkörper im Klimaschrank mind. 72 h bei 23°C / 50% r. F. und die Würfel bei 23°C / 80% r. F. konditioniert.

4.2 Untersuchung der Rohdichte an Kleinprüfkörpern

Die Bestimmung der Rohdichte erfolgte nach dem Erreichen der Massekonstanz. Die geometrische Abmessung der Prüfkörper wurde nach DIN 18945 [N 1] mit einem Messschieber und einer Ablesbarkeit von 0,1 mm durchgeführt. Die Messmodelle für die Erfassung der Maße sind aus dem Bild A 4 zu entnehmen. Zur Ermittlung des Gewichts wurde eine Präzisionswaage mit einer Genauigkeit von 0,1 g verwendet. Im Anhang befinden sich die Kalibrierungsnachweise für den Messschieber und die Waagen.

4.3 Untersuchung der Gleichgewichtsfeuchte

Zur Bestimmung der Gleichgewichtsfeuchte von Würfel und Zylinder, wurden Segmente der Prüfkörper im Außen- sowie Kernbereich unmittelbar im Anschluss an die mechanischen Prüfungen entnommen und der Feuchtegehalt über die gravimetrische Messung bestimmt. Es wurden zwei Proben aus dem Außenbereich und eine Probe aus dem Kernbereich entnommen, s. Bild A 5. Die Proben wiesen eine Dicke von 20 bis 30 mm auf und hatten im Durchschnitt ein Gewicht von 450 g.

4.4 Untersuchung der Druckfestigkeit an Kleinprüfkörpern

Die Ermittlung der Druckfestigkeit der Würfel bei 23°C / 80% r. F. und der Druckfestigkeit der Zylinder bei 23°C / 50% r. F. wurde in Anlehnung an [N 1] und [N 4] durchgeführt.

Die einzelnen Prüfkörper wurden erst unmittelbar vor der Festigkeitsprüfung aus dem Klimaschrank entnommen. Geprüft wurde kraftgesteuert mit einer Druckprüfmaschine des Typs SWP4000VE vom Hersteller FORM + TEST PRÜFSYSTEME. Die Belastungsgeschwindigkeit war so gewählt, dass der Bruch innerhalb von 30 bis 90 Sekunden eingetreten ist, [N 1]. Basierend auf Erfahrungswerten wurde die Belastungsgeschwindigkeit bei den Würfeln auf 0,06 N/mm²/s und bei den Zylindern auf 0,05 N/mm²/s festgelegt. In Anlehnung an DIN EN 12390-3 [N 4] wurde die Ausgangsbelastung annähernd der Belastungsgeschwindigkeit gewählt und betrug bei den Würfeln 0,06 N/mm² und bei den Zylindern 0,05 N/mm². Die automatische Brucherkenkung der Prüfmaschine lag bei 1%.

Der Kalibrierungsnachweis der Prüfmaschine ist im Anhang beigefügt.

4.5 Untersuchung des Elastizitätsmoduls an Kleinprüfkörpern

Das statische Elastizitätsmodul wurde anhand zehn zylindrischer Prüfkörper mit einer Höhe von 300 mm und einem Durchmesser von 150 mm ermittelt. Die Versuchsdurchführung orientierte sich im Wesentlichen an dem Prüfverfahren von Festbeton [N 5], dem der Lehmsteine [N 1] sowie Angaben der Fachliteratur [L 2].

Im Vorfeld der E-Modul Prüfung wurden zwei zylindrische Prüfkörper einer Druckfestigkeitsprüfung unterzogen. Die dabei ermittelte Druckfestigkeit diente zur Festlegung der Spannungswerte für die Prüfzyklen. Die obere Prüfspannung σ_o wurde nach DIN EN 12390-13 [N 5] mit einem Drittel der Druckfestigkeit festgelegt und betrug 0,9 N/mm². Die untere Prüfspannung σ_u wurde auf etwa 10% der zu erwartenden Druckfestigkeit angesetzt und betrug 0,3 N/mm². Um den Einfluss der plastischen Verformung zu reduzieren, erfolgte die Ermittlung des E-Moduls nach dem 10. Belastungszyklus. Die Haltedauer der oberen sowie unteren Spannung im letzten Belastungszyklus wurde nach DIN EN 12390-13 [N 5] auf 20 s festgelegt.

Die Dehnungsmessung wurde mit einem Dehnungsaufnehmer des Fabrikats HBM Typ DD1 mit einem Bereich von $\pm 2,5$ mm und einer Genauigkeitsklasse 0,1 durchgeführt. Die Messtechnik wurde im mittleren Drittel der Zylinderprobe angebracht, s. Bild A 6. Geprüft wurde kraftgesteuert mit einer Be- und Entlastungsgeschwindigkeit von $0,05$ N/mm²/s.

5 Untersuchungsergebnisse

5.1 Ergebnisse der Rohdichteuntersuchungen an Kleinprüfkörpern

Die Serie der hergestellten Prüfkörper zeigen im Hinblick auf die Rohdichte eine Gleichmäßigkeit auf, s. Tabelle 1 und Tabelle 2. Sowohl bei den Würfeln als auch bei den Zylindern beträgt der Variationskoeffizient lediglich 1%. Die erzielte Rohdichte bei den Würfeln beträgt im Mittel 2.143 kg/m³, bei den Zylindern 2.178 kg/m³.

Tabelle 1: Rohdichte Würfel bei 23°C / 80% r. F.

Würfel Nr.	Seite A	Seite B	Höhe	Masse	Rohdichte
	mm	mm	mm	g	kg/m ³
1	201,0	200,0	200,4	17.239	2.140
2	199,8	199,0	201,2	17.348	2.170
3	198,5	200,6	200,8	17.165	2.147
4	200,6	201,4	201,0	17.347	2.137
5	200,5	200,2	199,4	16.931	2.116
6	200,4	200,3	197,6	16.862	2.128
7	200,3	200,1	198,6	16.944	2.129
8	200,4	199,3	199,6	17.195	2.158
9	200,0	200,6	199,6	17.142	2.142
10	201,3	199,3	201,4	17.486	2.165
Mittelwert					2.143
Standartabweichung					17
Variationskoeffizient					1 %

Tabelle 2: Rohdichte Zylinder bei 23°C / 50% r. F.

Zylinder Nr.	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte
	mm	mm	g	kg/m ³
5	295,0	149,8	11.280	2.170
6	295,3	149,5	11.392	2.200
7	295,7	149,8	11.229	2.156
8	295,0	149,9	11.208	2.154
9	295,4	149,9	11.439	2.194
10	296,9	149,5	11.430	2.194
12	297,4	149,9	11.524	2.197
13	295,3	148,9	11.215	2.183
14	297,1	149,9	11.623	2.217
16	297,9	149,8	11.504	2.193
Mittelwert				2186
Standartabweichung				20
Variationskoeffizient				1 %

5.2 Ergebnisse der Gleichgewichtsfeuchte

Die Gleichgewichtsfeuchte bei den Zylindern war nach vier Wochen und bei den Würfeln nach sechs Wochen erreicht.

Aus den Diagrammen in Bild 1 und Bild 2 wird ersichtlich, dass nach dem Erreichen der Massekonstanz, die Feuchteverteilung in den jeweiligen Prüfkörpern inhomogen ist. Bedingt durch die Geometrie des Prüfkörpers ist die Divergenz des Feuchtegehalts im Außen- und Kernbereich bei den Würfeln stärker ausgeprägt als bei den Zylindern.

Wie zu erwarten, führte die Konditionierung der Prüfkörper bei 23°C / 80°C r. F. zur einer höheren Gleichgewichtsfeuchte. Im Vergleich zu den zylindrischen Prüfkörpern, welche im Schnitt eine Gleichgewichtsfeuchte von 1,1 M.-% aufweisen, ist bei den Würfeln ein durchschnittlicher Feuchtegehalt von 1,9 M.-% festzustellen.

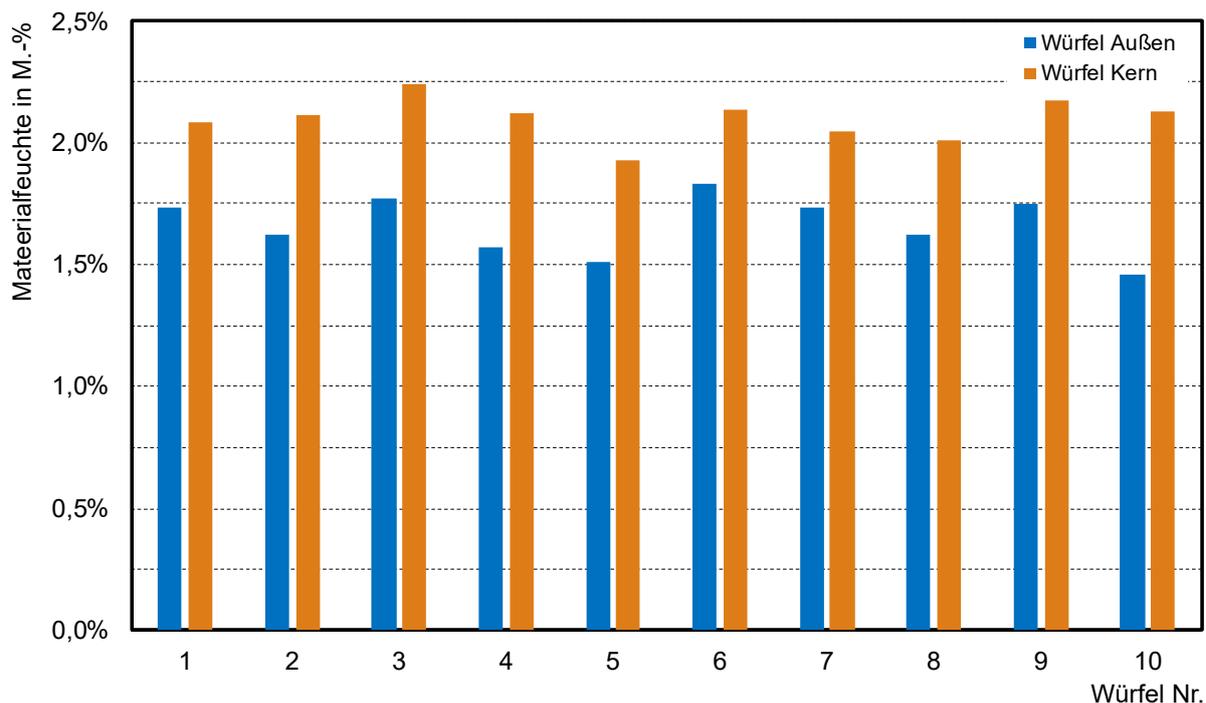


Bild 1: Gleichgewichtsfeuchte Würfel bei 23°C / 80% r. F.

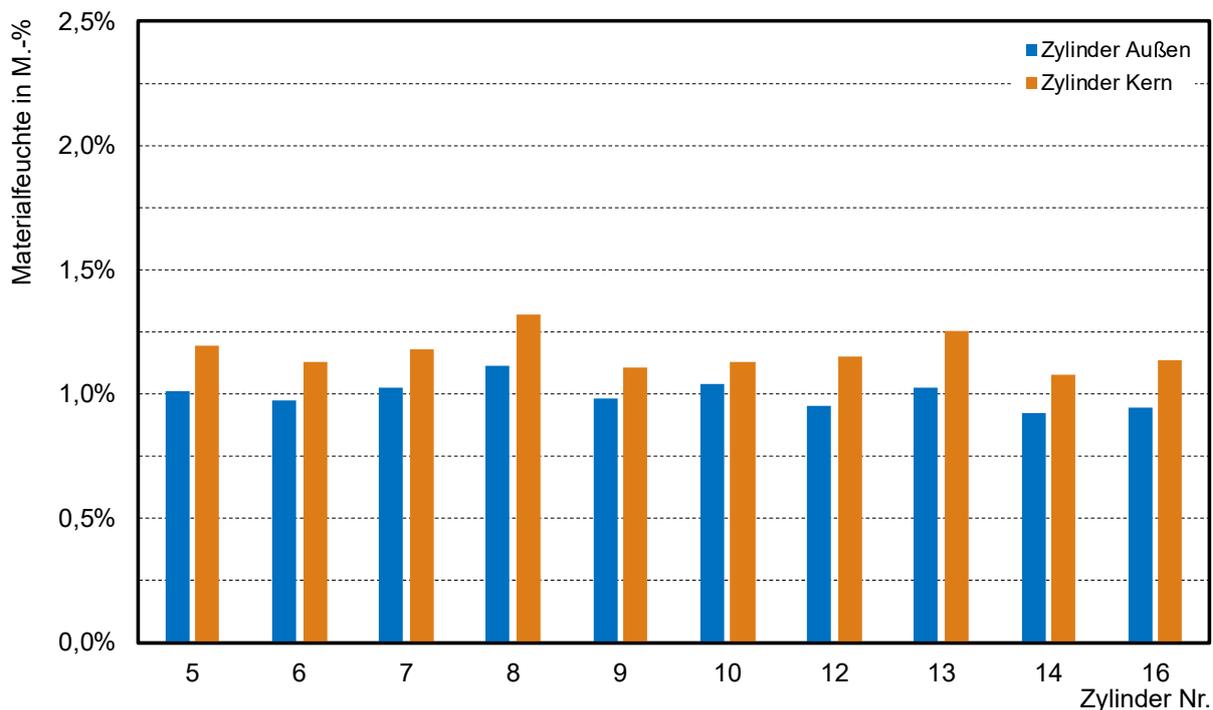


Bild 2: Gleichgewichtsfeuchte Zylinder bei 23°C / 50% r. F.

5.3 Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen an Kleinprüfkörpern

Die im Zuge der Untersuchungen ermittelte Würfeldruckfestigkeit bei 23°C / 80% r. F. liegt im Mittel bei 2,75 N/mm², s. Tabelle 3. Mit der gleichartigen Stampflehmischung aus dem CONLUTO Werk wurde im Rahmen mehrerer Prüfungen [U 1] eine mittlere Würfeldruckfestigkeit von 3,11 N/mm² erzielt. Hierbei erfolgte die Konditionierung der Prüfkörper bei Normklima (23°C / 50% r. F.) Anhand der Ergebnisse wird die Beziehung zwischen erhöhter Luftfeuchte und der Druckfestigkeit einer Stampflehmischung erkennbar.

Die statistische Bestimmung der charakteristischen Druckfestigkeit erfolgt nach DIN EN 1990:2021-10 Anhang D7 [N 6] und wird als 5%-Quantil definiert. Der k_n -Wert in der Tabelle 3 wurde basierend auf der Annahme, dass der Variationskoeffizient V_x der Grundgesamtheit unbekannt ist, gewählt. Darüber hinaus beruht die angegebene char. Druckfestigkeit auf der Annahme, dass es sich um eine Normalverteilung handelt. Ergebnisse der char. Druckfestigkeit bei Anwendung der lognormalen Verteilung unterscheiden sich nur geringfügig und sind Tabelle A 2 bis Tabelle A 3 zu entnehmen.

Tabelle 3: charakteristischen Druckfestigkeiten nach DIN EN 1990:2021-10

Prüfkörper	Anzahl	Schlankheit	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	5%-Quantilfaktor	char. Druckfestigkeit 5%-Quantil
		λ	m_x	s_x	V_x	k_n^*	$X_{k(n)}$
		-	N/mm ²	N/mm ²	-	-	N/mm ²
Würfel (23°C/80% r. F.)	10	1	2,75	0,17	0,06	1,92	2,42
Würfel ¹ (23°C/50% r. F.)	21	1	3,47	0,55	0,16	1,77	2,51
Zylinder (23°C/50% r. F.)	10	2	2,49	0,20	0,08	1,92	2,10

*mit V_x unbekannt [N 6]

5.4 Ergebnisse der Prüfung des Elastizitätsmoduls an Kleinprüfkörpern

Das Elastizitätsmodul des Prüfkörpers Nr. 8 konnte im Rahmen der Versuchsdurchführung nicht bestimmt werden. Die Ergebnisse der geprüften Zylinder betragen im Mittel 2.901N/mm² und einer Standardabweichung von 670 N/mm², s. Tabelle 4. Die Spannungs-Dehnungs-Diagramme sind der Anlage, Bild A 7 bis Bild A 16, zu entnehmen.

¹ Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung, SCHOMBERG GMBH & CO. KG [U 1]

Tabelle 4: E-Modul Zylinder

Zylinder Nr.	Rohdichte (23°C / 50% r. F.)	Druckfestigkeit	E-Modul
	kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²
5	2.170	2,22	1.906
6	2.200	2,41	2.646
7	2.156	2,66	3.116
8	2.154	2,30	n. b.
9	2.194	2,51	2.178
10	2.194	2,52	3.076
12	2.197	2,35	3.023
13	2.183	2,45	2.524
14	2.217	2,61	4.032
16	2.193	2,92	3.612
Mittelwert	2.185	2,50	2.901
Standartabweichung	20	0,20	670
Variationskoeffizient	1 %	8 %	23 %

6 Zusammenfassung und Vergleichswerte

6.1 Überblick

Im Folgenden werden die im Zuge der Untersuchungen erzielten Materialparameter mit den Angaben aus den Lehmregeln [L 1] verglichen. Darüber hinaus werden die Ergebnisse der Masterthesis von RELISHKIS (2001) [U 3] und HOF SCHLAG (2009) [U 4] für die Gegenüberstellung herangezogen. Im Rahmen beider Masterarbeiten bildete die Stampflehmischung aus dem CONLUTO WERK die Grundlage für die mechanischen Materialuntersuchungen.

6.2 Rohdichte

Die erzielten Rohdichten bei den zylindrischen und quadratischen Prüfkörpern liegen in der Mitte des angegebenen Wertebereichs (1.700 – 2.400 kg/m³) der Lehmregeln [L 1]. Verglichen mit den Werten der Masterarbeiten, sind die Rohdichten geringfügig geringer, s. Tabelle 5 und Tabelle 6.

Tabelle 5: Vergleichswerte Rohdichte Würfel

Institution/Quelle	Anzahl Prüfkörper	Rohdichte	Variationskoeffizient
		kg/m ³	
CONLUTO / IFMB (2021)	31	2.159	1 %
RELISHKIS (2021)	22	2.215	1 %
HOFSCHLAG (2009)	15	2.192	0,4 %

Tabelle 6: Vergleichswerte Rohdichte Zylinder

Institution/Quelle	Anzahl Prüfkörper	Rohdichte	Variationskoeffizient
		kg/m ³	
CONLUTO / IFMB (2021)	10	2.186	1 %
RELISHKIS (2021)	12	2.215	0,3 %
HOFSCHLAG (2009)	15	2.252	1 %

6.3 Druckfestigkeit

In den Lehmregeln [L 1] werden für Stampflehm mit mineralischem Zuschlag und einer Rohdichte von 2.000 – 2.200 kg/m³ Erfahrungswerte von 3 – 5 N/mm² angegeben. Die Werte geben die Bezugsfestigkeit bei Normklima von 23°C und 50% r. F. an.

Die Würfeldruckfestigkeiten von CONLUTO in der Tabelle 7 beziehen sich auf die Untersuchungsergebnisse der Prüfanstalt SCHOMBURG GMBH [U 1]. Die erzielten Würfel- sowie Zylinderdruckfestigkeiten fallen im Vergleich zu den Ergebnissen der Masterarbeiten geringer aus, s. Tabelle 7 und Tabelle 8. Die Unterschiede der Trockendruckfestigkeiten sind zum Teil auf die Verdichtungsarbeit und somit auf die Rohdichte zurückzuführen, aber auch andere Einflussgrößen könnten die Materialfestigkeit bestimmen. Hierzu zählen die Kornverteilung, Quantität und Qualität der Tonminerale und der sich daraus ergebenden Bindekraft sowie Aufbereitung der Stampflehmischung, die Einbaufeuchte und die Trocknungsbedingungen.

Tabelle 7: Mittelwerte der Würfeldruckfestigkeit bei 23°C / 50% r. F.

Institution/Quelle	Anzahl	Rohdichte (MW)	Druckfestigkeit (MW)	
		kg/m ³	N/mm ²	Variationskoeffizient
CONLUTO / IfMB ² (2021)	21	2.166	3,47	16 %
RELISHKIS (2021)	22	2.215	4,48	7 %
HOFSCHLAG (2009)	15	2.192	3,96	8 %

² Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung, Schomberg GmbH & Co. KG [U 1]

Tabelle 8: Mittelwerte der Zylinderdruckfestigkeit bei 23°C / 50% r. F.

Institution/Quelle	Anzahl	Rohdichte (MW)	Druckfestigkeit (MW)	
		kg/m ³	N/mm ²	Variationskoeffizient
CONLUTO / IfMB (2021)	10	2.186	2,49	8 %
RELISHKIS (2021)	11	2.214	2,87	5 %
HOF SCHLAG (2009)	15	2.252	2,69	6 %

6.4 Elastizitätsmodul

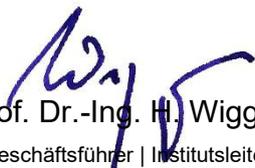
In den Lehmbau Regeln [L 1] werden hinsichtlich des Elastizitätsmoduls von tragenden Stampflehmwänden keine Mindestanforderungen genannt. Einen Anhaltspunkt bietet die Norm für Lehmsteine [N 1]. Diese besagt, dass für tragend eingesetzte Lehmsteine ein Elastizitätsmodul von mindestens 750 N/mm² erreicht werden soll.

Das ermittelte E-Modul von 2901 N/mm² ist im Vergleich zu den Werten aus den Masterarbeiten geringer, s. Tabelle 9. Darüber hinaus ist die Schwankungsbreite der Ergebnisse, mit einem Variationskoeffizienten von 23 % vergleichsweise hoch.

Tabelle 9: Mittelwerte der Elastizitätsmodulen

Institution/Quelle	Anzahl	Elastizitätsmodul (MW)	Variationskoeffizient (MW)
		N/mm ²	
CONLUTO / IfMB (2021)	9	2.901	23 %
RELISHKIS (2021)	11	3.785	13 %
HOF SCHLAG (2009)	15	3.184	6 %

Oldenburg, den 14.03.2023


 Prof. Dr.-Ing. H. Wigger
 (Geschäftsführer | Institutsleiter)


 Artur Relishkis, M.Eng.
 (Sachbearbeiter)

7 Anlagen A

7.1 Bilder

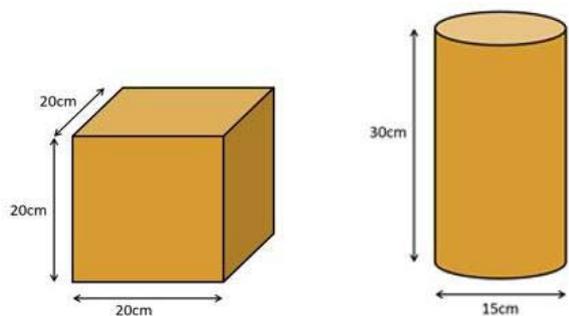


Bild A 1: Prüfkörper



Bild A 2: Schalungsformen

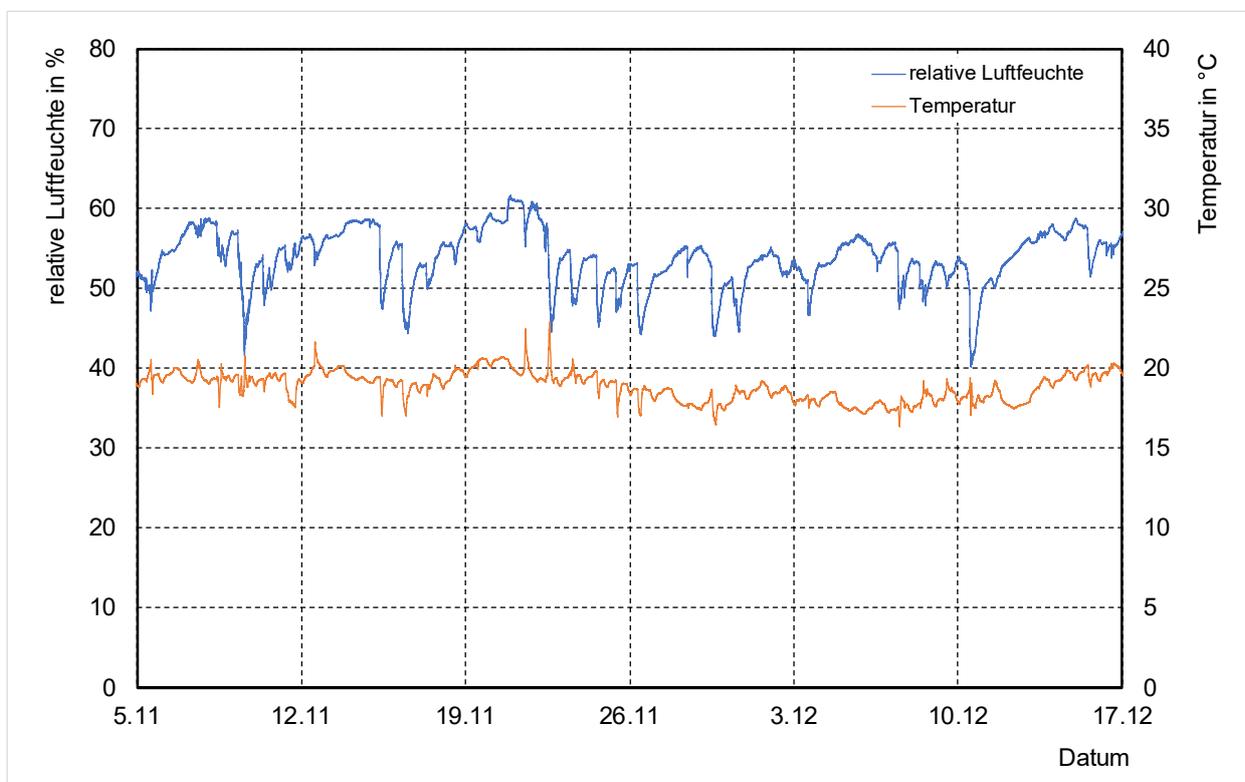


Bild A 3: Klimadaten

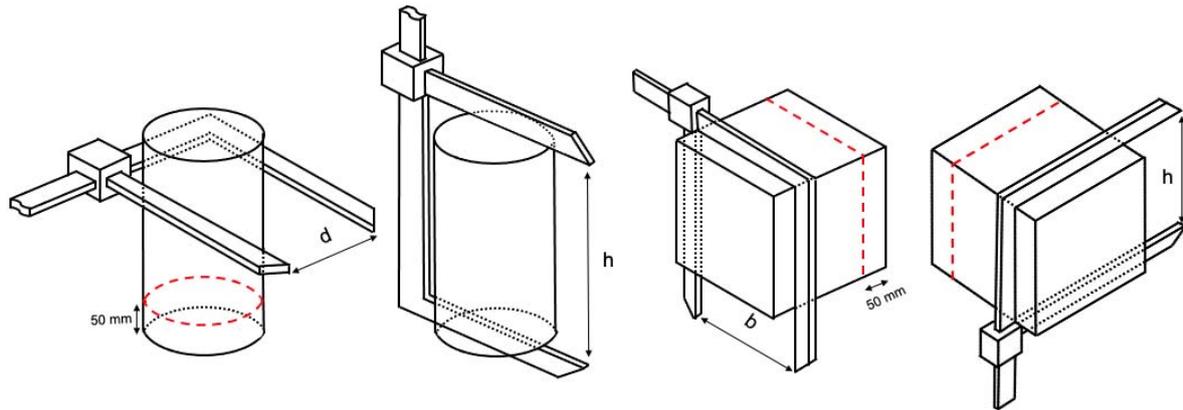


Bild A 4: Messmodelle für Zylinder und Würfel

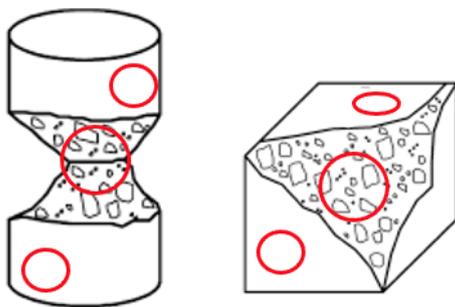


Bild A 5: Probeentnahme Zylinder und Würfel



Bild A 6: Versuchsaufbau E-Modulprüfung

7.2 Ergebnisse der Untersuchungen

7.2.1 Bestimmung charakteristischer Druckeigenschaften

Tabelle A 1: Bestimmung der char. Würfeldruckfestigkeit bei 23°C / 50 r. F.

Würfel Nr.	l	b	h	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit $f_{st,i}$	$\ln(f_{st,i})$
	mm	mm	mm	g	kg/m ³	KN	N/mm ²	N/mm ²
1.1	200,0	201,0	202,0	17547	2161	129,0	3,21	1,17
1.2	200,0	201,0	201,0	17696	2190	156,0	3,88	1,36
1.3	200,0	200,0	202,0	17660	2186	166,0	4,15	1,42
2.1	199,0	201,0	203,0	17616	2170	157,0	3,94	1,37
2.2	200,0	202,0	203,0	17676	2155	168,0	4,16	1,43
2.3	200,0	202,0	201,0	17522	2158	208,0	5,15	1,64
3.1	201,0	200,0	201,0	17735	2195	144,0	3,58	1,28
3.2	201,0	202,0	202,0	17541	2139	158,0	3,89	1,36
3.3	201,0	201,0	199,0	17353	2158	144,0	3,56	1,27
4.1	200,0	201,0	200,0	17613	2191	124,5	3,10	1,13
4.2	200,0	200,0	199,0	17656	2218	125,0	3,13	1,14
4.3	200,0	200,0	201,0	17506	2177	126,0	3,15	1,15
5.1	200,0	201,0	199,0	17501	2188	124,8	3,10	1,13
5.2	200,0	200,0	200,0	17526	2191	124,2	3,11	1,13
5.3	200,0	200,0	200,0	17580	2198	126,6	3,17	1,15
6.1	200,0	201,0	201,0	17157	2123	124,3	3,09	1,13
6.2	200,0	201,0	200,0	17289	2150	126,6	3,15	1,15
6.3	201,0	200,0	200,0	17120	2129	123,8	3,08	1,12
7.1	200,0	201,0	199,0	17078	2135	123,5	3,07	1,12
7.2	200,0	200,0	199,0	17112	2150	124,0	3,10	1,13
7.3	201,0	200,0	200,0	17135	2131	124,6	3,10	1,13
				Mittelwert	2166	Anzahl n	21	21
						Mittelwert m_x	3,47	-
						Standardabweichung s_x	0,55	-
						Variationskoeffizient V_x	0,16	0,12
						Mittelwert m_y	-	1,23
						Standardabweichung s_y	-	0,14
						5%-Quantilfaktor k_n	1,77	1,77
						char. Druckfestigkeit $X_{k(n)}$	2,51	2,67

Tabelle A 2: Bestimmung der char. Würfeldruckfestigkeit bei 23°C / 80% r. F.

Würfel Nr.	l	b	h	Masse	Dichte lufttr.	Bruchlast	Druckfestigkeit $f_{st,i}$	$\ln(f_{st,i})$
	mm	mm	mm	kg	kg/m ³			
1	201,0	200,0	200,4	17239	2140	122,2	3,04	1,11
2	199,8	199,0	201,2	17348	2170	109,4	2,75	1,01
3	198,5	200,6	200,8	17165	2147	102,2	2,57	0,94
4	200,6	201,4	201,0	17347	2137	123,3	3,05	1,12
5	200,5	200,2	199,4	16931	2116	107,6	2,68	0,99
6	200,4	200,3	197,6	16862	2128	109,7	2,73	1,01
7	200,3	200,1	198,6	16944	2129	101,9	2,54	0,93
8	200,4	199,3	199,6	17195	2158	109,7	2,75	1,01
9	200,0	200,6	199,6	17142	2142	107,1	2,67	0,98
10	201,3	199,3	201,4	17485	2165	109,8	2,74	1,01
				Mittelwert	2143	Anzahl n	10	10
						Mittelwert m_x	2,75	-
						Standardabweichung s_x	0,17	-
						Variationskoeffizient V_x	0,06	0,06
						Mittelwert m_y	-	1,01
						Standardabweichung s_y	-	0,06
						5%-Quantilfaktor k_n	1,92	1,92
						char. Druckfestigkeit $X_{k(n)}$	2,42	2,44

Tabelle A 3: Bestimmung der char. Zylinderdruckfestigkeit bei 23°C / 50% r. F.

Zylinder Nr.	h	∅	Masse	Dichte	Bruchlast	Druckfestigkeit $f_{st,i}$	$\ln(f_{st,i})$	
	mm	mm	kg	kg/m ³				KN
5	295,0	149,8	11280	2170	39,1	2,22	0,80	
6	295,3	149,5	11392	2200	42,2	2,40	0,88	
7	295,7	149,8	11229	2156	46,9	2,66	0,98	
8	295,0	149,9	11208	2154	40,5	2,29	0,83	
9	295,4	149,9	11439	2194	44,3	2,51	0,92	
10	296,9	149,5	11430	2194	44,3	2,52	0,93	
12	297,4	149,9	11524	2197	41,5	2,35	0,86	
13	295,3	148,9	11215	2183	42,7	2,45	0,90	
14	297,1	149,9	11623	2217	46,0	2,61	0,96	
16	297,9	149,8	11504	2193	51,5	2,92	1,07	
				Mittelwert	2186	Anzahl n	10	10
						Mittelwert m_x	2,49	-
						Standardabweichung s_x	0,20	-
						Variationskoeffizient V_x	0,08	0,09
						Mittelwert m_y	-	0,91
						Standardabweichung s_y	-	0,08
						5%-Quantilfaktor k_n	1,92	1,92
						char. Druckfestigkeit $X_{k(n)}$	2,10	2,13

7.2.2 Spannungs-Dehnungs-Diagramme Zylinder

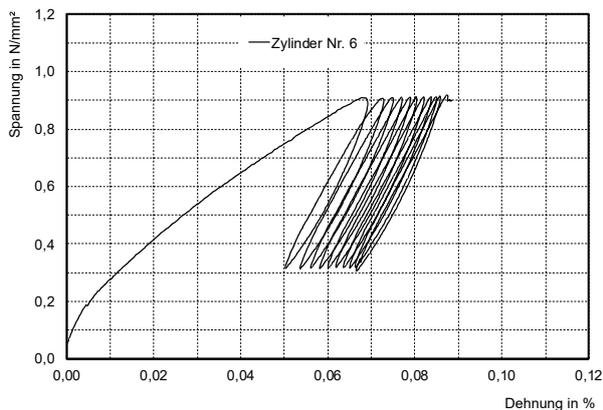


Bild A 7: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Zylinder Nr. 5

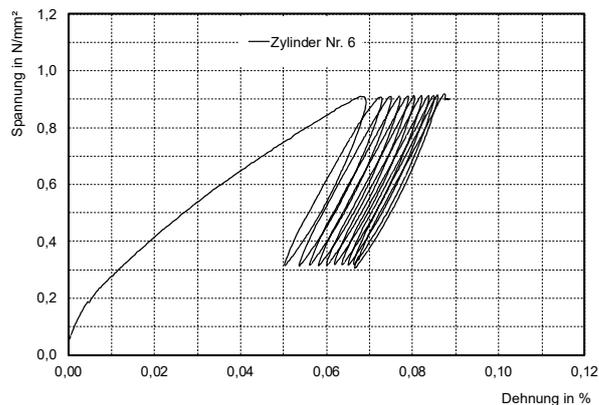


Bild A 8: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Zylinder Nr. 6

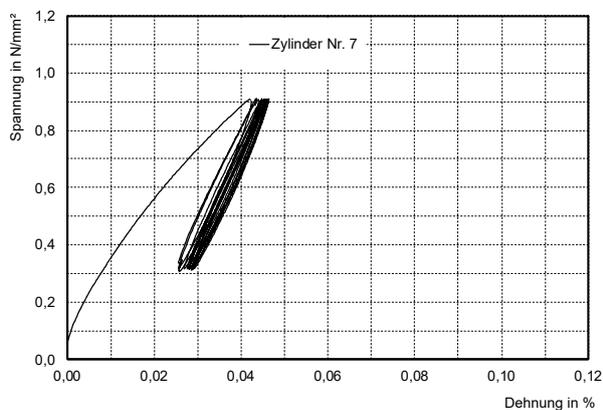


Bild A 9: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Zylinder Nr. 7

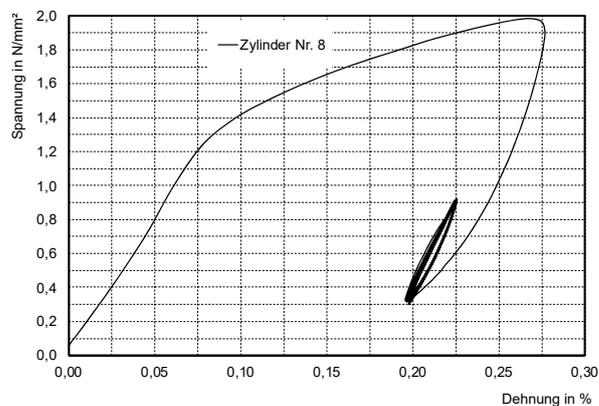


Bild A 10: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Zylinder Nr. 8

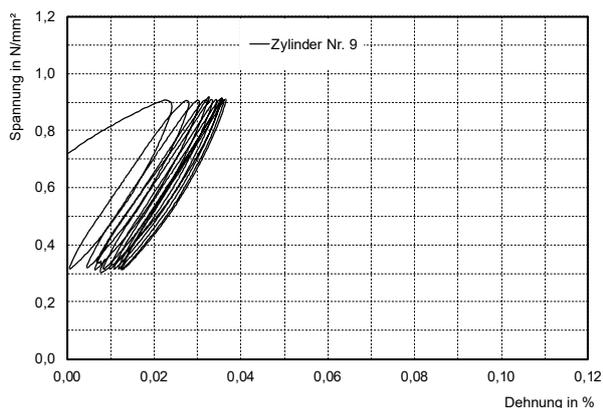


Bild A 11: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Zylinder Nr. 9

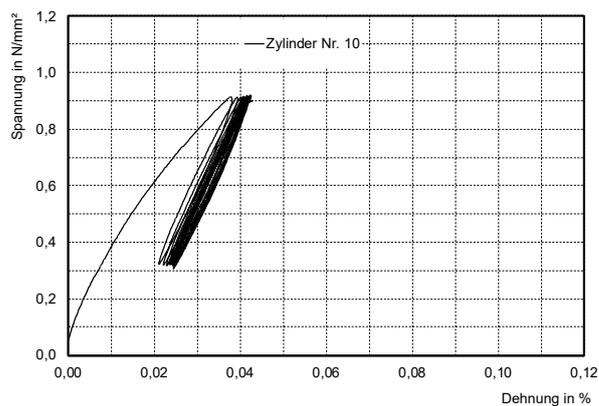


Bild A 12: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Zylinder Nr. 10

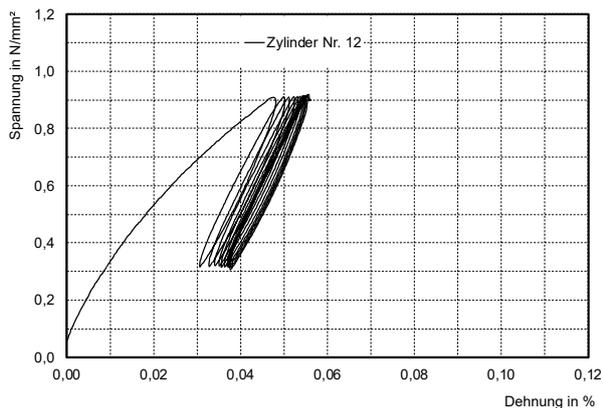


Bild A 13: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Zylinder Nr. 12

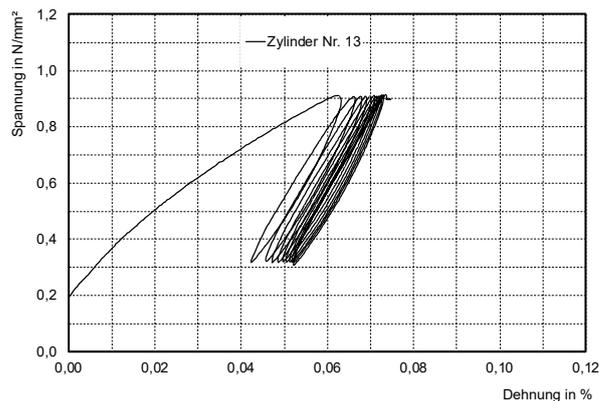


Bild A 14: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Zylinder Nr. 13

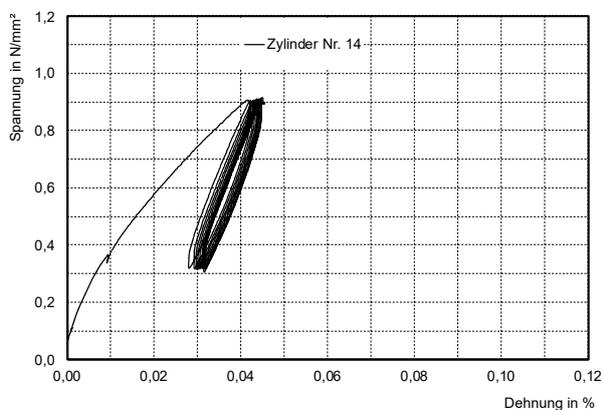


Bild A 15: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Zylinder Nr. 14

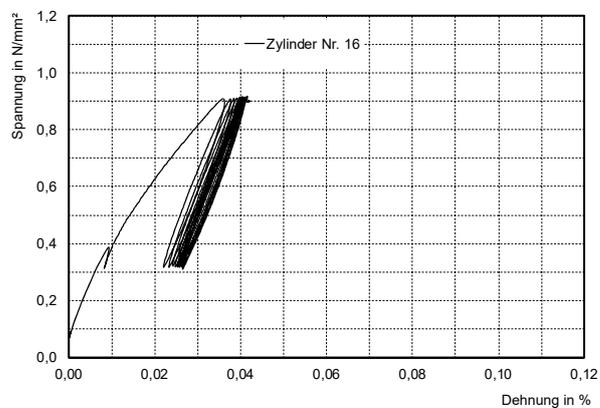


Bild A 16: Spannungs-Dehnungs-Diagramm Zylinder Nr. 14

8 Anlage B

8.1 Prüfprotokolle Würfeldruckfestigkeiten Schomburg GmbH & Co. KG

<h1 style="text-align: center;">Schomburg GmbH & Co. KG</h1> <p style="text-align: center;">Zentrale Anwendungstechnik, Betonprüfstelle E u W, Baustofflabor D – 32760 Detmold, Aquafinstr. 2-8 - Tel. 05231 / 953-247</p> <h2 style="text-align: center;">Prüfprotokoll 01-21</h2>							
Antragsteller:		Conluto - Vielfalt aus Lehm					
Menge und Art der Prüfkörper:		3 Würfel					
Herstelltag:	17.05.2021	Prüftag:	15.07.2021	Prüfalter:	59 Tage		
Rezepturnummer:	Lehmwürfel						
Probebezeichnung:	1.1-1.3						
Prüfergebnisse:							
Probenummer	Länge mm	Breite mm	Höhe mm	Gewicht kg	Rohdichte kg/dm ³	Bruchlast KN	Druckfestigkeit N/mm ²
1.1	200	201	202	17,547	2,161	129	3,21
1.2	200	201	201	17,696	2,190	156	3,88
1.3	200	200	202	17,660	2,186	166	4,15
Mittelwert	200	201	202	17,634	2,179		3,75
Bemerkung: <div style="text-align: right; margin-top: 20px;">  SCHOMBURG GmbH & Co. KG Betonprüfstelle E & W Aquafinstr. 2-8 D-32760 Detmold Telefon: 05231 953-247 Fax: 05231 953-247 Schomburg GmbH & Co. KG Prüfstellenleiter www.schomburg.de </div>							
Detmold, 15.07.2021							
Ort, Datum							

Schomburg GmbH & Co. KG

Zentrale Anwendungstechnik, **Betonprüfstelle E u W**, Baustofflabor

D – 32760 Detmold, Aquafinstr. 2-8 - Tel. 05231 / 953-247

Prüfprotokoll 02-21

Antragsteller: Conluto - Vielfalt aus Lehm

Menge und Art der Prüfkörper: 3 Würfel

Herstelltag: 17.05.2021 **Prüftag:** 15.07.2021 **Prüfalter:** 59 Tage

Rezepturnummer: Lehmwürfel

Probebezeichnung: 2.1-2.3

Prüfergebnisse:

Probenummer	Länge mm	Breite mm	Höhe mm	Gewicht kg	Rohdichte kg/dm ³	Bruchlast KN	Druckfestigkeit N/mm ²
2.1	199	201	203	17,616	2,170	157	3,94
2.2	200	202	203	17,676	2,155	168	4,16
2.3	200	202	201	17,522	2,158	208	5,15
Mittelwert	200	202	202	17,605	2,161		4,42

Bemerkung:

Detmold, 15.07.2021
Ort, Datum

SCHOMBURG GmbH & Co. KG
Betonprüfstelle E & W
Aquafinstraße 2-8
D-32760 Detmold
Telefon +49-5231-953-247
Fax +49-5231-953-247
www.schomburg.de
Prüfstellenleiter

Schomburg GmbH & Co. KG

Zentrale Anwendungstechnik, **Betonprüfstelle E u W**, Baustofflabor
D – 32760 Detmold, Aquafinstr. 2-8 - Tel. 05231 / 953-247

Prüfprotokoll 03-21

Antragsteller: Conluto - Vielfalt aus Lehm

Menge und Art der Prüfkörper: 3 Würfel

Herstelltag: 17.05.2021 **Prüftag:** 15.07.2021 **Prüfalter:** 59 Tage

Rezepturnummer: Lehmwürfel

Probebezeichnung: 3.1-3.3

Prüfergebnisse:

Probenummer	Länge mm	Breite mm	Höhe mm	Gewicht kg	Rohdichte kg/dm ³	Bruchlast KN	Druckfestigkeit N/mm ²
3.1	201	200	201	17,735	2,195	144	3,58
3.2	201	202	202	17,541	2,139	158	3,89
3.3	201	201	199	17,353	2,158	144	3,56
Mittelwert	201	201	201	17,543	2,164		3,68

Bemerkung:

Detmold, 15.07.2021
Ort, Datum

SCHOMBURG GmbH & Co. KG
Betonprüfstelle E & W
Aquafinstraße 2-8
D-32760 Detmold
Telefon +49-5231-953-247
Fax +49-5231-953-8227
www.schomburg.de
Schomburg GmbH & Co. KG
Prüfstellenleiter

<h1>Schomburg GmbH & Co. KG</h1> <p>Zentrale Anwendungstechnik, zert. Betonprüfstelle, Baustofflabor D – 32760 Detmold, Aquafinstr. 2-8 - Tel. 05231 / 953-247</p> <h2>Prüfprotokoll 04-21</h2>							
Antragsteller:		Conluto - Vielfalt aus Lehm					
Menge und Art der Prüfkörper:		3 Würfel					
Herstelltag:	13.07.2021	Prüftag:	07.09.2021	Prüfalter:	56 Tage		
Rezepturnummer:	Lehmwürfel						
Probebezeichnung:	1.1-1.3						
Prüfergebnisse:							
Probennummer	Länge mm	Breite mm	Höhe mm	Gewicht kg	Rohdichte kg/dm ³	Bruchlast KN	Druckfestigkeit N/mm ²
1.1	200	201	200	17,613	2,191	124,5	3,10
1.2	200	200	199	17,656	2,218	125,0	3,13
1.3	200	200	201	17,506	2,177	126,0	3,15
Mittelwert	200	200	200	17,592	2,195		3,12
<p>Bemerkung:</p>							
<p>Detmold, 07.09.2021 Ort, Datum</p>				<p>SCHOMBURG GmbH & Co. KG Betonprüfstelle E & W Aquafinstr. 2-8 D-32760 Detmold Telefon +49 5231 953-247 Fax +49 5231 953-247 Schomburg GmbH & Co. KG Prüfstellenleiter</p>			

Schomburg GmbH & Co. KG

Zentrale Anwendungstechnik, zert. Betonprüfstelle, Baustofflabor
D – 32760 Detmold, Aquafinstr. 2-8 - Tel. 05231 / 953-247

Prüfprotokoll 05-21

Antragsteller: Conluto - Vielfalt aus Lehm

Menge und Art der Prüfkörper: 3 Würfel

Herstelltag: 13.07.2021 **Prüftag:** 07.09.2021 **Prüfalter:** 56 Tage

Rezepturnummer: Lehmwürfel

Probebezeichnung: 2.1-2.3

Prüfergebnisse:

Probenummer	Länge mm	Breite mm	Höhe mm	Gewicht kg	Rohdichte kg/dm ³	Bruchlast KN	Druckfestigkeit N/mm ²
2.1	200	201	199	17,501	2,188	124,8	3,10
2.2	200	200	200	17,526	2,191	124,2	3,11
2.3	200	200	200	17,580	2,198	126,6	3,17
Mittelwert	200	200	200	17,536	2,192		3,12

Bemerkung:

Detmold, 07.09.2021
Ort, Datum

SCHOMBURG GmbH & Co. KG
Betonprüfstelle E & W
Aquafinstraße 2-8
D-32760 Detmold
Telefon +49 5231 953-247
Fax +49 5231 953-247
Thomas Beyer
Schomburg GmbH & Co. KG
Prüfstellenleiter

Schomburg GmbH & Co. KG

Zentrale Anwendungstechnik, zert. Betonprüfstelle, Baustofflabor
D – 32760 Detmold, Aquafinstr. 2-8 - Tel. 05231 / 953-247

Prüfprotokoll 06-21

Antragsteller: Conluto - Vielfalt aus Lehm

Menge und Art der Prüfkörper: 3 Würfel

Herstelltag: 13.07.2021 **Prüftag:** 07.09.2021 **Prüfalter:** 56 Tage

Rezepturnummer: Lehmwürfel

Probebezeichnung: 3.1-3.3

Prüfergebnisse:

Probennummer	Länge mm	Breite mm	Höhe mm	Gewicht kg	Rohdichte kg/dm ³	Bruchlast KN	Druckfestigkeit N/mm ²
3.1	200	201	201	17,157	2,123	124,3	3,09
3.2	200	201	200	17,289	2,150	126,6	3,15
3.3	201	200	200	17,120	2,129	123,8	3,08
Mittelwert	200	201	200	17,189	2,134		3,11

Bemerkung:

Detmold, 07.09.2021
Ort, Datum

SCHOMBURG GmbH & Co. KG
Betonprüfstelle E & W
Aquafinstr. 2-8
D-32760 Detmold
Telefon +49 5231 953-247
www.schomburg.de
Prüfstelle

Schomburg GmbH & Co. KG

Zentrale Anwendungstechnik, zert. Betonprüfstelle, Baustofflabor
D – 32760 Detmold, Aquafinstr. 2-8 - Tel. 05231 / 953-247

Prüfprotokoll 07-21

Antragsteller: Conluto - Vielfalt aus Lehm

Menge und Art der Prüfkörper: 3 Würfel

Herstelltag: 13.07.2021 **Prüftag:** 07.09.2021 **Prüfalter:** 56 Tage

Rezepturnummer: Lehmwürfel

Probebezeichnung: 4.1-4.3

Prüfergebnisse:

Probennummer	Länge mm	Breite mm	Höhe mm	Gewicht kg	Rohdichte kg/dm ³	Bruchlast KN	Druckfestigkeit N/mm ²
4.1	200	201	199	17,078	2,135	123,5	3,07
4.2	200	200	199	17,112	2,150	124,0	3,10
4.3	201	200	200	17,135	2,131	124,6	3,10
Mittelwert	200	200	199	17,108	2,139		3,09

Bemerkung:

SCHOMBURG GmbH & Co. KG
 Betonprüfstelle E & W
 Aquafinstr. 2-8
 D-32760 Detmold
 Telefon +49 5231 953-247
 Fax +49 5231 953-247
 www.schomburg.de

Detmold, 07.09.2021
 Ort, Datum

Thomas Beyer
 Prüfstellenleiter

8.2 Kalibrierschein Waage



**Waagen-
prüfprotokoll**

**waagen
dammaschke
gmbh**



Hersteller: Kern		
Waagertyp: 572-39		
Höchstlast: 4200g	Teilung: 0,01g	
Serien-Nr.: W1707897		
Inv.Nr.:	Prüfmittelnr.:	
Aufstellort:		
Geleitet bis: nicht geleitet		
Prüfintervall: jährlich	Nächste Prüfung: 06 / 2023	

Grund für die Ausstellung des Waagenprüfprotokolls:

<input type="checkbox"/> Neuaufstellung	<input type="checkbox"/> Reparatur
<input checked="" type="checkbox"/> Prüfmittelüberwachung nach DIN ISO 9000 incl. Wartung	

DKD Kalibrierschein Nr.: 122730 Klasse: E2 geprüft bis: 1.11.2021

Linearität:

Prüflast	Anzeige	zul. Toleranz	Abweichung
500 g	499,99 g		- 0,01 g
1000 g	1000,00 g		0,00 g
2000 g	2000,00 g		0,00 g
3000 g	3000,01 g		+0,01 g
4000 g	4000,03 g		+0,03 g

Prüfgewichte nacheinander bis zur Max-Last auflegen

Ecklastprüfung: Ecklastprüfgewicht: 1000 g Zul. Toleranz:

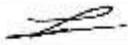
2	3		Position	1 (V)	2 (L)	3 (ll)	4 (R)	M
1	4		Abweichung	+0,02 g	- 0,01 g	- 0,04 g	+0,01 g	0,00 g

Nur für Labor-Waagen

<p>Reproduzierbarkeit:</p> <p>Waage mit Gewichtsstück 5mal mittig belasten.</p>	<p>Prüflast: 2000 g</p> <p>Zul. Toleranz:</p>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th>Anzeige</th> <th>Abweichung</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1:</td> <td>2000,01 g</td> <td>+0,01 g</td> </tr> <tr> <td>2:</td> <td>2000,01 g</td> <td>+0,01 g</td> </tr> <tr> <td>3:</td> <td>2000,00 g</td> <td>0,00 g</td> </tr> <tr> <td>4:</td> <td>1999,99 g</td> <td>- 0,01 g</td> </tr> <tr> <td>5:</td> <td>2000,00 g</td> <td>0,00 g</td> </tr> </tbody> </table>		Anzeige	Abweichung	1:	2000,01 g	+0,01 g	2:	2000,01 g	+0,01 g	3:	2000,00 g	0,00 g	4:	1999,99 g	- 0,01 g	5:	2000,00 g	0,00 g
	Anzeige	Abweichung																		
1:	2000,01 g	+0,01 g																		
2:	2000,01 g	+0,01 g																		
3:	2000,00 g	0,00 g																		
4:	1999,99 g	- 0,01 g																		
5:	2000,00 g	0,00 g																		

Die Prüfwerte entsprechen den Spezifikationen: Ja Nein

Bemerkungen:

D.Seemann	07.06.2021	
Prüfer:	Datum:	Unterschrift:

Krombeerweg 53 26180 Rastede Telefon: 0 44 02 / 5 88 11-0 Fax: 0 44 02 / 5 88 11-39

8.3 Kalibrierschein Druckprüfmaschine



HaBu Hauck Prüftechnik GmbH
Im Weichlingsgarten 20a
67127 Hochdorf - Assenheim

Kalibrierschein / Calibration Certificate

Mitglied im / Member of the

Deutschen Kalibrierdienst 




Deutscher
Akkreditierungsdienst
D-3-17361-01-00

Habu Hauck Prüftechnik GmbH
Im Weichlingsgarten 20a
U 67126 Hochdorf Assenheim

Kalibrierzeichen
Calibration mark

Z1197
D-K- 17344-01-00
2020-08

Gegenstand <small>Object</small>	Druckprüfmaschine für Baustoffe	Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI). Die DAKKS ist Unterzeichner der multilateralen Übereinkommen der European co-operation for Accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine. Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich. This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI). The DAKKS is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of calibration certificates. The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.
Hersteller <small>Manufacturer</small>	Form + Test Prüfsysteme	
Typ <small>Type</small>	SWP4000VE	
Fabrikat/Serien-Nr. <small>Serial number</small>	9647	
Inventar-Nummer <small>Inventory number</small>	1011	
Auftraggeber <small>Customer</small>	Jade Hochschule Zeughausstraße 15 26121 Oldenburg	
Auftragsnummer <small>Order No.</small>	60381/0620	
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines <small>Number of pages of the certificate</small>	4	
Datum der Kalibrierung <small>Date of calibration</small>	2020-06-22	

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unbeeinträchtigt weiterverbreitet werden. Aussage oder Änderungen bedürfen der Genehmigung des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine sind bei Nennung des für die Freigabe Verantwortlichen in Kurschrift auch ohne Unterschrift gültig.
 This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the issuing laboratory. Calibration certificates with the full name of the approval responsible person are valid without signature.

Datum <small>Date</small>	Freigabe des Kalibrierscheins durch <small>Approval by the certificate of calibration</small>	Bearbeiter <small>Person in charge</small>
14.07.2020	H. Hauck 	C. Zimmermann 

HaBu Hauck Prüftechnik GmbH
67126 Hochdorf – Assenheim

Kalibrieren mit know how
info@habu-prueftechnik.de

Fon: 06231 / 4031-77
Fax: 06231 / 4031-76

Seite 2 von 4
F2,70zum Kalibrierschein vom
*of calibration certificate dated*2020-07-14
V.NR11.19

Z1197
IK- 17344 01 00
2020-06

• Kalibriergegenstand

Zug- Druckprüfmaschine nach DIN EN ISO 7500-1:2018

Baujahr:	1992
Antrieb:	hydr. mit Motorpumpe
Beanspruchung	Flüssigkeitsdruckumwandler

• Konformitätsaussage

Die Druckprüfmaschine für Baustoffe wurde gemäß DIN EN ISO 7500-1:2018 geprüft und kalibriert. Die Messwerte liegen für die aufgeführten Messbereiche innerhalb der normativ vorgegebenen Toleranzen.

Kraftmessbereich	von	bis	Klasse ohne Berücksichtigung der Messunsicherheit
4000 kN Druck	400	4000	1
800 kN Druck	80	800	1

Die Maschine darf in den oben genannten Messbereichen für maßgebliche Versuche verwendet werden.

Die verwendeten Mess-, Kalibriereinrichtungen und Referenzmaterialien sind auf die nationalen Normale rückgeführt.

• Ort der Kalibrierung

Standort: Baustofftechnologie

• Messbedingungen

Temperatur: 23,5°C

Die allgemeinen Bedingungen zur Aufstellung und Funktion der Prüfmaschine wurden nach Norm eingehalten.

Hinweise zur Prüfung und Kalibrierung

Keine

Seite 3 von 4
Pagezum Kalibrierschein vom
of calibration certificate dated2020-07-14
V.NR.11.19Z1197
D-K-
17344 01 00
2020-06

• Messergebnisse

Kalibrierung der Kraftmesseinrichtung

- Beurteilung der Kraftanzeigebereiche und deren Auflösungsvermögen (f)
- Die relative Nullpunktabweichung (f_0) entspricht in den kalibrierten Anzeigebereichen den Anforderungen der jeweils zugelassenen Klasse
- Ermittlung
 1. der relativen Anzeigeabweichung (q)
 2. der relativen Wiederholpräzision (b)
 3. der relativen Umkehrspanne (v)

Einzelergebnisse siehe Tabelle zur Kalibrierung der Kraftmesseinrichtung.

Tabelle: Kalibrierung der Kraftmesseinrichtung

für den Kraftmessbereich 4000 kN Druck

Auflösung 0,1 kN

Angezeigte Kraft (F_i) in [kN]	Wirkliche Kraft (F) in [kN]	relative Anzeigeabweichung (q) in [%]	relative Wiederholpräzision (b) in [%]	relative Umkehrspanne (v) in [%]	Erweiterte Messunsicherheit $U (k=2)$ in [%]
400	397,3	-0,07	0,20	0,06	0,32
800	792,2	-0,08	0,52		0,58
800	797,3	-0,34	0,34	0,05	0,41
1600	1592,9	-0,44	0,26	0,00	0,35
2400	2387,9	-0,5	0,16	-0,11	0,30
3200	3183,3	-0,52	0,17	-0,12	0,30
4000	3978,1	-0,55	0,30		0,41

zugehöriger Kraftaufnehmer: E73952 M2

für den Kraftmessbereich 800 kN Druck

Auflösung 0,1 kN

Angezeigte Kraft (F_i) in [kN]	Wirkliche Kraft (F) in [kN]	relative Anzeigeabweichung (q) in [%]	relative Wiederholpräzision (b) in [%]	relative Umkehrspanne (v) in [%]	Erweiterte Messunsicherheit $U (k=2)$ in [%]
80	79,8	-0,47	0,07	0,11	0,27
160	159,0	-0,62	0,08	0,00	0,26
320	317,8	-0,69	0,05	-0,03	0,25
480	478,0	-0,84	0,05	-0,13	0,25
640	633,9	-0,95	0,07	-0,13	0,26
800	792,3	-0,96	0,12		0,27

zugehöriger Kraftaufnehmer: E73952 M2

Seite 4 von 4
Page

zum Kalibrierschein vom
of calibration certificate dated

2020-07-14
V.NR.11.19

Z1197
D-K 17344-01-03
2020-06

• Erweiterte Messunsicherheit (U)

Angabe ist die erweiterte Messunsicherheit, die sich aus der Standardmessunsicherheit durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor $k=2$ ergibt. Sie wurde gemäß EA-4/02 M:2013 (Deutsche Übersetzung 06.11.2018) ermittelt. Der Wert der Messgröße liegt mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % im zugeordneten Wertintervall.

• Anerkennung der DAkkS-Kalibrierscheine im Ausland:

Die Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH ist Unterzeichner der multilateralen Übereinkommen der European co-operation for Accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine. Die weiteren Unterzeichner innerhalb und außerhalb Europas sind den Internetseiten von EA (www.european-accreditation.org) und ILAC (www.ilac.org) zu entnehmen.

• Verwendete Mess- und Kalibriereinrichtungen

Verwendete Messmittel

Messmittel	Hersteller	Seriennummer	Gültig bis:
Kraftanzeigegerät	BSM	201-080012	02/2021
Kraftaufnehmer:	Bongshin	E38259	02/2021
Kraftaufnehmer:	Interfaac	252293A	07/2020
Digitalthermometer	Greisinger	T102	01/2021

8.4 Kalibrierschein Ansetzdehnungsaufnehmer



HaBu Hauck Prüftechnik GmbH
Im Weichlingsgarten 20a
67127 Hochdorf - Assenheim

Kalibrierschein / Calibration Certificate

Mitglied im / Member of the

Deutschen Kalibrierdienst 



Deutsche
Akkreditierungsstelle
D-17544 01-00

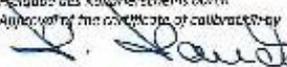
Habu Hauck Prüftechnik GmbH
Im Weichlingsgarten 20a
D-67126 Hochdorf Assenheim

Kalibrierzeichen
Calibration mark

Z1204
D-K- 17344-01-00
2020-06

Gegenstand <i>Object</i>	Längenänderungsmesseinrichtung	<p>Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI). Die DAKKS ist Unterzeichner der multilateralen Übereinkommen der European co-operation for Accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine. Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.</p> <p><i>This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI). The DAKKS is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of calibration certificates. The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.</i></p>
Hersteller <i>Manufacturer</i>	Hottinger Baldwin Messtechnik	
Typ <i>Type</i>	Ansetzdehnungsaufnehmer / DD1	
Fabrikat-/Serien-Nr. <i>Serial number</i>	03183004	
Inventar-Nummer <i>Inventory number</i>	00432/00	
Auftraggeber <i>Customer</i>	Jade Hochschule Zeughausstraße 15 26121 Oldenburg	
Auftragsnummer <i>Contract no.</i>	60381/0620	
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines <i>Number of pages of the certificate</i>	4	
Datum der Kalibrierung <i>Date of calibration</i>	2020-06-23	

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert wiederverwendet werden. Anzüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine sind bei Nennung des für die Freigabe Verantwortlichen in Klarschrift auch ohne Unterschrift gültig.
This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the issuing laboratory. Calibration certificates with the full name of the approval responsible person are valid without signature.

Datum <i>Date</i>	Freigabe des Kalibrierscheines durch <i>Approval of the certificate of calibration by</i>	Beauftragter <i>Person in charge</i>
14.07.2020	 H. Hauck	 C. Zimmermann

HaBu Hauck Prüftechnik GmbH
67126 Hochdorf – Assenheim

Kalibrieren mit know how
info@habu-prueftechnik.de

Fon: 06231 / 4031-77
Fax: 06231 / 4031-76

Seite 2 von 4
Page

zum Kalibrierschein vom
of calibration certificate dated

2020-07-14
V.NR0420

Z1204
D-K- 17311-01-00
2020-06

• Kalibriergegenstand

Langenänderungsmesseinrichtung nach DIN EN ISO 9513:2013

Anzeigeeinrichtung: Ziffernanzeige
Maximaler Messweg: 5 mm
Baujahr: –

• Konformitätsaussage

Die Längenänderungsmesseinrichtung wurde gemäß DIN EN ISO 9513:2013 geprüft und kalibriert.
Sie wurde wie folgt zugeordnet:

im Prüfbereich E _{max} mm	in der Mess- richtung	von mm	bis mm	der Klasse
1	Zug	0,1	1	0,5

Die Messwerte liegen innerhalb der normativ vorgegebenen Toleranzen. Die Maschine kann in den oben genannten Prüfverfahren für maßgebliche Versuche verwendet werden.

Die verwendeten Mess-, Kalibriereinrichtungen und Referenzmaterialien sind auf die nationalen Normale rückgeführt.

• Ort der Kalibrierung

Standort: Baustofftechnologie
zugehörige Prüfmaschine : Mohr & Federhaff
Typ der zugehörigen Prüfmaschine : UPD 40
Herstellnummer : 7051

• Messbedingungen

Prüftemperatur: 20,9°C
(Beginn der Kalibrierung)

Prüftemperatur: 20,8°C
(Ende der Kalibrierung)

Die allgemeinen Bedingungen zur Aufstellung und Funktion der Prüfmaschine wurden nach Norm eingehalten.

Hinweise zur Prüfung und Kalibrierung

Keine

• Messergebnisse

- Beurteilung der Weganzeigebereiche und deren Auflösungsvermögen (r)
- Ermittlung der relativen Anzeigeabweichung (q_{rel})

Seite 3 von 4
Page

zum Kalibrierschein vom
of calibration certificate dated

2020-07-14
V.NR0420

Z1204
D-K- 17344-01-III
2020-06

Einbaulage der Längenänderungsmesseinrichtung:

Wie bei der Probenmessung

Kalibrierung der Anfangsgerätemesslänge L_e

Messdaten

		L_N
L_N	mm	50
n_N	mm	0,01
L'_{L1}	mm	49,89
L'_{L2}	mm	49,94
L'_{L3}	mm	49,97
L_m	mm	49,93
q_{L1}	%	0,13
$U_{L(N-2)}$	%	0,32

Bei der Anfangsgerätemesslänge handelt es sich um eine: feste Gerätemesslänge

Tabelle: Kalibrierung der Längenänderungsmesseinrichtung

Für den Messbereich ($E_{max}=1$ mm) ; Messrichtung: Zug
Messschritte mit zunehmender Längenänderung
Startpunkt der Traverse: 0 mm [nur bei Traversenmessung]

Auflösung r [µm]	n/li [%]	Sollwert l_t [mm]	Reihe1 \bar{l}_i [mm]	Reihe1 $\bar{l}_i - l_t$ [mm]	Reihe1 q_{rel} [%]	Reihe2 \bar{l}_i [mm]	Reihe2 $\bar{l}_i - l_t$ [mm]	Reihe2 q_{rel} [%]	$U_{(n-2)}$ [%]
0,1	0,10	0,10	0,0996	-0,0004	-0,38	0,0999	-0,0001	-0,09	0,21
0,1	0,05	0,20	0,1997	-0,0003	-0,15	0,2002	0,0002	0,10	0,20
0,1	0,03	0,40	0,4004	0,0004	0,10	0,4007	0,0007	0,17	0,20
0,1	0,01	0,70	0,6995	-0,0005	-0,07	0,6987	-0,0013	-0,18	0,20
0,1	0,01	1,00	0,9992	-0,0008	-0,08	0,9990	-0,0010	-0,10	0,20

• **Erweiterte Messunsicherheit (U)**

Angabe ist die erweiterte Messunsicherheit, die sich aus der Standardmessunsicherheit durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ ergibt. Sie wurde gemäß EA-4/02 M:2013 (Deutsche Übersetzung 08.1.2018) ermittelt. Der Wert der Messgröße liegt mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% im zugeordneten Wertintervall.

• **Anerkennung der DAkkS-Kalibrierscheine im Ausland:**

Die Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH ist Unterzeichnerin der multilateralen Übereinkommen der European co-operation for Accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine. Die weiteren Unterzeichner innerhalb und außerhalb Europas sind den Internetseiten von EA (www.european-accreditation.org) und ILAC (www.ilac.org) zu entnehmen.

Seite 4 von 4
Page

zum Kalibrierchein vom
of calibration certificate dated

2020-07-14
V.NR0420

Z1204
D-K- 17344-01-00
2020-08

• **Verwendete Mess- und Kalibriereinrichtungen**

Verwendete Messmittel

Messmittel	Hersteller	Typ	Serien Nummer	Gültig bis
Messschieber	Mitutoyo	150mm	L210	12/2020
Messlaster	Heidenhain	MT1271	8683830	02/2021
Anzeigegerät	Heidenhain	ND 281B	13518544	02/2021
Digitaltheoriegerät	Greisinger	GTF801	T102	01/2021

8.5 Kalibrierscheine Klimaschränke

Kalibrier-Zertifikat Zertifikats-Nummer 2005-2020	 Telefon: (0 51 45) 28 666 -10 Telefax: (0 51 45) 28 666 -77 Info@wkm-michel.de www.wkm-michel.de
--------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Bestell-Nr.:	per Mail
Kunde:	Jade Hochschule Baustoffprüflabor Zeughausstraße 15 26121 Oldenburg
Ansprechpartner:	Jürgen Alexander Asche
Abteilung:	Baustoffprüflabor
Telefon:	0441/7708-3215
Kalibriertermin:	04.12.2020
Kalibrierzyklus:	<input type="checkbox"/> 12 Monate <input type="checkbox"/> 24 Monate <input checked="" type="checkbox"/> 36 Monate
Kalibriergegenstand:	KBF 720
Seriennummer:	00-08680
eindeutige Bezeichnung:	
Sonstiges/ Besonderheiten:	

Die für die Kalibrierung verwendeten Messeinrichtungen werden regelmäßig kalibriert und sind rückführbar auf nationale/ internationale Standards/ Normale.

Prüfer:

Name: Michael Weber

Datum: 04.12.2020

Unterschrift: 

Seite 1 von 4



Zentrum für Messen und Kalibrieren & ANALYTIK GmbH

akkreditiert durch die / accredited by the

Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH

als Kalibrierlaboratorium im / as calibration laboratory in the

Deutschen Kalibrierdienst

DKD



Deutsche
Akkreditierungsstelle
D-K-15186-01-00

Kalibrierschein
Calibration certificate

Kalibrierzeichen
Calibration mark

14-1259
D-K- 15186-01-00
2019-12

Gegenstand Object	Temperatur-/ Feuchtefühler mit Anzeigegerät
Hersteller Manufacturer	Ahlborn GmbH
Typ Type	Fühler: FHAD36R Gerät: ALMEMO 2890-9
Fabrikat/Serien-Nr. Serial number	Fühler: 16040033 Gerät: H16050069
Auftraggeber Customer	WKM GmbH & Co.KG Im Bulloh 30-32 29331 Lachendorf

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem internationalen Einheitensystem (SI).

Die DAkkS ist Unterzeichner der multilateralen Übereinkommen der European co-operation for Accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine. Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.

This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

The DAkkS is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of calibration certificates.

The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.

Auftragsnummer Order No.	-
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines Number of pages of the certificate	3
Datum der Kalibrierung Date of calibration	12.12.2019

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung sowohl der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift haben keine Gültigkeit.

This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature are not valid.

Datum Date	Stellv. Leiter des Kalibrierlaboratoriums Deputy Head of the calibration laboratory	Bearbeiter Person in charge
13.12.2019	Frau Dr. Jehnert	Frau Lange

**Kalibrierlaboratorium für Länge, elektrische, mechanische,
thermodynamische und analytische Messgrößen**
Calibration laboratory for length, electrical, mechanical,
thermodynamical and analytical measuring quantities
Ortsteil Wolfen, P-D ChemiePark Bitterfeld-Wolfen, Areal A, Filmstraße Nr.7, 06766 Bitterfeld-Wolfen
Telefon (03494) 69730 • FAX (03494) 697334 • email info@zmk-wolfen.de



Zentrum für Messen und Kalibrieren & ANALYTIK GmbH

akkreditiert durch die / accredited by the

Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH



als Kalibrierlaboratorium im / as calibration laboratory in the

Deutschen Kalibrierdienst **DKD**

Kalibrierschein
Calibration certificate

Kalibrierzeichen
Calibration mark

08-0240
D-K- 15186-01-00
2020-02

Gegenstand
Object **9 Temperaturfühler mit Anzeigegerät**

Hersteller
Manufacturer **Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH**

Typ
Type **Fühler: Pt100
Gerät: ALMEMO 2890-9**

Fabrikat/Serien-Nr.
Serial number **Gerät Serien-Nr: H16050069**

Auftraggeber
Customer **WKM GmbH & Co. KG
Im Bulloh 30-32
29331 Lachendorf**

Auftragsnummer
Order No. **L-20201070**

Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines
Number of pages of the certificate **5**

Datum der Kalibrierung
Date of calibration **13.02.2020**

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem internationalen Einheitensystem (SI).

Die DAkkS ist Unterzeichner der multilateralen Übereinkommen der European co-operation for Accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine. Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.

This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the international System of Units (SI).

The DAkkS is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of calibration certificates.

The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung sowohl der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift haben keine Gültigkeit.

This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature are not valid.

Datum Date	Stellv. Leiter des Kalibrierlaboratoriums Deputy (Wg) of the calibration laboratory	Bearbeiter Person in charge
14.02.2020	 Frau Dr. Jehnert	 Frau Porath

Kalibrierlaboratorium für Länge, elektrische, mechanische,

thermodynamische und analytische Messgrößen

Calibration laboratory for length, electrical, mechanical,

thermodynamical and analytical measuring quantities

Ortsteil Wolfen, P-D ChemiePark Bitterfeld-Wolfen, Areal A, Filmastraße Nr.7, 06766 Bitterfeld-Wolfen

Telefon (03494) 69730 • FAX (03494) 697334 • email info@zmk-wolfen.de

Kalibrier-Zertifikat Zertifikats-Nummer 2006-2020	 Telefon: (0 51 45) 28 666 -10 Telefax: (0 51 45) 28 666 -77 info@wkm-michel.de www.wkm-michel.de
--------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Bestell-Nr.:	per Mail
Kunde:	Jade Hochschule Baustoffprüflabor Zeughausstraße 15 26121 Oldenburg
Ansprechpartner:	Jürgen Alexander Asche
Abteilung:	Baustoffprüflabor
Telefon:	0441/7708-3215
Kalibriertermin:	04.12.2020
Kalibrierzyklus:	<input type="checkbox"/> 12 Monate <input type="checkbox"/> 24 Monate <input checked="" type="checkbox"/> 36 Monate
Kalibriergegenstand:	KBF 115
Seriennummer:	02-33057
eindeutige Bezeichnung:	
Sonstiges/ Besonderheiten:	

Die für die Kalibrierung verwendeten Messeinrichtungen werden regelmäßig kalibriert und sind rückführbar auf nationale/ internationale Standards/ Normale.

Prüfer:

Name: Michael Weber

Datum: 04.12.2020

Unterschrift: 

Seite 1 von 4



Zentrum für Messen und Kalibrieren & ANALYTIK GmbH

akkreditiert durch die / accredited by the

Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH

als Kalibrierlaboratorium im / as calibration laboratory in the

Deutschen Kalibrierdienst

DKD



Kalibrierschein
Calibration certificate

Kalibrierzeichen
Calibration mark

14-1259
D-K- 15186-01-00
2019-12

Gegenstand
Object **Temperatur-/ Feuchtefühler mit Anzeigerät**

Hersteller
Manufacturer **Ahborn GmbH**

Typ
Type **Fühler: FHAD36R
Gerät: ALMEMO 2890-9**

Fabrikat/Serien-Nr.
Serial number **Fühler: 16040033
Gerät: H16050069**

Auftraggeber
Customer **WKM GmbH & Co.KG
Im Bulloh 30-32
29331 Lachendorf**

Auftragsnummer
Order No. -

Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines
Number of pages of the certificate **3**

Datum der Kalibrierung
Date of calibration **12.12.2019**

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI). Die DAKKS ist Unterzeichner der multilateralen Übereinkommen der European co-operation for Accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine. Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.

This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

The DAKKS is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of calibration certificates.

The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung sowohl der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift haben keine Gültigkeit.

This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature are not valid.

Datum Date	Stellv. Leiter des Kalibrierlaboratoriums Deputy Head of the calibration laboratory	Bearbeiter Person in charge
13.12.2019	Frau Dr. Jehmert	Frau Lange

Kalibrierlaboratorium für Länge, elektrische, mechanische, thermodynamische und analytische Messgrößen

Calibration laboratory for length, electrical, mechanical, thermodynamical and analytical measuring quantities

thermodynamical and analytical measuring quantities

Ortsteil Wolfen, P-D ChemiePark Bitterfeld-Wolfen, Areal A, Filmstraße Nr.7, 06766 Bitterfeld-Wolfen

Telefon (03494) 69730 • FAX (03494) 697334 • email info@zmk-wolfen.de

Anlage A3:

Abschlussbericht

DBU-Projekt AZ 35442/02

Gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU)

Arbeitspaket 6: Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für die Umsetzbarkeit ökologischer Konstruktionen bei Großprojekten für das Material Lehm

Abschlussbericht – Mechanische und physikalische Eigenschaften des Stampflehms 0075/21 (IMS/JB/HW)

Freilichtmuseum Detmold – Landesmuseum für Alltagskultur
Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude

Institut für Materialprüfung und Bauwerkserhaltung GmbH, Oldenburg
Im Auftrag von: LWL – Bau- und Liegenschaftsbetrieb, Münster

Autoren: H. Wigger und M. Ince

14.03.2023

Abschlussbericht

Nr.: 0075/21 (IMS/JB/HW)

____. Ausfertigung

Auftraggeber: LWL – Bau- und Liegenschaftsbetrieb
Warendorfer Straße 24**48145 Münster**Projekt: **Freilichtmuseum Detmold – Landesmuseum für Alltagskultur
Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude**Inhalt: **Mechanische und physikalische Eigenschaften
des Stampflehms**

Der Bericht umfasst 39 Seiten (einschl. Anlagen)

Der Bericht darf nur ungekürzt veröffentlicht oder vervielfältigt werden; eine **auszugsweise** Wiedergabe bedarf der vorherigen schriftlichen Einwilligung.**IfMB GmbH**Zeughausstraße 15
26121 Oldenburg
Amtsgericht Oldenburg
HRB 214442**Kontakt**Tel.: 0441 / 71131
Fax: 0441 / 76203
E-Mail: info@ifmb-ol.de
http://www.ifmb-ol.de**Geschäftsführer**Prof. Dr.-Ing. Heinrich Wigger
Sitz: Oldenburg
St. Nr.: 64/211/05975**Bankverbindung**Bank: LZO Oldenburg
IBAN: DE 22 2805 0100 0093 0091 73
BIC: SLZODE22XXX

Inhaltsverzeichnis:

1	Veranlassung und Vorgang	4
2	Normen, Richtlinien, Literatur und Unterlagen	4
2.1	Normen und Richtlinien	4
2.2	Literatur	5
2.3	Unterlagen	5
2.4	Überblick und Ausgangsmaterial	5
3	Prüfkörperherstellung und Lagerung	6
3.1	Überblick	6
3.2	Kleinprüfkörper	6
3.2.1	Würfel	6
3.2.2	Zylinder.....	7
3.3	Bauteilprüfkörper	7
3.3.1	Überblick	7
3.3.2	Bauteilprüfkörper – Wand breit	8
3.3.3	Bauteilprüfkörper – Wand schmal.....	8
3.3.4	Bauteilprüfkörper – Wand hoch	8
4	Mechanische Untersuchungen.....	9
4.1	Kriechverhalten an Zylindern	9
4.2	Feuchtegehalte an den Zylindern	9
4.3	Feuchtegehalte an Bauteilprüfkörpern.....	9
4.3.1	Bauteilprüfkörper - Wand breit.....	9
4.3.2	Bauteilprüfkörper – Wand schmal.....	10
4.3.3	Bauteilprüfkörper – Wand hoch	10
4.4	Rohdichte an Prüfkörpern.....	10
4.5	Druckfestigkeit an Bauteilprüfkörpern	10
5	Untersuchungsergebnisse	11
5.1	Feuchtegehalte.....	11
5.1.1	Zylinder.....	11
5.1.2	Bauteilprüfkörper – Wand breit	12
5.1.3	Bauteilprüfkörper – Wand schmal.....	13
5.1.4	Bauteilprüfkörper – Wand hoch	14

5.2	Rohdichteuntersuchungen an Bauteilprüfkörpern	16
5.3	Kriechverformung	16
5.4	Druckfestigkeitsprüfungen der Bauteilprüfkörper	18
5.4.1	Überblick	18
5.4.2	Bauteilprüfkörper – Wand breit	18
5.4.3	Bauteilprüfkörper – Wand schmal	20
5.4.4	Bauteilprüfkörper – Wand hoch	21
6	Zusammenfassung und Vergleichswerte	22
7	Anlagen A Bilder	24
7.1	Anlage A Würfel und Zylinder	24
7.2	Anlage A Bauteilprüfkörper– Wand breit	24
7.3	Anlage A Bauteilprüfkörper – Wand schmal	27
7.4	Anlage A Bauteilprüfkörper – Wand hoch	28
8	Anlage B Untersuchungsergebnisse – Feuchtegehalte	30
8.1	Anlage B Feuchtegehalte Kleinprüfkörper	30
8.2	Anlage B Bauteilprüfkörpern – Wand breit	30
8.3	Anlage B Bauteilprüfkörpern – Wand schmal	31
8.4	Anlage B Bauteilprüfkörper – Wand hoch	32
9	Anlage C Untersuchungsergebnisse – Kriechen	33
10	Anlage C Untersuchungsergebnisse – Druckfestigkeiten	33
10.1	Anlage C Bauteilprüfkörper – Wand breit	33
10.2	Anlage C Bauteilprüfkörper – Wand schmal	34
10.3	Anlage C Bauteilprüfkörper – Wand hoch	35
10.4	Anlage C Würfel	37
11	Anlage D Kalibrierung	38

1 Veranlassung und Vorgang

Das Freilichtmuseum Detmold – Landesmuseum für Alltagskultur plant den Neubau eines Eingangs- und Ausstellungsgebäudes. Im Zuge des geplanten Neubaus sollen tragende und aussteifende Wände aus STAMPFLEHM zur Ausführung kommen. Da es sich bei Stampflehm um ein unregelmäßiges Bauprodukt handelt, muss für die geplante Ausführung eine ZUSTIMMUNG IM EINZELFALL (ZIE) erteilt werden. In Verbindung mit der ZIE müssen alle erforderlichen bautechnischen Nachweise für das Bauprodukt erbracht werden. Hierfür ist die Ermittlung der Materialkennwerte erforderlich. Die erforderlichen Prüfungen wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Gutachterbüro JÄGER INGENIEURE GMBH und dem Mitarbeiter PROF. DR.-ING. T. BURKERT ausgearbeitet. In mehreren Sitzungen der Arbeitsgruppe Lehm unter Mitarbeit von Herrn PROF. SCHULZ (TH OWL), Herrn ROSENKRANZ (Tragwerksplaner, KEMPEN KRAUSE INGENIEURE GMBH), Herrn EISLER (Prüfstatiker), Herrn WEIGAND (Architekt) und Herrn MEYER (Stampflehmlieferant) wurde der Umfang der Prüfungen besprochen und abgestimmt. Auf die Reibversuche wurde verzichtet. Anhaltswerte sollen auf der sicheren Seite liegend aus der Fachliteratur entnommen werden.

Vor diesem Hintergrund hat der LWL BAU- UND LIEGENSCHAFTSBETRIEB das INSTITUT FÜR MATERIALPRÜFUNG UND BAUWERKSERHALTUNG GMBH am 30.08.2021 beauftragt, die mechanischen sowie bauphysikalischen Materialeigenschaften des Stampflehms zu ermitteln.

Die ersten Ergebnisse zu den mechanischen und physikalischen Eigenschaften wurden in Zwischenberichten [U 5], [U 6] beschrieben. Dieser Abschlussbericht befasst sich mit den weiteren mechanischen Untersuchungen.

2 Normen, Richtlinien, Literatur und Unterlagen

2.1 Normen und Richtlinien

- [N 1] DIN EN 18945, (12-2018): Lehmsteine – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung.
- [N 2] DIN EN 18948, (12-2018): Lehmplatten – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung.
- [N 3] DIN EN 12390-1, (09-2021): Prüfung von Festbeton – Teil 1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen
- [N 4] DIN EN 12390-3, (10-2019): Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern.
- [N 5] DIN EN 12390-13 (09-2021): Prüfung von Festbeton – Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul).
- [N 6] DIN EN 12390-17 (09-2021): Prüfung von Festbeton – Teil 17: Bestimmung des Kriechens von Beton unter Druckspannung.
- [N 7] DIN EN 1990:2021-10 (10-2021): Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010 (D)

- [N 8] DIN EN 1996-1-1/NA:2019-12 (12-2019): Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1.1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk – Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter
- [N 9] EN 1052-1 (12-2018): Prüfverfahren für Mauerwerk - Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit

2.2 Literatur

- [L 1] Volhard, F.; Röhlen, U. (2009): Lehmbau Regeln, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 3. Überarbeitete Aufl.
- [L 2] Dierks, K.; Ziegert, C. (2000): Lehm 2000 - Materialprüfung und Begleitforschung im tragenden Lehmbau, Hrsg. Peter Steingass, Overall Verlag, Berlin.
- [L 3] Twelmeier, H.; (2011): Dauerhaftigkeitsprognose der Verfüugung von gipshaltigem historischem Mauerwerk, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Materialprüfanstalt für das Bauwesen, TU Braunschweig.

2.3 Unterlagen

- [U 1] Schomburg GmbH & Co. KG (2021): Lehmwürfel Prüfprotokolle 1-21, 2-21, 3-21, 4-21, 5-21, 6-21, 7-21
- [U 2] Conluto – Vielfalt aus Lehm: Produktmerkblatt 02.005 – 02.006 – Stampflehm grob 0-22 mm, Version 20.1.0
- [U 3] Relishkis A., (2021): Tragfähigkeit von Stampflehmwänden. Masterthesis, Oldenburg (unveröffentlicht).
- [U 4] Hofschlag H., (2009): Untersuchungen zum Tragverhalten unbewehrter Stampflehmwände. Masterthesis, Holzminden (unveröffentlicht).
- [U 5] Wigger, H.; Relishkis, A. (2022): 1. Zwischenbericht - Mechanische Eigenschaften von Stampflehm, 0075/21 ME | Freilichtmuseum Detmold – Landesmuseum für Alltagskultur Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude
- [U 6] Wigger, H.; Schmidtman I.-M. (2022): 1. Zwischenbericht - Bauphysikalische Eigenschaften von Stampflehm, 0075/21 BP Freilichtmuseum Detmold – Landesmuseum für Alltagskultur Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude

2.4 Überblick und Ausgangsmaterial

Die Materialuntersuchungen erfolgten im Zusammenhang mit der geplanten Ausführung der tragenden und aussteifenden Konstruktionen aus Stampflehm. Die zu untersuchenden Materialparameter wurden in einem gemeinsamen Austausch zwischen den Projektbeteiligten abgestimmt und festgelegt.

Im 1. Zwischenbericht wurden die ersten Ergebnisse der mechanischen Materialeigenschaften von Stampflehm dargelegt. Im Rahmen der Untersuchungen an kleinformatischen Prüfkörpern wurden folgende Materialkennwerte identifiziert:

- Druckfestigkeiten der Würfel bei 23°C/ 80 r. F.
- Druckfestigkeiten der Würfel bei 23°C/ 50 r. F.

- Druckfestigkeiten der Zylinder bei 23°C/ 50 r. F.
- Elastizitätsmodul

Der vorliegenden Abschlussbericht erörtert die Endergebnisse der Untersuchungen an klein- und großformatigen Prüfkörpern. Es wurden nachkommende Materialkennwerte ausgewiesen:

- Kriechverformungen an Zylinder bei 1/3 der Bruchlast bzw. Gebrauchslasten
- Druckfestigkeit an Bauteilprüfkörpern mit unterschiedlichen Schlankheiten
- Feuchteänderungen nach Herstellung der Prüfkörper

Darüber hinaus werden für die Auswertung der Materialeigenschaften die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen von SCHOMBERG GMBH & Co. KG [U 1] herangezogen.

Die Grundlage für die Materialuntersuchungen bilden in erster Linie die bestehenden Lehm- bau Regeln [L 1]. Ergänzend zu den LEHMBAU REGELN werden auch Teilaspekte anderer Prüf- methoden für Baustoffe (z. B. Mauerwerk) mit ähnlichen Materialeigenschaften herangezo- gen, da für Stampflehm keine Versuchsnormen bestehen.

3 Prüfkörperherstellung und Lagerung

3.1 Überblick

Die Herstellung der Prüfwände wurde von der Firma CONLUTO VIELFALT AUS LEHM übernom- men. Teilweise hat diese Arbeiten ein Subunternehmer (Herr FECHLER) für die Firma CONLUTO VIELFALT AUS LEHM übernommen. Die hergestellten Wände wurden durch das IfMB GmbH bis zur Prüfung mit einem Trägergerüst gestützt. Die Trägergerüste wurden nach dem Einbau in die Prüfmaschine entfernt.

Die verarbeitungsfertige Stampflehmmischung wurde im erdfeuchten Zustand in mehreren „Big Bags“ (à 1300 kg) angeliefert. Bei dem Material handelt es sich um eine feinkörnige und gleichmäßige Fertigmischung mit einer Bindekraft über 0,80 N/cm². Sie wird mit minerali- schen Zuschlägen wie Grobsand, Kies oder Splitt angereichert. Nach Herstellerangaben rei- chen die Kornfraktionen bis zu 22 mm mit einer Überkorngröße < 30 mm [U 1].

3.2 Kleinprüfkörper

3.2.1 Würfel

Würfel mit einer Kantenlänge von 20 cm und einer Schlankheit von $\lambda = 1$ wurden für die Er- mittlung des Sorptionsverhaltens hergestellt, s. Bild A 1. Darüber hinaus wurden weitere Würfel parallel zu den Bauteilprüfkörpern für die Untersuchungen der Gleichgewichtsfeuchte erstellt. Die Prüfkörper wurden in Stahlschalungen (Bild A 1 und Bild A 2) und mit Hilfe eines

pneumatischen Gerätes schichtweise verdichtet. Durch den Verdichtungsprozess wurden die aufgeschütteten Schichten auf etwa 2/3 ihrer Schütthöhe komprimiert. Zum Verdichten wurde ein elektrischer Stemmhammer mit 11 kg Gewicht verwendet. Nach Herstellung und Ausschalen wurden die Prüfkörper im Klimaschrank bei 23°C und 50% rel. Luftfeuchte gelagert. Bis zum Erreichen der Massenkonstanz wurden alle Prüfkörper getrocknet [N 2].

3.2.2 Zylinder

Die Zylinder für die Untersuchungen des Kriechverhaltens wurden ebenfalls in Stahlschalungen hergestellt. s. Bild A 1 und Bild A 2. Die Herstellung war identisch zu den Würfeln, s. Abschn. 3.2.2. Die Trocknung der Zylinder erfolgte unter Laborklima bis zum Erreichen der Massenkonstanz [N 2].

Für die Prüfung des Kriechverhaltens muss die Ebenheit der Lasteintragungsflächen gewährleistet sein. In den Lehm-Regeln [L 1] ist ein Abgleichen der Prüfkörper aus Stampflehm nicht vorgesehen. Die Bewertung der zulässigen Ebenheitsabweichungen erfolgte in Anlehnung an DIN EN 12390-1 [N 3]. Die Konditionierung nach dem Abgleichen der Druckflächen wurde nach DIN EN 18945 [N 1] vorgenommen. Zum Abgleichen der Druckflächen wurde Stuckgips der Firma KNAUF GIPS KG mit einer Druckfestigkeit von $\geq 7,0 \text{ N/mm}^2$ verwendet. Die Abgleichschichten wurden nicht dicker als 5 mm ausgebildet, so wie es die DIN 18945 [N 1] vorsieht.

Tabelle 1: Abmessungen der Kleinprüfkörper

Prüfkörper	Höhe	Breite / Durchmesser	Länge	Schlankheit
	h	b / d	l	λ
	[cm]	[cm]	[cm]	-
Würfel	20	20	20	1,0
Zylinder	30	15		2,0

3.3 Bauteilprüfkörper

3.3.1 Überblick

Im Rahmen der Untersuchungen zur Ermittlung der Materialeigenschaften sollten die großformatigen Probekörper so dimensioniert werden, dass eine vergleichbare Schlankheit mit dem späteren Bauwerk erreicht wird. Allerdings wurde dies durch die Abmessungen der Prüfmaschinen begrenzt. Für den Tragfähigkeitsnachweis wird eine Wandgeometrie für das Bauwerk von $h = 8,22 \text{ m}$ und $b = 0,60 \text{ m}$ zugrunde gelegt. Ausgehend von den Werten und nach DIN EN 1996/NA [N 8] ergibt sich eine Wandschlankheit von $\lambda = 13,7$.

Als Bauteilprüfkörper wurden Wände mit Schlankheiten von $\lambda = 2,5$, $10,0$ und $13,3$ hergestellt und nach ausreichender Trocknungszeit geprüft.

Tabelle 2: Abmessungen der Bauteilprüfkörper

Prüfkörper	Höhe	Breite	Länge	Schlankheit
	h	B	L	λ
	cm	cm	cm	-
Wand breit	100	40	108	2,5
Wand schmal	100	10	108	10,0
Wand hoch	200	15	140	13,3

3.3.2 Bauteilprüfkörper – Wand breit

Im Labor wurden drei Bauteilprüfkörper mit einer Schlankheit $\lambda = 2,5$ hergestellt. Bei der Herstellung der Wände zeigte sich, dass der horizontale Druck auf die Holzschalung von den Herstellern / Stampfern unterschätzt wurde. Von daher mussten neue Prüfkörper mit einer verstärkten Stahlschalung und Holzrahmen hergestellt werden, s. Bild A 8. Die horizontalen Schichten wurden auf ca. 15 cm aufgeschüttet und daraufhin auf 2/3 der Schütthöhe komprimiert. Der Trocknungsprozess wurde unter Laborklima durchgeführt. Die Raumtemperatur sowie die Raumlufffeuchte wurden mit Datenloggern erfasst. Auch die Lasteintragungsflächen der Bauteile wurden - wie bei den Kleinprüfkörpern mit Stuckgips - abgeglichen, s. Abschn. 3.2.2.

3.3.3 Bauteilprüfkörper – Wand schmal

Zunächst wurden Prüfkörper mit einer Schlankheit der Wand von $\lambda = 10$ und einer Höhe von 100 cm hergestellt, s. Tabelle 2. Die Herstellung und Konditionierung erfolgte wie bei den breiteren Bauteilprüfkörpern, s. Abschn. 3.3.2.

3.3.4 Bauteilprüfkörper – Wand hoch

Die Herstellung von drei hohen Prüfkörper erfolgte durch die Firma CONLUTO VIELFALT AUS LEHM im Prüflabor. Es wurden Wände mit vergleichbarer Schlankheit wie bei der späteren Ausführung erstellt, s. Tabelle 2. Die Herstellung und Konditionierung erfolgte wie bei den breiteren Bauteilprüfkörpern, s. Abschn. 3.3.2.

4 Mechanische Untersuchungen

4.1 Kriechverhalten an Zylindern

Die Untersuchungen zum Kriechverhalten wurden an sechs zylindrischen Prüfkörpern (PS 1 bis PS 6) mit einer Schlankheit $\lambda = 2$ durchgeführt [N 6]. Die Untersuchungen orientieren sich an dem Prüfverfahren für Festbeton [N 6], da nähere Angaben in den Lehm-Regeln [L 1] oder der Prüfnorm für Lehmsteine [N 1] fehlen. Der Prüfstand ist in Bild A 4 dargestellt und Bild A 3 zeigt die Messstellenanordnung. Nach DIN EN 12390-17 [N 6] werden die drei Messlinien Radial im Winkel von 120° angeordnet. Gegenüber dieser Anforderung wurden sechs Prüfkörper hergestellt, um eine gleiche Anzahl an Messergebnissen zu erreichen. Durch die mittige Anordnung in dem Belastungsrahmen wurde eine exzentrische Belastung verhindert [N 6]. Vor dem Ansetzen der Prüflast wurde die Länge l_0 zum Zeitpunkt t_0 , also die elastische Verformung bestimmt [N 6].

Die Prüflast bzw. Spannung sollte der Gebrauchslast am Bauwerk entsprechen. Die Gebrauchslast wurde mit dem Tragwerksplaner HERR ROSENKRANZ, den Gutachtern HERRN PROF. SCHULZ und HERRN PROF. BURKERT abgestimmt und liegt bei 12,5 kN ($2,83 \text{ N/mm}^2$). Dies entspricht ca. 33 % der charakteristischen Festigkeit ($2,10 \cdot 0,33 = 0,693 \text{ N/mm}^2$) bzw. 12,25 kN am Zylinder mit einem ($\varnothing 150 \text{ mm}$) [U 5].

Über einen Zeitraum von 70 Tagen wurde in einem 24h Intervall die Längenänderung gemessen und somit die Kriechdehnung bestimmt. Ein eventueller Spannungsverlust aufgrund der bereits entstandenen Kriechverformung wurde durch Nachspannen der Tellerfedern ausgeglichen. Die Prüfung wurde beendet, nachdem keine weitere Längenänderung beobachtet werden konnte [N 6].

4.2 Feuchtegehalte an den Zylindern

Nach Abschluss der Kriechversuche wurde, über gravimetrische Messungen, die Gleichgewichtsfeuchte der Prüfkörper bestimmt. Die Massen der Segmentproben können der Tabelle A 1 entnommen werden.

4.3 Feuchtegehalte an Bauteilprüfkörpern

4.3.1 Bauteilprüfkörper - Wand breit

Aus den Voruntersuchungen wurde ersichtlich, dass bei breiten Prüfkörpern ($b = 40 \text{ cm}$, $\lambda = 2,5$) ein längerer Zeitraum bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte erforderlich ist [U 3], [L 1]. Die genaue Bestimmung erfolgte durch Entnahme von Segmenten aus den Prüfkörpern im Außen- und Kernbereich unmittelbar im Anschluss an die mechanischen Prüfungen. Der Feuchtegehalt wurde über die gravimetrische Messung bestimmt. Die Entnahmestellen der

Proben werden aus Bild A 11 bis Bild A 13 ersichtlich. Die Feuchtigkeiten sind in Tabelle A 2 bis Tabelle A 4 dargestellt.

4.3.2 Bauteilprüfkörper – Wand schmal

Eine Trocknungsdauer von mindestens 6 Wochen wurde für die Wände angenommen [L 1]. Durch die mittige Entnahme von Segmentproben direkt im Anschluss an die mechanische Prüfung wurde der Feuchtegehalt mittels einer gravimetrischen Messung bestimmt. Die Feuchtegehalte sind in Tabelle A 5 beschrieben.

4.3.3 Bauteilprüfkörper – Wand hoch

Während der Fertigung der schlanksten Wände wurden fortlaufend acht Lehmproben zur Ermittlung der Einbaufeuchte mittels gravimetrischer Messung entnommen, s. Tabelle A 6. Die parallel gefertigten Würfel wurden kontinuierlich gewogen, um den Zeitpunkt zu ermitteln, an dem die Ausgleichsfeuchte erreicht wurde. Aufgrund der geringen Dicken der Wände von 0,15 m kann davon ausgegangen werden, dass die Ausgleichsfeuchte über den gesamten Wandquerschnitt nahezu gleichzeitig erreicht wird. Aus der Einbaufeuchte der Wand und dem Feuchteverlust wurde die Gleichgewichtsfeuchte der Wand berechnet. Diese wurde durch Entnahme von Proben im Anschluss an den Druckversuch gravimetrisch bestätigt.

4.4 Rohdichte an Prüfkörpern

Die Bestimmung der Rohdichte erfolgte nach dem Erreichen der Massekonstanz. Die geometrische Abmessung der Kleinprüfkörper wurde nach DIN 18945 [N 1] mit einem Messschieber und einer Ablesbarkeit von 0,1 mm durchgeführt. Die Messmodelle für die Erfassung der Maße können dem Bericht [U 5] entnommen werden. Zur Ermittlung des Gewichts wurde eine Präzisionswaage mit einer Genauigkeit von 0,1 g verwendet. Im Anhang befindet sich der Kalibrierungsnachweis für den Messschieber und die Waage.

Das Gewicht der Versuchskörper für die Bauteilversuche wurde direkt nach der Druckprüfung über eine Wägeinrichtung am Kran ermittelt. Zunächst wurde das Gewicht einschließlich der unteren Betonkonstruktion bestimmt. Anschließend erfolgte der Abtrag der Stampflehmwände und die Betonkonstruktion wurde gewogen. Die geometrischen Abmessungen wurden über ein Maßband bestimmt. Damit konnten die Rohdichten der Wände bestimmt werden.

4.5 Druckfestigkeit an Bauteilprüfkörpern

Unmittelbar nach dem Stampfen und dem Entfernen der Schalung wurden die Bauteilprüfkörper mit Kanthölzern durch Mitarbeiter des Instituts gesichert und bis zur Druckfestigkeitsprüfung im Labor bei Raumtemperatur gelagert. Die Bauteilprüfkörper mit einer Höhe von 100 cm ($\lambda = 2,5$; $\lambda = 10,0$) wurden mit der weggesteuerten Druckprüfmaschine des Typs

SWP4000VE vom Hersteller FORM + TEST PRÜFSYSTEME geprüft. Die Belastungsgeschwindigkeit war so gewählt, dass der Bruch innerhalb von 30 bis 90 Sekunden eintritt [N 1]. Basierend auf Erfahrungswerten bei den Würfel- und Zylinderprüfungen wurde die Belastungsgeschwindigkeit auf 0,06 N/mm²/s und bei den Zylindern auf 0,05 N/mm²/s festgelegt.

Die Prüfung den Wänden mit einer Höhe von 2,0 m ($\lambda = 13,3$) erfolgte an der Druckprüfmaschine der Firma MOHR & FEDERHAFF / SSM PRÜFTECHNIK TYP BPPS 6800.

Der Kalibrierungsnachweise der Prüfmaschinen ist in Anlage D | Kalibrierung beigefügt.

5 Untersuchungsergebnisse

5.1 Feuchtegehalte

5.1.1 Zylinder

Die Zylinder wiesen bei den Prüfungen eine Gleichgewichtsfeuchte von durchschnittlich 1,25 M.-% auf, s. Bild 1. Die Standardabweichung betrug 0,18 M.-% mit einem Variationskoeffizienten von 0,15, s. Tabelle A 1.

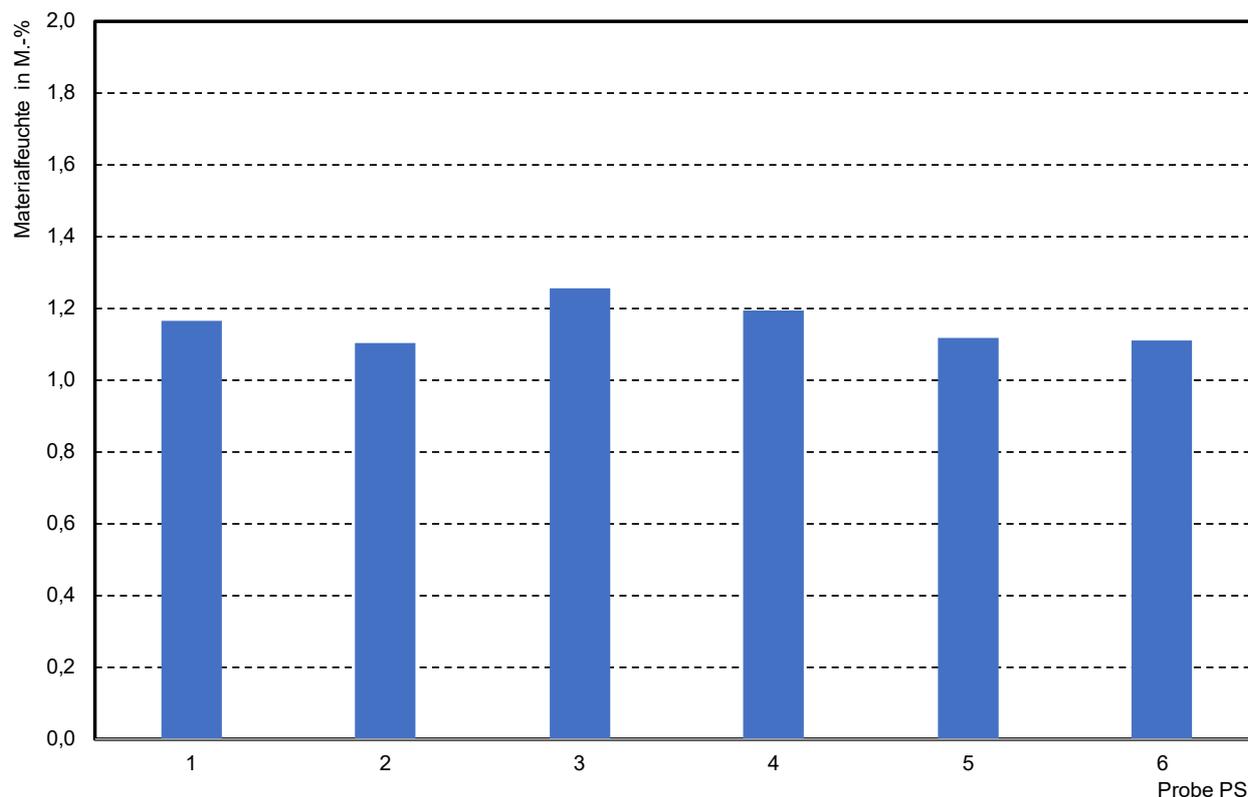


Bild 1: Feuchtegehalte der Zylinder (Kleinprüfkörper) $\lambda = 2,0$ (Prüftag)

5.1.2 Bauteilprüfkörper – Wand breit

Bei der Druckfestigkeitsuntersuchung von Wand 1 bei einem Prüfalter von 15 Wochen (106 Tagen) wurde ersichtlich, dass die Ausgleichsfeuchte im Kernbereich entgegen den Erwartungen nicht erreicht wurde, s. Bild 2. Tabelle A 2 gibt die Feuchtegehalte in Abhängigkeit von den Wandquerschnitten wieder. Bild 3 zeigt schematisch die Verteilung der Materialfeuchte im Querschnitt der untersuchten Wände. In Wand 1 ist deutlich eine ungleichmäßige Verteilung der Materialfeuchte zu erkennen. Diese ungleichmäßige Verteilung der Feuchte hatte erhebliche Auswirkung auf die Tragfähigkeit des Bauteils. Wie aus den vergangenen Untersuchungen bekannt wirkt sich die Feuchte auf das Drucktragverhalten und somit auch auf dem Elastizitätsmodul aus. Je höher der Feuchtegehalt umso geringer die Druckfestigkeit und der Elastizitätsmodul.

Aus diesem Grund wurden, vor einem weiteren Druckversuch zusätzlich Bohrmehlproben in einer Tiefe von 0 - 0,10 m und 0,10 m - 0,20 m, aus Wand 2 entnommen und die Feuchtegehalte bestimmt. Bei einem Prüfalter von 46 Wochen (323 Tage) wurde, nach der Prüfung, bei Wand 2 eine Ausgleichsfeuchte von 1,35 M. - % ermittelt, s. Tabelle A 3. Bei einem Prüfalter von 38,5 Wochen (270 Tagen) ergab sich für Wand 3 eine Ausgleichsfeuchte von 1,04 M. - %, s. Tabelle A 4. Bild 2 gibt die Ergebnisse zusammenfassend wieder.

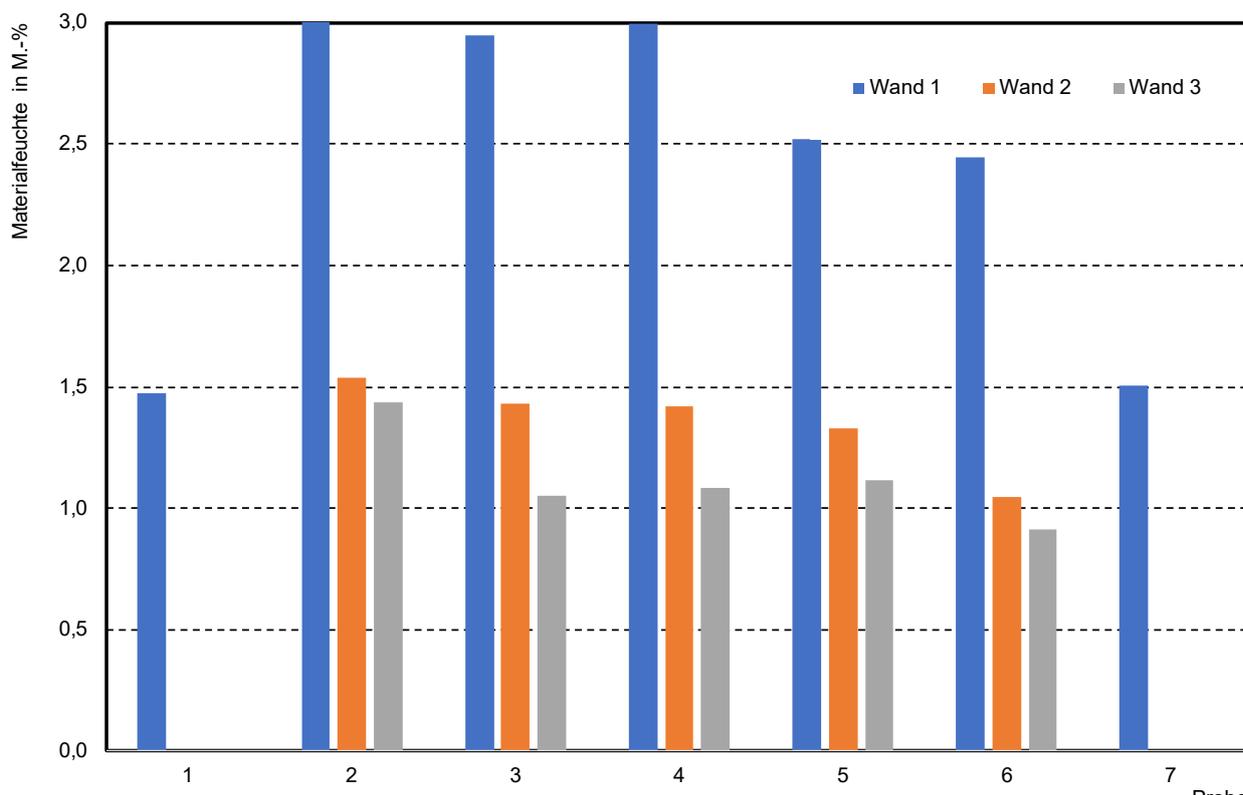


Bild 2: Materialfeuchten der Bauteilprüfkörper – Wand breit ($\lambda = 2,5$) – Wand 1 bis 3

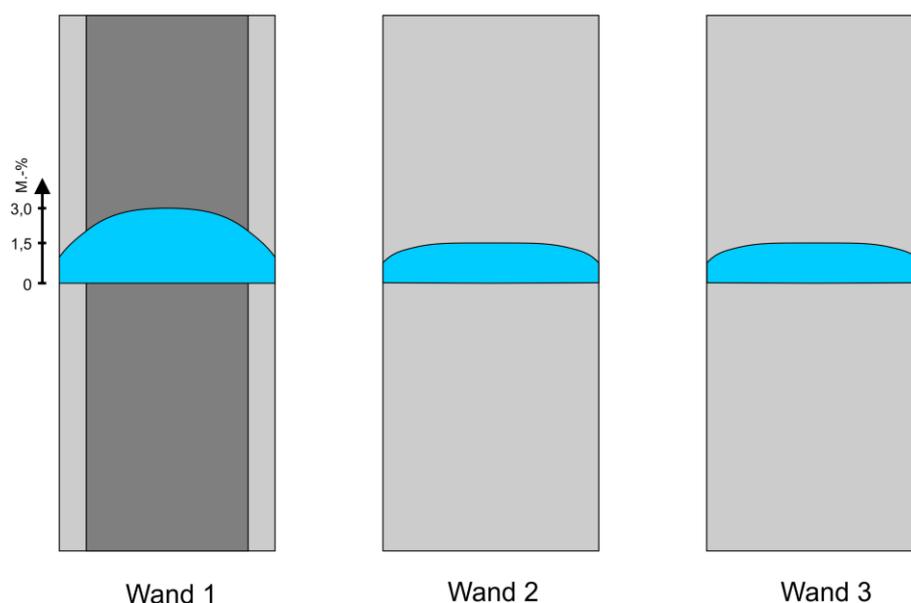


Bild 3: Schematische Feuchteverteilung über den Querschnitt der Wände

5.1.3 Bauteilprüfkörper – Wand schmal

Nach einer Trocknungszeit von 6,5 Wochen wurde die Ausgleichsfeuchte bei den schmalere (b = 0,10 m) Wänden erreicht und betrug im Durchschnitt 1,32 M.-%, s. Tabelle A 5. Bild 4 gibt die Ergebnisse der Feuchtegehalte am Prüftag wieder.

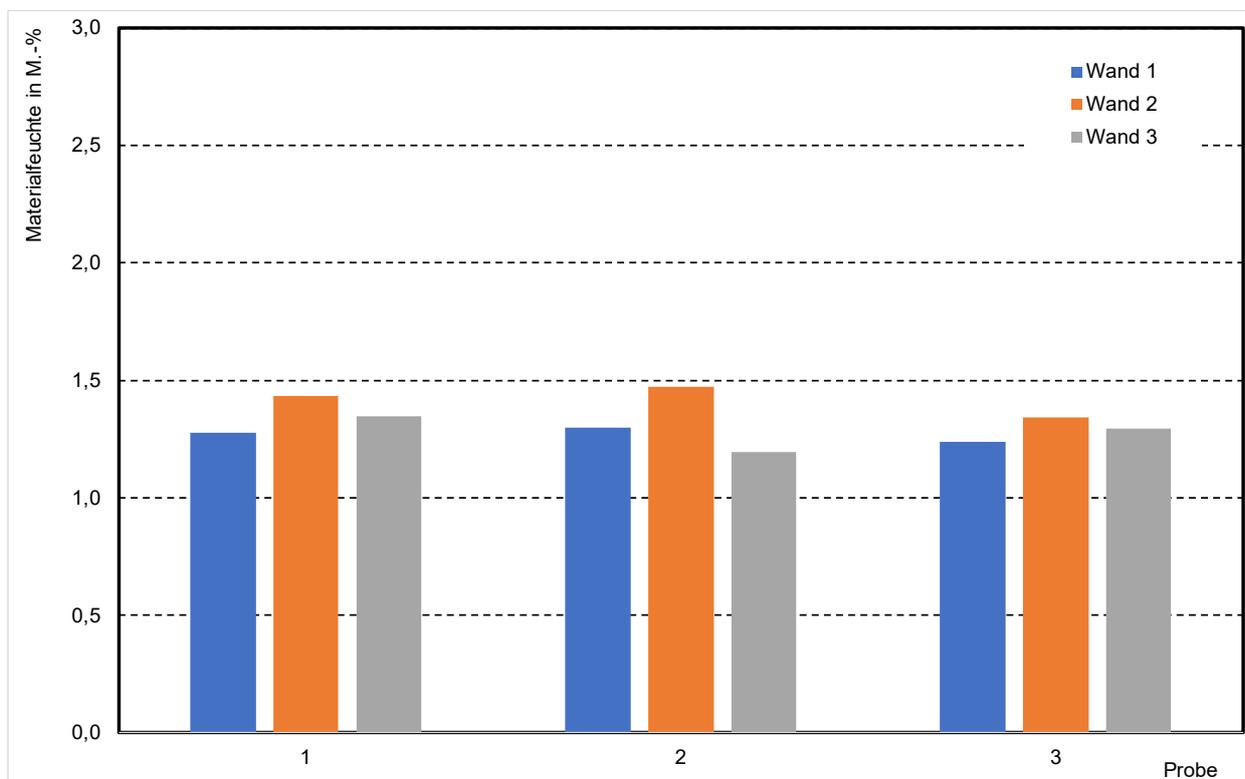


Bild 4: Materialfeuchten der Bauteilprüfkörper – Wand schmal ($\lambda = 10,0$)

5.1.4 Bauteilprüfkörper – Wand hoch

Die Einbaufeuchte der Prüfkörper betrug 8 M.-%, s. Tabelle A 6 und Bild 5. Die Materialfeuchte der parallel gefertigten Würfel wurde nach 9,5 Wochen (68 Tagen) erreicht und betrug 1,5 M.-%. Der Trocknungsverlauf wird aus Bild 6 deutlich. Aus Bild 6 wird ersichtlich, dass die erwartete Ausgleichsfeuchte nach ca. 10 Wochen erreicht wurde. Die Materialfeuchten am Prüftag betragen im Mittel bei Wand 1 1,24 M.-%, bei der Wand 2 1,20 M.-% und bei der Wand 3 1,05 M.-%. Über alle drei Wände betrug die mittlere Materialfeuchte 1,16 M.-%. Die einzelnen Werte sind in Tabelle A 7 wiedergegeben. Bild 7 zeigt die Materialfeuchten grafisch.

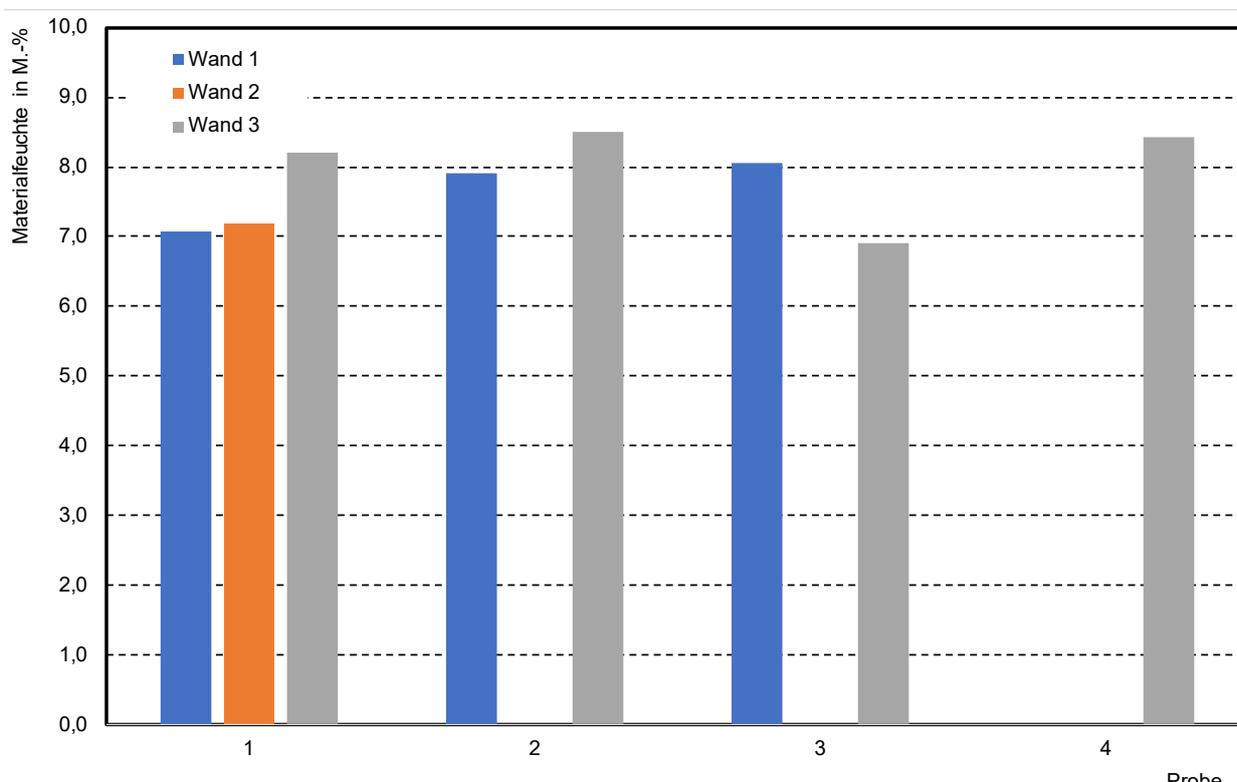


Bild 5: Einbaufeuchte (Bauteilprüfkörper – Wand hoch, $\lambda = 13,3$)

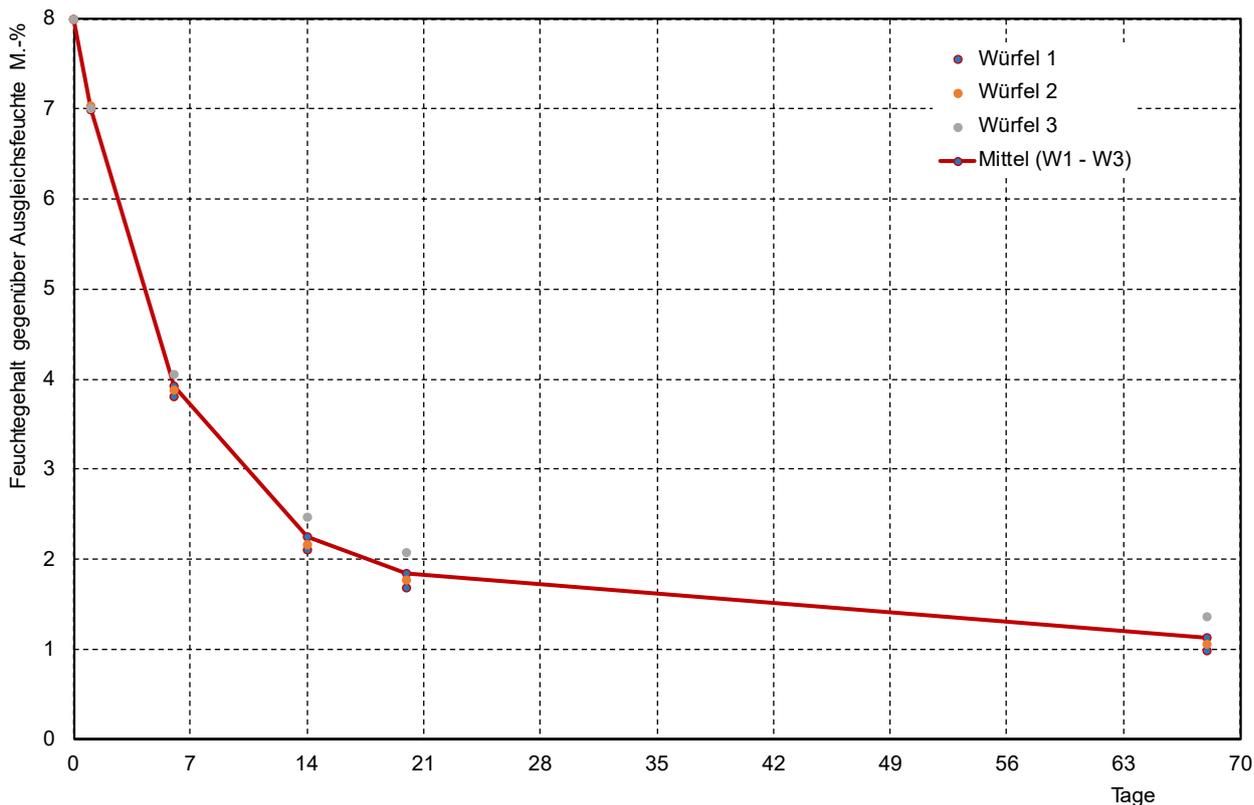


Bild 6: Verlauf der Feuchtegehaltes der Begleitwürfel W1 – W3 (Bauteilprüfkörpern Wand – hoch, $\lambda = 13,3$)

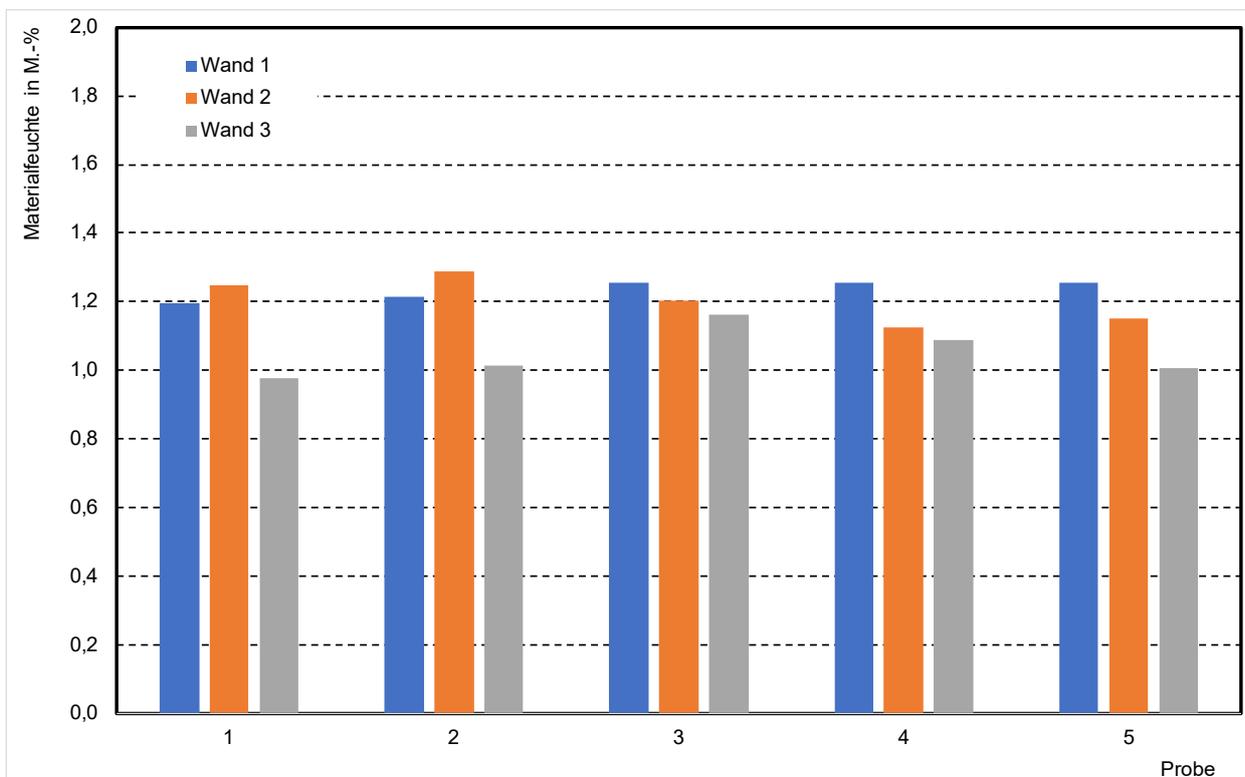


Bild 7: Materialfeuchten am Prüftag (Bauteilprüfkörper – Wand hoch, $\lambda = 13,3$)

5.2 Rohdichteuntersuchungen an Bauteilprüfkörpern

Das Gewicht der Versuchskörper für die Bauteilversuche wurden direkt nach der Druckprüfung über eine Wägenrichtung am Kran ermittelt. Zunächst wurde das Gewicht einschließlich der unteren Betonkonstruktion bestimmt. Anschließend erfolgte der Abtrag der Stampflehmwände und die Betonkonstruktion wurde gewogen. Damit konnten die Rohdichten der Wände bestimmt werden.

5.3 Kriechverformung

Beim Kriechversuch setzten sich die Verformungen aus der Schwindverformung, der elastischen und der Kriechverformung zusammen. Zu Versuchsbeginn hatten die Zylinder bereits ein Alter von einem Jahr. Die bisherigen Untersuchungen [U 5], [U 6] haben gezeigt, dass die Schwindverformungen zu Versuchsbeginn abgeschlossen waren. Eine Berücksichtigung der Schwindverformung erfolgt daher nicht. Demzufolge sind bei der Auswertung der Versuche die elastischen Verformungen und die Kriechverformungen zu berücksichtigen.

Die elastischen Verformungen werden aus den mechanischen Eigenschaften der Zylinder (\varnothing 150 mm) abgeleitet. Die elastische Verformung ergibt sich aus:

$$\epsilon_{el} = \frac{\sigma_c}{E_c} \quad (1)$$

mit:

ϵ_c	Verformung des Stampflehms	E_c	Elastizitätsmodul des Stampflehms in N/mm ²
--------------	----------------------------	-------	--------------------------------------------------------

Der E-Modul wurde bereits im 1. Zwischenbericht [U 5] mit $E_c = 2901 \text{ N/mm}^2$ angegeben und führt mit der aufgebrachten Belastung von $0,707 \text{ N/mm}^2$ zu einer elastischen Verformung von $\epsilon_{C(t_0)} = 0,244 \text{ ‰}$. Der Mittelwert der elastischen Dehnung von PS 1 bis PS 6 stimmen mit den berechneten Werten überein.

Nach dem Einbau der Zylinder im Prüfstand wurde die Last aufgebracht, die Verformung über Messuhren abgelesen und die Längenänderung notiert. In Bild 8 ist der zeitliche Verlauf der Kriechverformung dargestellt. Die maximale Kriechverformung liegt bei $1,88 \text{ ‰}$ (PS 3), die Minimale bei $0,33 \text{ ‰}$ (PS 6) und der Mittelwert beträgt $1,08 \text{ ‰}$.

Tabelle 3: Gesamtverformung, Spannung, E-Modul und Endkriechzahl der Zylinder

Probe	Gesamtverformung	Spannung	E-Modul	Endkriechzahl
	ε_{∞}	σ_c	E_c	φ_{∞}
	‰	N/mm ²	N/mm ²	-
PS 1	1,25	0,707	2901	4,15
PS 2	1,19	0,707	2901	3,88
PS 3	1,88	0,707	2901	6,72
PS 4	0,69	0,707	2901	1,85
PS 5	1,12	0,707	2901	3,61
PS 6	0,33	0,707	2901	0,36
Mittelwert	1,08			3,43
Standardabweichung m_x				2,17
Variationskoeffizient V_x				63%

Für die Berechnung der Kriechverformung ist die Ermittlung der Endkriechzahl von Bedeutung. Von daher wird die Endkriechzahl bestimmt.

$$\varphi_{\infty} = \frac{\varepsilon_{g(t=72d)} - \varepsilon_{el}}{\varepsilon_{el}} \quad (2)$$

Im Mittel ergibt sich eine Endkriechzahl von

$$\varphi_{\infty} = \frac{1,08 - 0,244}{0,244} = 3,43 \quad (3)$$

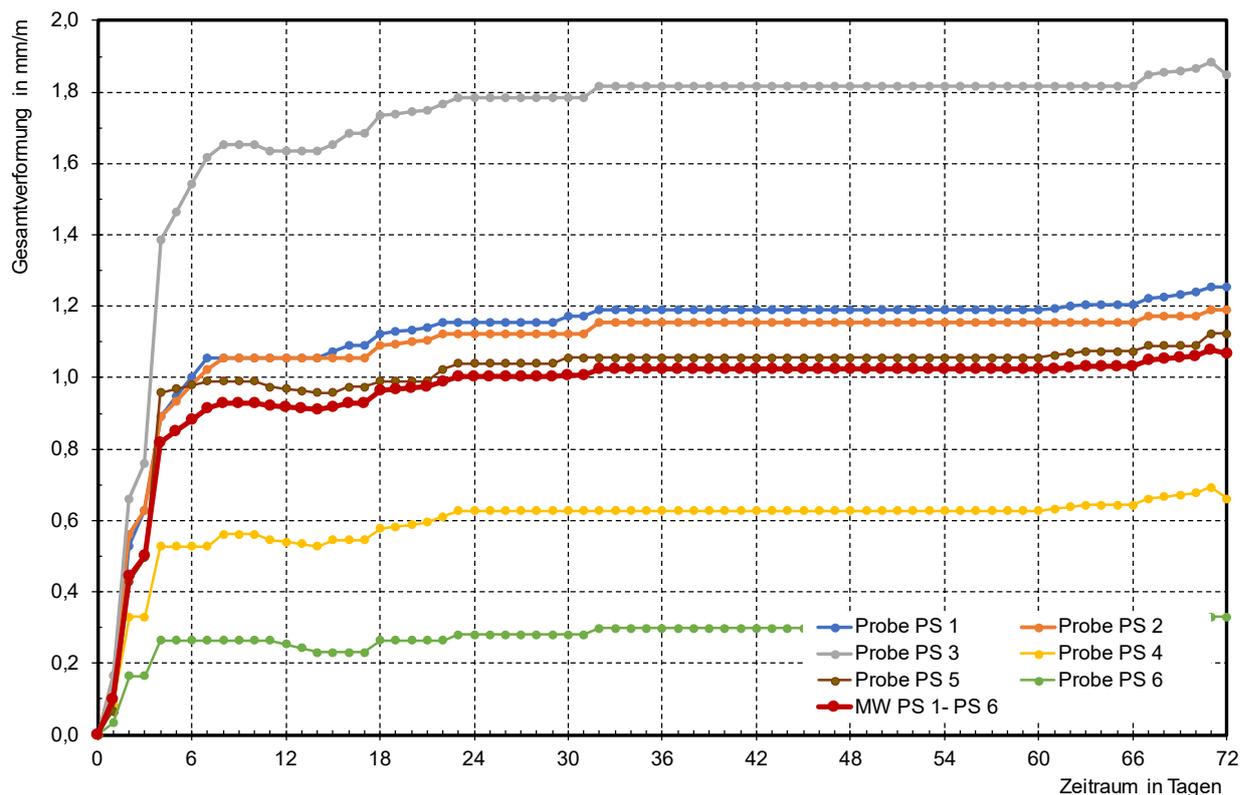


Bild 8: Kriechverformungen der Zylinder (PS 1 bis PS 6) mit dem Mittelwert (MW) in Abhängigkeit der Zeit

5.4 Druckfestigkeitsprüfungen der Bauteilprüfkörper

5.4.1 Überblick

In Abstimmung mit dem Tragwerksplaner, Prüfstatiker und Gutachter sowie den fachlichen Berater PROF. SCHULZ der TECHNISCHEN HOCHSCHULE OSTWESTFALEN-LIPPE wurden die Prüfabläufe und -lasten abgestimmt.

Die maximale Druckspannung für die Bauteilversuche wurde über die Würfel- und Zylinderdruckversuche [U 5] abgeleitet bzw. abgeschätzt. Nach Aufbringen von ca. 1/3 der Bruchlast wurden Druckhysterese dreimal in Anlehnung an der Norm [N 9] an den Prüfkörpern mit einer Schlankheit ($\lambda = 2,5, 10,0$) durchfahren. Bei der Wand - hoch ($\lambda = 13,3$) wurde darauf verzichtet, da dies aufgrund von Einstellungsproblemen bei der Prüfmaschine nicht möglich war. Die Vorgehensweise wurde mit den Gutachtern abgestimmt.

5.4.2 Bauteilprüfkörper – Wand breit

Die Prüfkörper mit den Abmessungen von ca. $l \cdot b \cdot h = 1,0 \cdot 0,4 \cdot 1,0 \text{ m}^3$ ($\lambda = 2,5$) sollten in einem Prüfmalter von ca. 100 Tagen geprüft werden. Während des Versuches der Wand 1 (W 1) zeigte sich, dass die Bruchlast wesentlich geringer war als zuvor abgeschätzt.

Die anschließenden Messungen der Materialfeuchten zeigte, dass im Wandinneren eine deutlich höhere Materialfeuchte vorlag als in den äußeren Bereichen, s. Bild 2 und Bild 3. Dies führt zu unterschiedlichen Materialverhalten. Der äußere Bereich hat eine höhere Festigkeit als der Innere [U 5]. Es kommt zu einer Schalenbildung und damit zu einem verfrühtem Druckversagen des Gesamtsystems. Nach Rücksprache mit den Gutachern wurde bei den beiden verbliebenen Wänden (W 2 / W 3) über einen längeren Zeitraum die Materialfeuchte mit einem Messgerät der Firma GANN MESS- U. REGELTECHNIK GMBH und Baufeuchte-Elektrode B 50, sowie über Darrproben ermittelt. In Bild 2 und Bild 3 sind die Materialfeuchten am Prüftag dargestellt. Deutlich sind die reduzierten Materialfeuchten zu erkennen. Auch über den Querschnitt sind die Unterschiede deutlich geringer. In Bild 9 sind die Spannungs-Dehnungslinien der Wände (W 2 und W 3) wiedergeben.

In Tabelle 4 sind das Prüfalter, die Materialfeuchten, Abmessungen, Rohdichten und die Festigkeiten wiedergegeben. Im Mittel (W2 / W3) liegt eine Rohdichte von 2.095 kg/m^3 und eine Druckfestigkeit bei $1,77 \text{ N/mm}^2$ bei einer Materialfeuchte $1,25 \text{ M. -\%}$ vor.

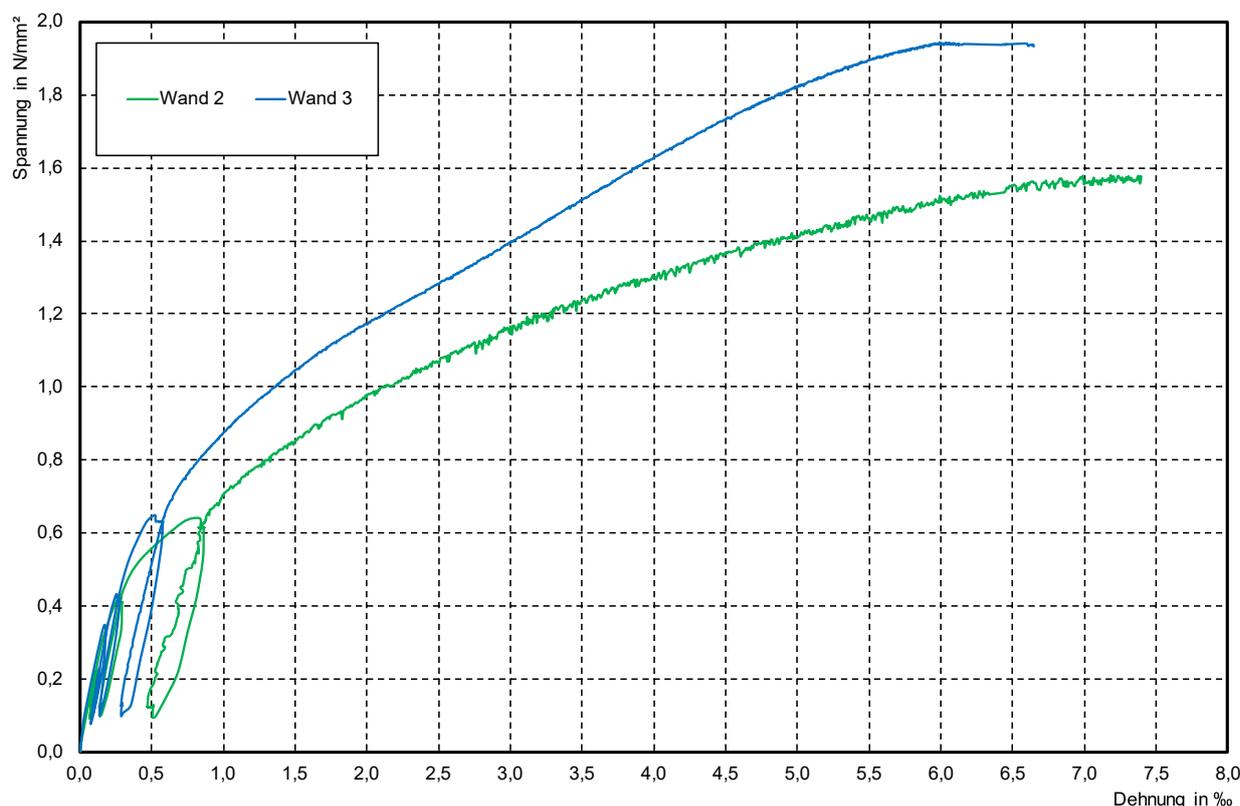


Bild 9: Mittelwerte der Spannungs-Dehnungslinie der Wand 2 und 3
($l \cdot b \cdot h = 1,0 \cdot 0,4 \cdot 1,0 \text{ m}^3$) mit $\lambda = 2,5$

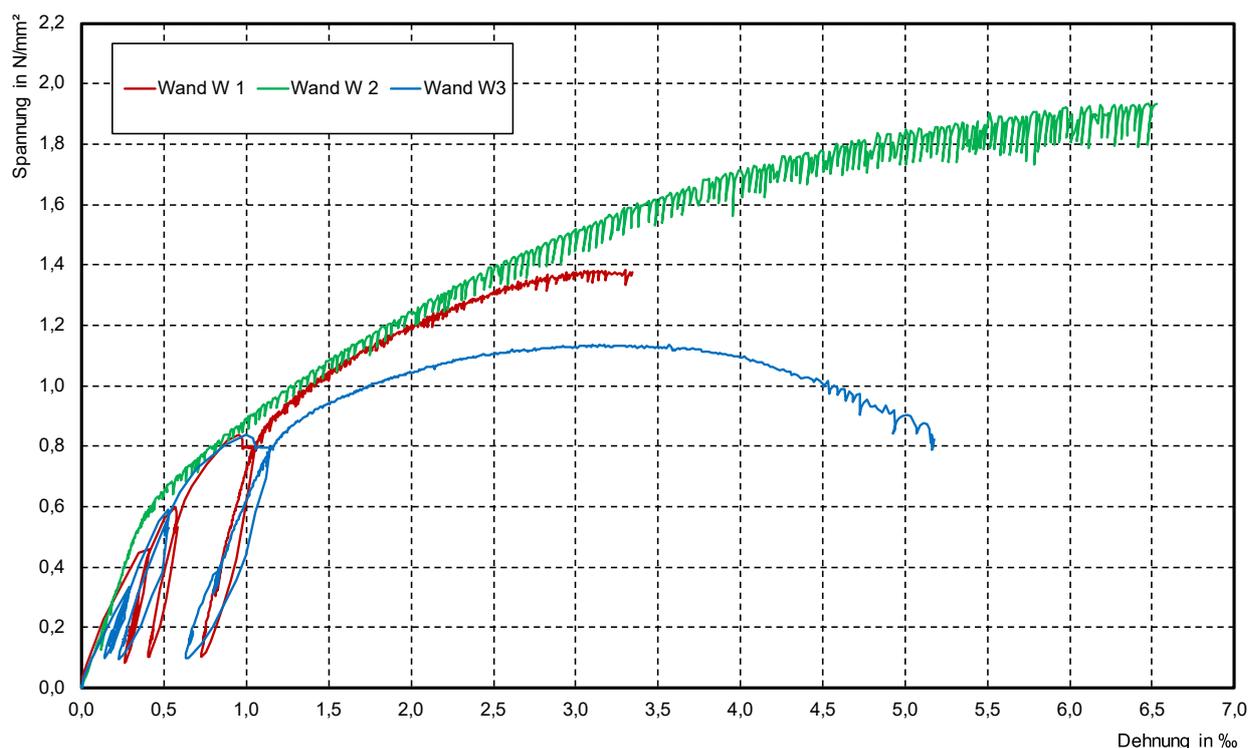
Tabelle 4: Feuchtegehalt, Rohdichte, Bruchlast und Druckfestigkeit der Prüfkörper mit einer Schlankheit ($l \cdot b \cdot h = 1,0 \cdot 0,4 \cdot 1,0 \text{ m}^3$) mit $\lambda = 2,5$

Prüfkörper	Prüfalter	Feuchte	Fläche	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	Tage	M.-%	m ²	kg/m ³	kN	N/mm ²
W 1	106	0-10cm: 1,5	0,370	2.095	461,0	1,25
		10-20cm: 2,8				
W 2	323	1,40	0,370	2.108	596,2	1,61
W 3	270	1,10	0,370	2.081	709,8	1,92
Mittelwert*		1,25	0,370	2.095	653,0	1,76

* Mittelwert aus Wand 2 und 3

5.4.3 Bauteilprüfkörper – Wand schmal

Die Prüfkörper mit den Abmessungen von ca. $l \cdot b \cdot h = 1,0 \cdot 0,1 \cdot 1,0 \text{ m}^3$ ($\lambda = 10,0$) wurden bei einem Alter von ≈ 45 Tagen geprüft. Bild 10 zeigt die mittleren Spannungs- Dehnungslinien der untersuchten Wände.

Bild 10: Mittelwerte der Spannungs-Dehnungslinie der Wand 1 bis 3 ($l \cdot b \cdot h = 1,0 \cdot 0,1 \cdot 1,0 \text{ m}^3$) mit $\lambda = 10,0$

In Tabelle 5 sind das Prüfalter, die Materialfeuchten, Abmessungen, Rohdichten und die Festigkeiten wiedergegeben. Im Mittel (W1 bis W3) liegt eine Rohdichte von 2.000 kg/m^3 und eine Druckfestigkeit von $1,57 \text{ N/mm}^2$ bei einer Materialfeuchte $1,32 \text{ M.-%}$ vor.

Tabelle 5: Feuchtegehalt, Rohdichte, Bruchlast und Druckfestigkeit der Prüfkörper mit einer Schlankheit $\lambda = 10,0$

Prüfkörper	Prüfalter	Feuchte	Fläche	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	Tage	M.-%	m ²	kg/m ³	kN	N/mm ²
W 1	44	1,27	0,099	1.927	136	1,38
W 2	45	1,41	0,101	2.145	222	2,20
W 3	47	1,28	0,098	1.929	111	1,13
Mittelwert		1,32		2.000	156	1,57

5.4.4 Bauteilprüfkörper – Wand hoch

Die Prüfkörper mit den Abmessungen von ca. $l \cdot b \cdot h = 1,4 \cdot 0,15 \cdot 2,0 \text{ m}^3$ ($\lambda = 13,3$) wurden bei einem Alter von ≈ 250 Tagen geprüft. Bild 11 zeigt die mittleren Spannungs- Dehnungslinien der untersuchten Wände.

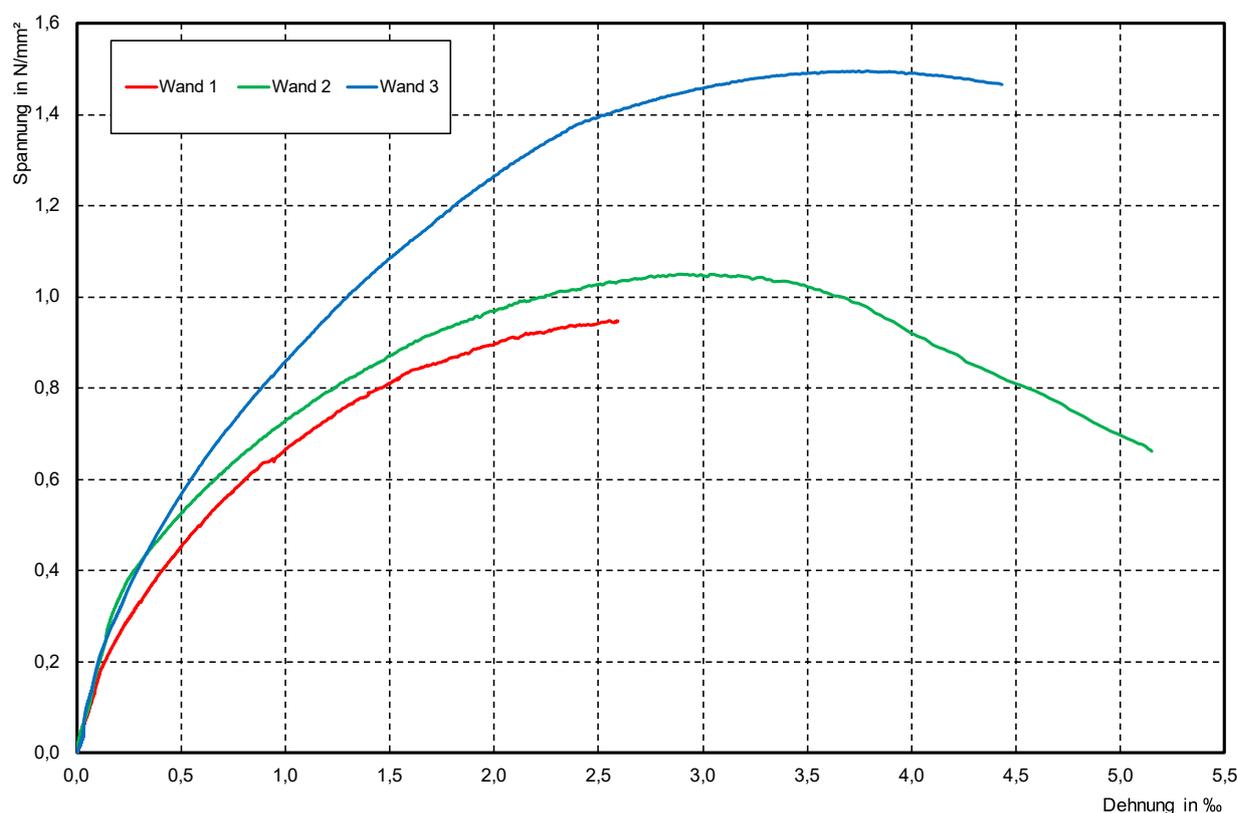


Bild 11: Mittelwerte der Spannungs-Dehnungslinie der Wand 1 bis 3 ($l \cdot b \cdot h = 1,4 \cdot 0,15 \cdot 2,0 \text{ m}^3$) mit $\lambda = 13,3$

In Tabelle 6 sind das Prüfalter, die Materialfeuchten, Abmessungen, Rohdichten und die Festigkeiten wiedergegeben. Im Mittel (W1 bis W3) beträgt die Rohdichte 2.189 kg/m^3 und die Druckfestigkeit $1,18 \text{ N/mm}^2$ bei einer Materialfeuchte $1,16 \text{ M. -\%}$.

Tabelle 6: Feuchtegehalt, Rohdichte, Bruchlast und Druckfestigkeit der Prüfkörper mit einer Schlankheit $\lambda = 13,3$

Prüfkörper	Prüfalter	Feuchte	Fläche	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	Tage	M.-%	m ²	kg/m ³	kN	N/mm ²
W 1	252	1,24	0,211	2.157	200	0,95
W 2	252	1,20	0,211	2.173	231	1,10
W 3	277	1,05	0,210	2.239	314	1,49
Mittelwert:		1,16		2.189	248	1,18

6 Zusammenfassung und Vergleichswerte

Das Freilichtmuseum Detmold – Landesmuseum für Alltagskultur plant den Neubau eines Eingangs- und Ausstellungsgebäudes. Im Zuge des geplanten Neubaus sollen tragende und aussteifende Wände aus STAMPFLEHM zur Ausführung kommen. Hierzu ist eine ZUSTIMMUNG IM EINZELFALL (ZIE) erforderlich.

Die erforderlichen Prüfungen wurden vom PROF. DR.-ING. T. BURKERT, JÄGER INGENIEURE GMBH unter Mitarbeit von Herrn PROF. SCHULZ (TH OWL) sowie Herrn ROSENKRANZ (Tragwerksplaner, KEMPEN KRAUSE INGENIEURE GMBH) wie auch mit Herrn EISLER (Prüfstatiker) besprochen und abgestimmt.

Bei der Herstellung der Probekörper zur Bauteilprüfung wurde zunächst der horizontale Druck auf die Holzschalung unterschätzt. Die Holzschalung wurde durch eine wesentlich steifere Stahlschalung ersetzt. Die Herstellung der Probekörper musste daher wiederholt werden. Auch die gleichmäßige Austrocknung über den Wandquerschnitt dauerte wesentlich länger als zunächst erwartet. Bei den Untersuchungen zeigte sich, dass der Feuchtegehalt der Prüfkörper einen erheblichen Einfluss auf die Druckfestigkeit ausübt. Es wurden wiederholte Feuchtemessungen vorgenommen, um eine gleichmäßige Feuchte (Ausgleichsfeuchte) über den Querschnitt sicherzustellen. Durch die o. g. unvorhergesehenen Randbedingungen haben sich die Prüfung erheblich verzögert.

Im Laufe der Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass der Zeitraum zur Trocknung von der Einbaufeuchte bis zur Ausgleichsfeuchte einen längeren Zeitraum einnimmt als zunächst vermutet. Nach Einbau des Stampflehms und des Rückbaus der Schalungen wurden an den Prüfkörpern die Materialfeuchten zerstörungsfrei ermittelt. Im Mittel ergab sich eine Einbaufeuchte von ca. 1,2 M.-%. Je nach Dicke der Wand waren unterschiedliche Trocknungszeiten bis zu einigen Monaten erforderlich.

Das horizontale und vertikale Endschwindmaß ist mit 1,14% bzw. 1,11% annähernd gleich [U 6]. Die ermittelten Werte liegen unterhalb der in den Lehmbau Regeln festgelegten Obergrenze von 2%, allerdings für Sichtbauteile < 0,5% [L 1].

Bei den Versuchen zum Kriechverhalten zeigen sich, im Gegensatz zu den Druckversuchen Ergebnisse, die eine erhebliche Streuung aufweisen. Trotz intensiver Recherche konnte keine Fehlerquelle gefunden werden.

Die Untersuchungsergebnisse der Druckversuche an den Kleinprüfkörpern sind im Zwischenbericht [U 5] beschrieben. Der vorliegende Bericht enthält Aussagen zu den weiteren Untersuchungen / Prüfungen an Bauteilprüfkörpern. Die Ergebnisse der gesamten Druckprüfungen an Klein- und Bauteilprüfkörper sind in Tabelle 7 als Mittelwerte zusammengefasst.

Tabelle 7: Anzahl, Abmessungen, Rohdichte und Druckfestigkeit sowie Variationskoeffizient des Stampflehms in Abhängigkeit der Schlankheit λ

Anzahl	Breite	Länge	Höhe	Schlankheit	Rohdichte	Druckfestigkeit*	Variationskoeffizient
n	b	l	h	λ	ρ	f	V
-	cm	cm	cm	-	kN/m ³	N/mm ²	%
12	20	20	20	1,0	2.166	3,47	16
10		15**	30	2,0	2.186	2,49	8
2	40	100	100	2,5	2.095	1,76	12
3	10	100	100	10,0	2.000	1,57	36
3	15	141	200	13,3	2.189	1,18	24

* Mittelwerte ** Durchmesser

Der Elastizitätsmodul wurde an 9 Zylinderprüfkörpern ermittelt. Im Mittel wurde ein E-Modul mit 2.901 N/mm² mit einem Variationskoeffizient von 23 % ermittelt.

Oldenburg, den 14.03.2023


Prof. Dr.-Ing. H. Wigger
(Geschäftsführer | Institutsleiter)

i. V. 
Murat Ince, M. Sc.
(Sachbearbeiter)

7 Anlagen A | Bilder

7.1 Anlage A | Würfel und Zylinder

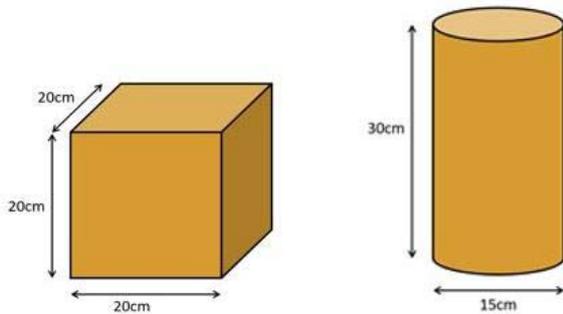


Bild A 1: Kleinprüfkörper Skizze



Bild A 2: Kleinprüfkörper Schalungsformen

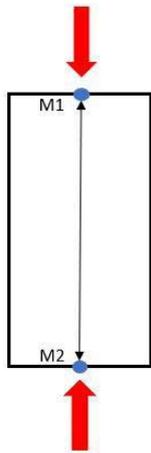


Bild A 3: Messpunkte Kriechverhalten



Bild A 4: Prüfstand Kriechverhalten Zylinder

7.2 Anlage A | Bauteilprüfkörper– Wand breit

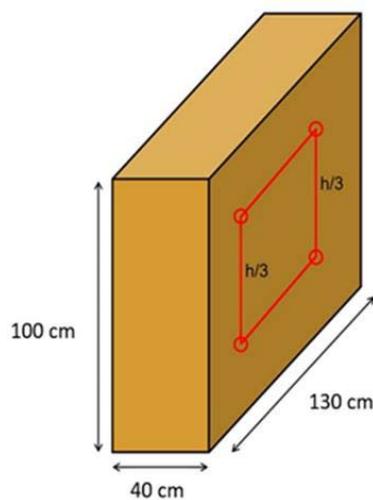


Bild A 5: Bauteilprüfkörperskizze $\lambda = 2,5$

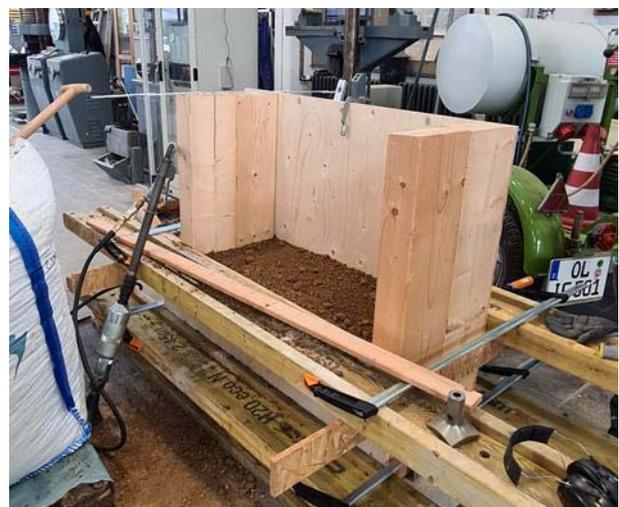


Bild A 6: Schalungssystem Holz / Platten



Bild A 7: Schiefstellung des Prüfkörpers mit Holzschalung



Bild A 8: Schalungssystem aus Stahl



Bild A 9: Bauteilprüfkörper ($\lambda = 2,5$) nach Herstellung



Bild A 10: Bauteilprüfkörper ($\lambda = 2,5$) Wand 2 nach der Prüfung

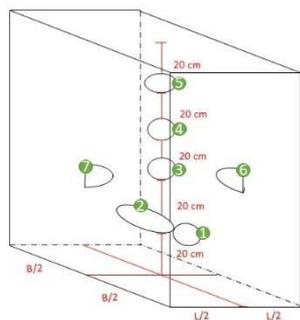


Bild A 11: Segmentprobenlage Feuchte Wand 1

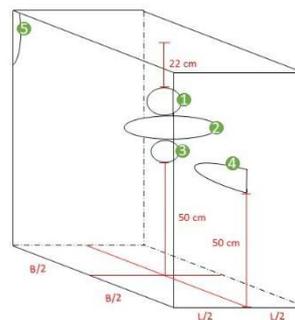


Bild A 12: Segmentprobenlage Feuchte Wand 2

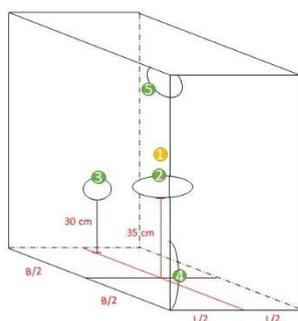


Bild A 13: Segmentprobenlage Feuchte Wand 3

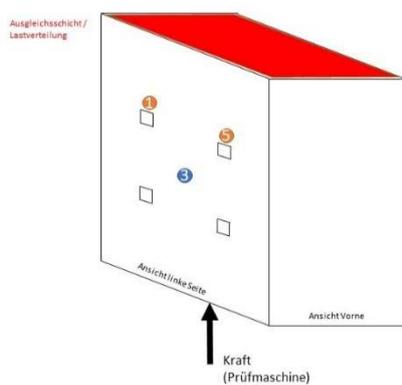


Bild A 14: Anordnung der Wegaufnehmer $\lambda = 2,5$ (Vorderseite)

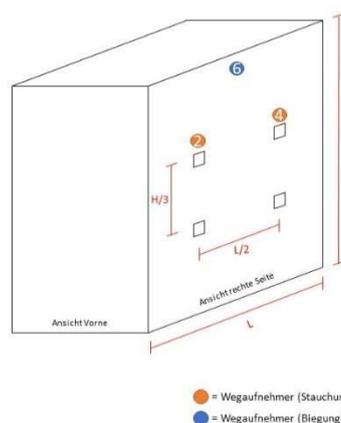


Bild A 15: Anordnung der Wegaufnehmer $\lambda = 2,5$ (Rückseite)

7.3 Anlage A | Bauteilprüfkörper – Wand schmal

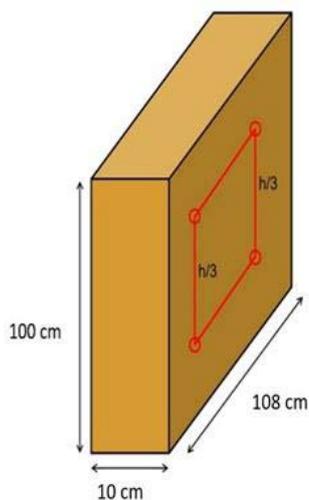


Bild A 16: Bauteilprüfkörperskizze $\lambda = 10$



Bild A 17: Bauteilprüfkörper $\lambda=10$



Bild A 18: Bauteilprüfkörper in der Prüfmaschine



Bild A 19: Bauteilprüfkörper in der Prüfmaschine

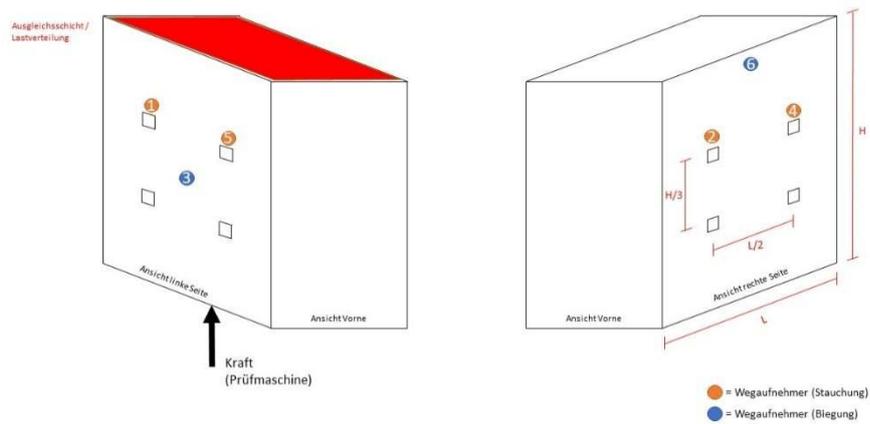


Bild A 20: Anordnung der Wegaufnehmer

7.4 Anlage A | Bauteilprüfkörper – Wand hoch

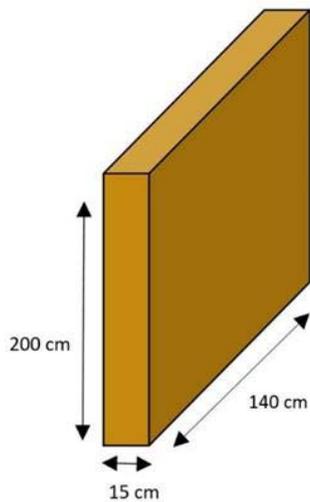


Bild A 21: Bauteilprüfkörperskizze $\lambda=13,33$



Bild A 22: Bauteilprüfkörper $\lambda=13,33$



Bild A 23: Bauteilprüfkörper $\lambda=13,33$



Bild A 24: Bauteilprüfkörper $\lambda=13,33$



Bild A 25: Bauteilprüfkörper $\lambda=13,33$



Bild A 26: Bauteilprüfkörper $\lambda=13,33$

8 Anlage B | Untersuchungsergebnisse – Feuchtegehalte

8.1 Anlage B | Feuchtegehalte Kleinprüfkörper

Tabelle A 1: Feuchtegehalte der Zylinder (Kleinprüfkörper) $\lambda = 2,0$

Probe	Masse			Wassergehalt
	feucht	trocken	Wasser	
	g	g	g	M.-%
PS				
1	11.632,2	11.498,2	134,0	1,17
2	11.409,2	11.284,8	124,4	1,10
3	11.375,1	11.234,0	141,1	1,26
4	11.523,0	11.387,0	136,0	1,19
5	11.531,9	11.404,4	127,5	1,12
6	11.713,3	11.584,8	128,5	1,11
			Mittelwert	1,16

8.2 Anlage B | Bauteilprüfkörpern – Wand breit

Tabelle A 2: Materialfeuchten der Bauteilprüfkörper – Wand breit ($\lambda = 2,5$) – Wand 1

Probe	Masse			Wassergehalt
	feucht	trocken	Wasser	
	g	g	g	M.-%
Nr.				
W 1.1 (I)	2518,10	2444,12	73,98	3,03
W 1.2 (I)	436,59	424,08	12,51	2,95
W 1.3 (I)	601,71	584,21	17,50	3,00
W 1.4 (I)	422,86	412,46	10,40	2,52
W 1.5 (I)	528,87	516,25	12,62	2,44
W 1.6 (A)	606,18	597,20	8,98	1,50
W 1.7 (A)	461,53	454,82	6,71	1,48
I - Innen	A - Außen		Mittelwert (innen)	2,79
			Mittelwert (außen)	1,49

Tabelle A 3: Materialfeuchten der Bauteilprüfkörper – Wand breit ($\lambda = 2,5$) – Wand 2

Probe	Masse			Wassergehalt
Nr.	feucht	trocken	Wasser	M.-%
	g	g	g	
W 2.1 (M)	1923,48	1894,33	29,15	1,54
W 2.2 (M)	7664,80	7556,80	108,00	1,43
W 2.3 (M)	1364,41	1345,32	19,09	1,42
W 2.4 (A)	2100,42	2072,88	27,54	1,33
W 2.5 (A)	1547,45	1531,39	16,06	1,05
I - Innen M - Mitte A - Außen	Mittelwert			1,35

Tabelle A 4: Materialfeuchten der Bauteilprüfkörper – Wand breit ($\lambda = 2,5$) – Wand 3

Probe	Masse			Wassergehalt
Nr.	feucht	trocken	Wasser	M.-%
	g	g	g	
W 3.1 (I)	12.108,33	11.936,83	171,50	1,44
W 3.2 (M)	1.909,90	1.890,03	19,87	1,05
W 3.3 (A)	933,29	923,31	9,98	1,08
W 3.4 (A)	3.294,56	3.258,18	36,38	1,12
W 3.5 (A)	1.088,41	1.078,56	9,85	0,91
I - Innen M - Mitte A - Außen	Mittelwert			1,12

8.3 Anlage B | Bauteilprüfkörpern – Wand schmal

Tabelle A 5: Materialfeuchten der Bauteilprüfkörper – Wand schmal ($\lambda = 10,0$)

Probe	Masse			Wassergehalt
Nr.	feucht	trocken	Wasser	M.-%
	g	g	g	
W 1.1	534,30	527,57	6,73	1,28
W 1.2	433,87	428,31	5,56	1,30
W 1.3	491,99	485,98	6,01	1,24
W 2.1	542,49	534,83	7,66	1,43
W 2.2	511,92	504,50	7,42	1,47
W 2.3	581,16	573,47	7,69	1,34
W 3.1	437,40	431,58	5,82	1,35
W 3.2	416,17	411,25	4,92	1,20
W 3.3	517,17	510,55	6,62	1,30
	Mittelwert			1,32

8.4 Anlage B | Bauteilprüfkörper – Wand hoch

Tabelle A 6: Einbaufeuchte der Bauteilprüfkörper – Wand hoch ($\lambda = 13,3$)

Probe	Masse			Wassergehalt
Nr.	feucht	trocken	Wasser	M.-%
	g	g	g	
W 1.1	423,31	395,38	27,93	7,06
W 1.2	381,41	353,47	27,94	7,90
W 1.3	477,96	442,29	35,67	8,06
W 2.1	392,74	366,40	26,34	7,19
W 3.1	368,38	340,46	27,92	8,20
W 3.2	330,59	304,70	25,89	8,50
W 3.3	455,23	425,79	29,44	6,91
W 3.4	384,87	354,93	29,94	8,44
			Mittelwert	7,78

Tabelle A 7: Feuchtegehalt am Prüftag – Wand hoch ($\lambda = 13,3$)

Probe	Masse			Wassergehalt	Mittel
Nr.	feucht	trocken	Wasser	M.-%	M.-%
	g	g	g		
W 1.1	5465,00	5400,40	64,60	1,20	1,24
W 1.2	4835,40	4777,40	58,00	1,21	
W 1.3	6017,60	5943,10	74,50	1,25	
W 1.4	5223,50	5158,70	64,80	1,26	
W 1.5	3765,00	3718,30	46,70	1,26	
W 2.1	1985,60	1961,10	24,50	1,25	1,20
W 2.2	3705,80	3658,70	47,10	1,29	
W 2.3	3191,70	3153,70	38,00	1,20	
W 2.4	2692,70	2662,70	30,00	1,13	
W 2.5	3085,90	3050,80	35,10	1,15	
W 3.1	2025,90	2006,30	19,60	0,98	1,05
W 3.2	1227,00	1214,70	12,30	1,01	
W 3.3	1434,60	1418,10	16,50	1,16	
W 3.4	2597,10	2569,10	28,00	1,09	
W 3.5	2136,60	2115,30	21,30	1,01	
			Mittelwert	1,16	

9 Anlage C | Untersuchungsergebnisse – Kriechen

10 Anlage C | Untersuchungsergebnisse – Druckfestigkeiten

10.1 Anlage C | Bauteilprüfkörper – Wand breit

Tabelle A 8: Prüfmuster, Bauteilfeuchte, Abmessungen, Rohdichte und Druckfestigkeit der Prüfkörper mit einer Schlankheit von $\lambda = 2,5$

Prüfkörper	Herstell-datum	Prüfdatum	Prüfmuster	Bauteil-feuchte	Höhe	Länge	Breite	Fläche	Gewicht	Rohdichte	Bruchlast	Druck-festigkeit
			Tage	M.-%								
W 1	26.10.2021	09.02.2022	106	0-10cm: 1,5	1,00	0,93	0,40	0,370	775	2095	461	1,25
				10-20cm: 2,8								
W 2	27.10.2021	15.09.2022	323	1,4	1,00	0,93	0,40	0,370	780	2108	596,2	1,61
W 3	20.12.2021	16.09.2022	270	1,1	1,00	0,93	0,40	0,370	770	2081	709,8	1,92

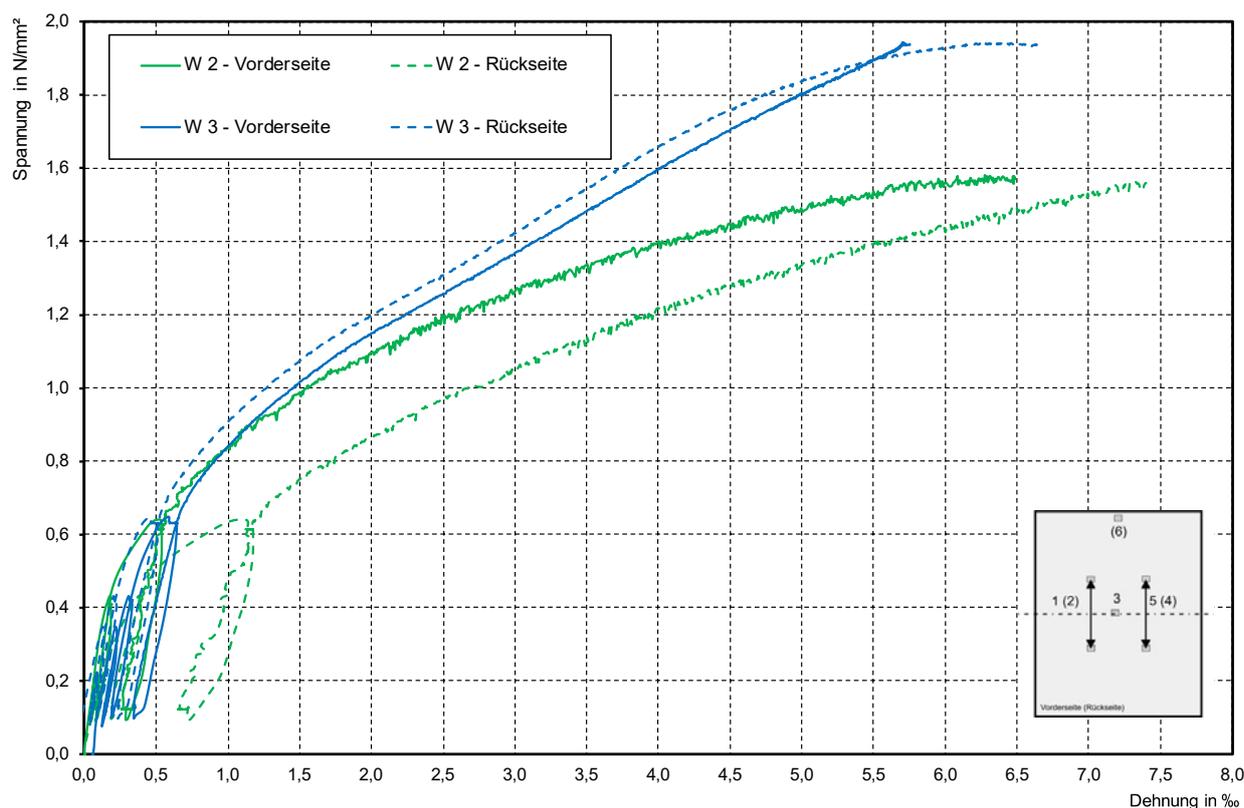


Bild A 27: Spannungs-Dehnungslinien von Wand 2 und Wand 3 mit einer Schlankheit $\lambda = 2,5$

10.2 Anlage C | Bauteilprüfkörper – Wand schmal

Tabelle A 9: Prüfalter, Bauteilfeuchte, Abmessungen, Rohdichte und Druckfestigkeit der Prüfkörper mit einer Schlankheit von $\lambda = 10,0$

Prüfkörper	Herstell-datum	Prüfdatum	Prüfalter	Bauteil-feuchte	Höhe	Länge	Breite	Fläche	Gewicht	Rohdichte	Bruchlast	Druck-festigkeit
			Tage	M.-%								
W 1	21.12.2021	03.02.2022	44	1,27	1,00	0,99	0,10	0,099	190,4	1927	136	1,38
W 2	21.12.2021	04.02.2022	45	1,41	1,00	1,01	0,10	0,101	216,2	2145	222	2,20
W 3	22.12.2021	07.02.2022	47	1,28	1,00	0,98	0,10	0,098	189,8	1929	111	1,13

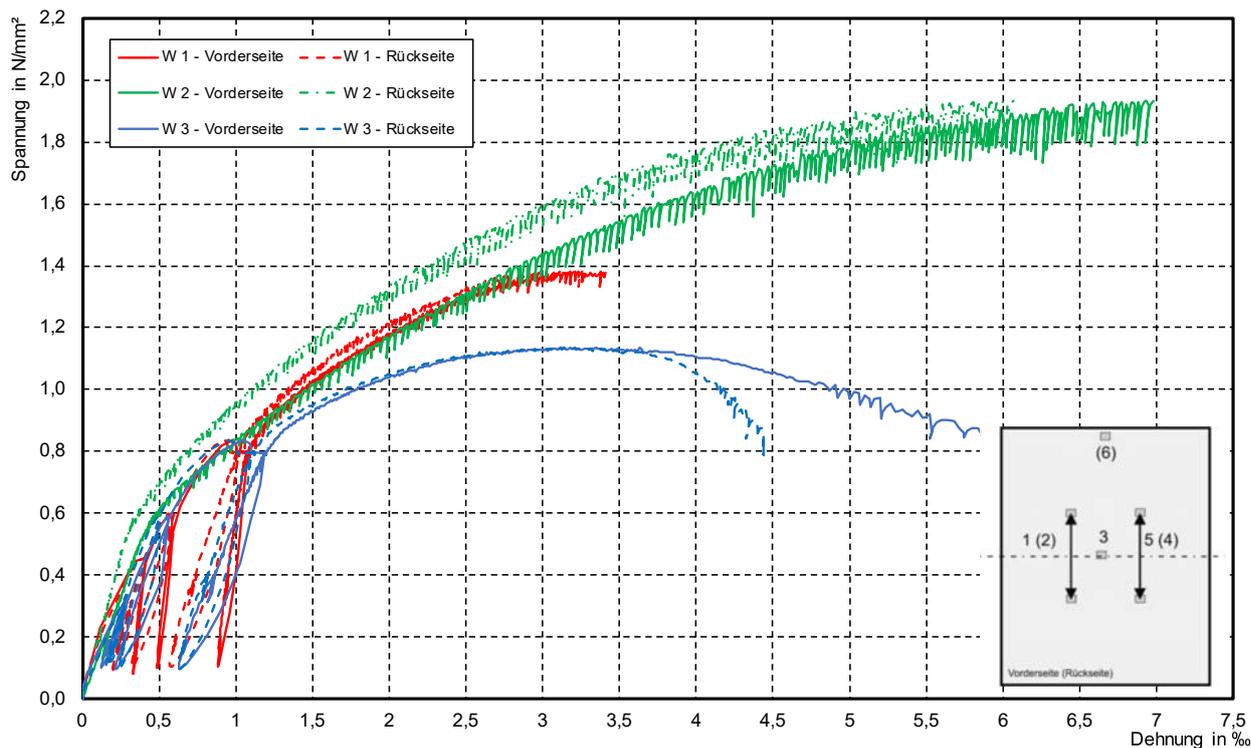


Bild A 28: Spannungs- Dehnungslinien auf der Vorder- und Rückseite von Wand 1, Wand 2 und Wand 3 mit einer Schlankheit $\lambda = 10,0$

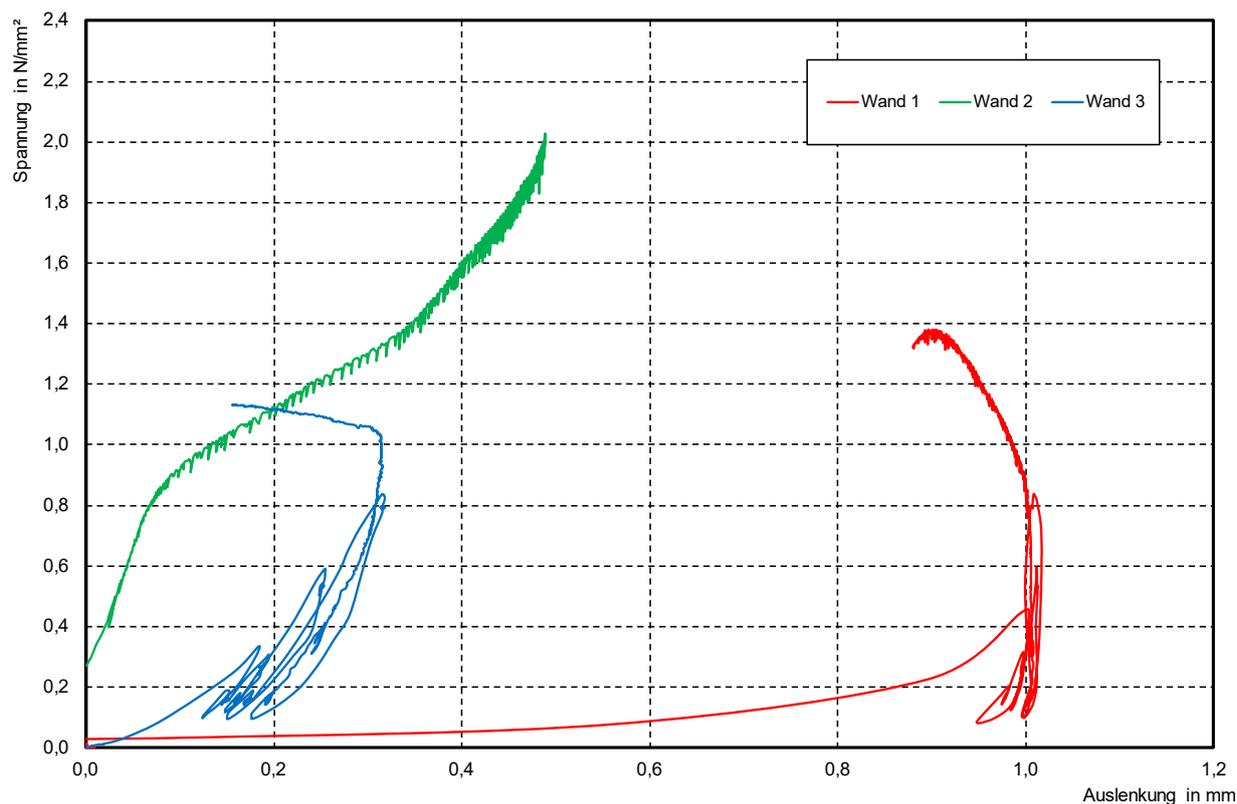


Bild A 29: Auslenkung in Wandmitte Wand 1, Wand 2 und Wand 3 mit einer Schlankheit $\lambda = 10,0$

10.3 Anlage C | Bauteilprüfkörper – Wand hoch

Tabelle A 10: Prüfalter, Bauteilfeuchte, Abmessungen, Rohdichte und Druckfestigkeit der Prüfkörper mit einer Schlankheit von $\lambda = 13,3$

Prüfkörper	Herstell-datum	Prüfdatum	Prüfalter	Bauteil-feuchte	Höhe	Länge	Breite	Fläche	Gewicht	Rohdichte	Bruchlast	Druck-festigkeit
			Tage	M.-%	m	m	m	m ²	kg	kg/m ³	kN	N/mm ²
W 1	09.03.2022	16.11.2022	252	1,24	1,99	1,41	0,15	0,211	904,8	2157	200	0,95
W 2	10.03.2022	17.11.2022	252	1,20	1,98	1,41	0,15	0,211	906,6	2173	231	1,10
W 3	10.03.2022	12.12.2022	277	1,05	2,00	1,41	0,15	0,211	943,6	2239	314	1,49

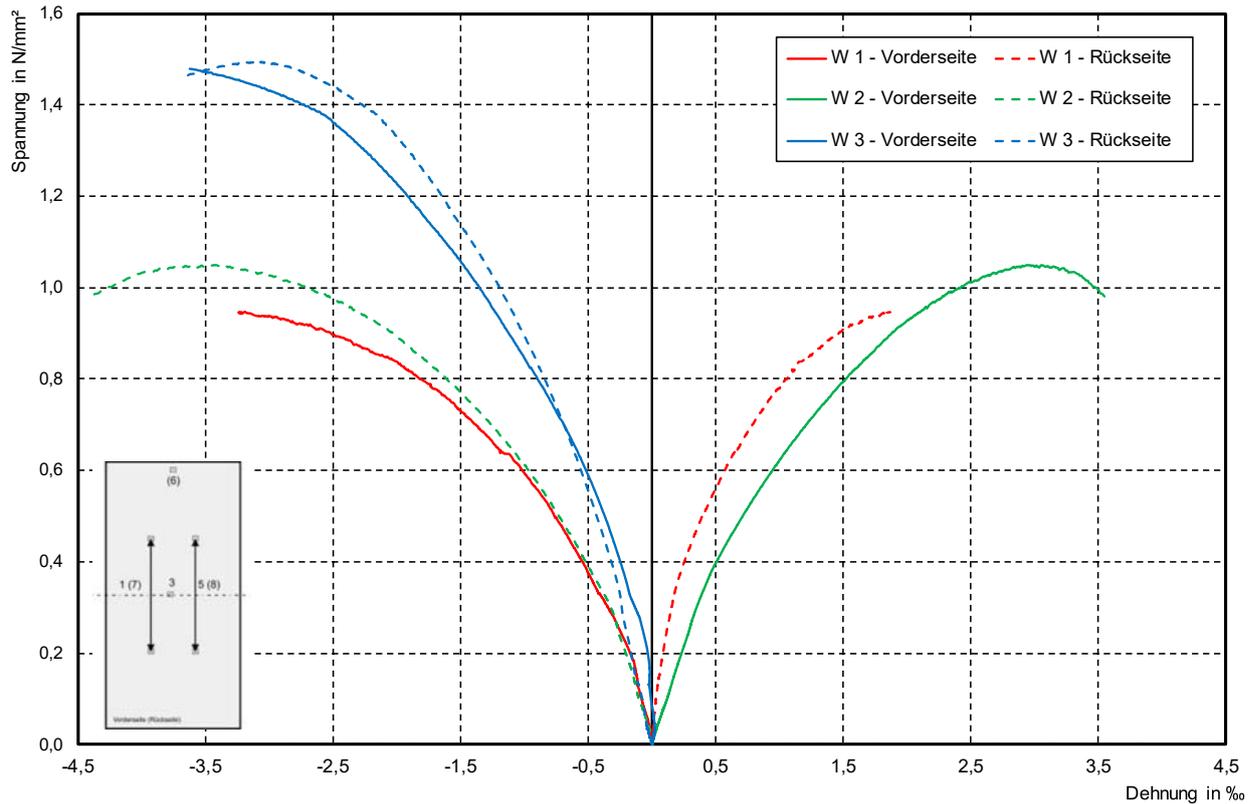


Bild A 30: Spannungs- Dehnungslinien auf der Vorder- und Rückseite von Wand 1, Wand 2 und Wand 3 mit einer Schlankheit $\lambda = 13,3$

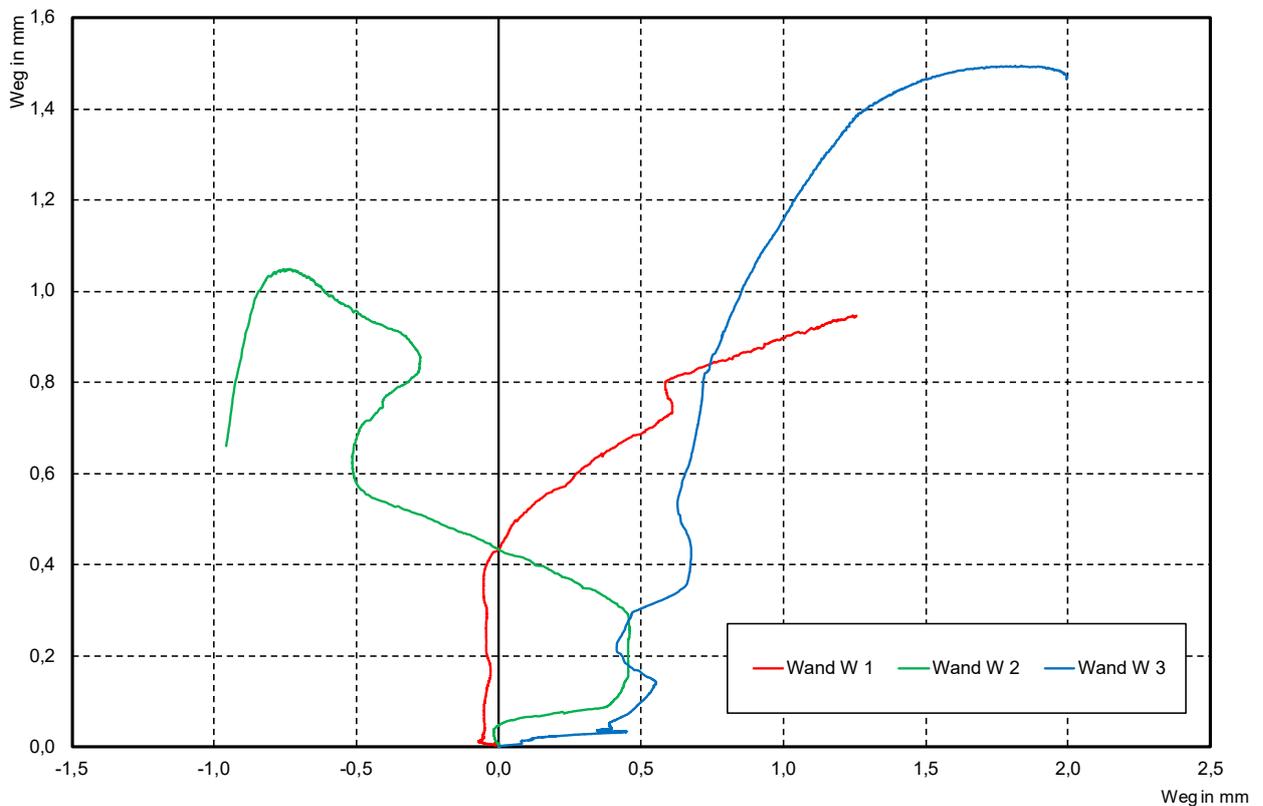


Bild A 31: Auslenkung in Wandmitte Wand 1, Wand 2 und Wand 3 mit einer Schlankheit $\lambda = 13,3$

10.4 Anlage C | Würfel

Tabelle A 11: Statistische Auswertung der untersuchten Würfel bei unterschiedlicher Luftfeuchte [U 5]

Prüfkörper	Anzahl	Mittelwert	Standard- abweichung	Variations- koeffizient	k_n -Wert für 5%-Quantil	char. Druckfestigkeit 5%-Quantil
		m_x	s_x	V_x	-	$X_{k(n)}$
		N/mm ²	N/mm ²	-	-	N/mm ²
Würfel (23°C / 80% r. F.)	10	2,75	0,17	0,06	1,92	2,42
Würfel (23°C / 50% r. F.)	12	3,47	0,55	0,16	1,77	2,51
Zylinder (23°C / 50% r. F.)	10	2,49	0,20	0,08	1,92	2,10

11 Anlage D | Kalibrierung



HaBu Hauck Prüftechnik GmbH
Im Weichlingsgarten 20a
67127 Hochdorf - Assenheim

Kalibrierschein / Calibration Certificate

Mitglied im / Member of the

Deutschen Kalibrierdienst **DKD**




Deutsche
Akkreditierungsstelle
D-K-17344-01-00

Habu Hauck Prüftechnik GmbH
Im Weichlingsgarten 20a
D - 67126 Hochdorf Assenheim

Z1197

D-K-
17344-01-00

2020-06

Gegenstand <i>Object</i>	Druckprüfmaschine für Baustoffe	<p>Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI). Die DAKKS ist Unterzeichner der multilateralen Übereinkommen der European co-operation for Accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine. Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.</p> <p><i>This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI). The DAKKS is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of calibration certificates.</i></p> <p><i>The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.</i></p>
Hersteller <i>Manufacturer</i>	Form + Test Prüfsysteme	
Typ <i>Type</i>	SWP4000VE	
Fabrikat/Serien-Nr. <i>Serial number</i>	9647	
Inventar-Nummer <i>Inventory-number</i>	1011	
Auftraggeber <i>Customer</i>	Jade Hochschule Zeughausstraße 15 26121 Oldenburg	
Auftragsnummer <i>Order No.</i>	60381/0620	
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines <i>Number of pages of the certificate</i>	4	
Datum der Kalibrierung <i>Date of calibration</i>	2020-06-22	

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine sind bei Nennung des für die Freigabe Verantwortlichen in Klarschrift auch ohne Unterschrift gültig.
This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the issuing laboratory. Calibration certificates with the full name of the approval responsible person are valid without signature.

Datum <i>Date</i>	Freigabe des Kalibrierscheins durch <i>Approval of the certificate of calibration by</i>	Bearbeiter <i>Person in charge</i>
14.07.2020	 H. Hauck	 C. Zimmermann

HaBu Hauck Prüftechnik GmbH
67126 Hochdorf – Assenheim

Kalibrieren mit know how
info@habu-prueftechnik.de

Fon: 06231 / 4031-77
Fax: 06231 / 4031-76



HaBu Hauck Prüftechnik GmbH
Im Weichlingsgarten 20a
67127 Hochdorf - Assenheim

Kalibrierschein / Calibration Certificate

Mitglied im / Member of the

Deutschen Kalibrierdienst **DKD**



Deutsche
 Akkreditierungsstelle
 D-K-17344-01-00

Habu Hauck Prüftechnik GmbH
Im Weichlingsgarten 20a
D - 67126 Hochdorf Assenheim

Kalibrierzeichen
Calibration mark

Z1205
D-K-17344-01-00
2020-06

Gegenstand <i>Object</i>	Druckprüfmaschine für Baustoffe
Hersteller <i>Manufacturer</i>	Mohr & Federhaff/ SSM Prüftechnik
Typ <i>Type</i>	BPPS 60
Fabrikat/Serien-Nr. <i>Serial number</i>	6800
Inventar-Nummer <i>Inventory-number</i>	1002
Auftraggeber <i>Customer</i>	Jade Hochschule Zeughausstraße 15 26121 Oldenburg
Auftragsnummer <i>Order No.</i>	60381/0620
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines <i>Number of pages of the certificate</i>	4
Datum der Kalibrierung <i>Date of calibration</i>	2020-06-23

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI). Die DAkkS ist Unterzeichner der multilateralen Übereinkommen der European co-operation for Accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine. Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.

This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI). The DAkkS is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of calibration certificates. The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine sind bei Nennung des für die Freigabe Verantwortlichen in Klarschrift auch ohne Unterschrift gültig.

This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the issuing laboratory. Calibration certificates with the full name of the approval responsible person are valid without signature.

Datum <i>Date</i>	Freigabe des Kalibrierscheins durch <i>Approval of the certificate of calibration by</i>	Bearbeiter <i>Person in charge</i>
14.07.2020	 H. Hauck	 C. Zimmermann
HaBu Hauck Prüftechnik GmbH 67126 Hochdorf – Assenheim	Kalibrieren mit know how info@habu-prueftechnik.de	Fon: 06231 / 4031-77 Fax: 06231 / 4031-76

Anlage A4:

Abschlussbericht

DBU-Projekt AZ 35442/02

Gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU)

Arbeitspaket 6: Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für die Umsetzbarkeit ökologischer Konstruktionen bei Großprojekten für das Material Lehm

Gutachterliche Stellungnahme zur Zustimmung im Einzelfall – Tragende Stampflehmwände mit Brandschutzanforderungen im Innenbereich – Mechanische und physikalische Eigenschaften des Stampflehms

Freilichtmuseum Detmold – Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude

Jäger Ingenieure GmbH, Radebeul

Im Auftrag von: LWL – Bau- und Liegenschaftsbetrieb, Münster

Autoren: T. Burkert und W. Jäger

06.04.2023

Gutachterliche Stellungnahme

Zustimmung im Einzelfall für

Tragende Stampflehmwände mit Brandschutzanforderungen

Hier: **Mechanische und physikalische Eigenschaften des Stampflehms**

**BV: Freilichtmuseum Detmold * Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude
D – 32760 Detmold, Paderborner Straße**

Versuchsdurchführende Einrichtung:

Institut für Materialprüfung und Bauwerkserhaltung GmbH
Herr Prof. Dr.-Ing. Heinrich Wigger
Zeughausstraße 15
26121 Oldenburg
Tel.: +0441 711 31
Fax.: +0441 762 03
E-Mail: info@ifmb-ol.de

Folgende Berichte wurden vom Institut für Materialprüfung und Bauwerkserhaltung erarbeitet:

1. Wigger, H.; Ince, M.: Freilichtmuseum Detmold – Landesmuseum für Alltagskultur. Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude. Mechanische und physikalische Eigenschaften des Stampflehms. Abschlussbericht Nr.: 0075/21 (IMS/JB/HW). Im Auftrag von: LWL – Bau- und Liegenschaftsbetrieb, Warenhofer Straße 24, 48145 Münster. Institut für Materialprüfung und Bauwerkserhaltung GmbH, Zeughausstraße 15, 26121 Oldenburg. 39 Seiten, Oldenburg, 14.03.2023.
2. Wigger, H.; Relishkis, A.: Freilichtmuseum Detmold – Landesmuseum für Alltagskultur. Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude. Mechanische Eigenschaften des Stampflehms. 1. Zwischenbericht Nr.: 0075/21 ME (IMS/AR/HW) Reviewed (10.03.2023). Im Auftrag von: LWL – Bau- und Liegenschaftsbetrieb, Warenhofer Straße 24, 48145 Münster. Institut für Materialprüfung und Bauwerkserhaltung GmbH, Zeughausstraße 15, 26121 Oldenburg. 42 Seiten, Oldenburg, 14.03.2023.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	3
2 Erläuterungen zu den Versuchen	6
2.1 Durchgeführte Untersuchungen	6
2.2 Ergebnisse	6
3 Ableitungen aus den Versuchsergebnissen	10
3.1 Ermittlung von Design Werten für die Druckfestigkeit	10
3.1.1 Ermittlung des Design-Wertes aus der charakteristischen Würfeldruckfestigkeit	10
3.1.2 Ermittlung des Design-Wertes aus der charakteristischen Zylinderdruckfestigkeit	12
3.1.3 Ermittlung des Design-Wertes nach E DIN 18940:2022-10 für tragendes Lehmsteinmauerwerk	13
3.2 Hinweise für die Nachweisführung der Stampflehmwand	15
3.3 Eigene Plausibilitätsuntersuchungen	16
4 Weitere wichtige Materialparameter	17
4.1 Kennwerte aus dem Versuchsprogramm	17
4.2 Kennwerte aus der Fachliteratur	18
5 Qualitätssicherung auf der Baustelle	19
6 Fazit	21
7 Literatur	22

1 Einleitung

Beim Neubau des Freilichtmuseums in Detmold sollen im Inneren des Eingangs- und Ausstellungsgebäudes tragende und aussteifende Lehmwände zur Ausführung kommen, die darüber hinaus in feuerhemmender Bauweise erstellt werden müssen (siehe Bild 1 und 2).

Die tragenden Lehmwände dienen als Auflager für das Dachtragwerk des Ausstellungshauses. Hierfür werden die oberen Wandabschlüsse als Stahlbetonrähme ausgebildet. Lasten aus den angrenzenden Dachträgern sollen planmäßig zentrisch in die Rähme eingeleitet werden. Von Oberkante der Rohbaugründung bis Unterkante der Rähme ergeben sich Wandhöhen von bis zu ca. 7,65 m. Die Gesamtwandhöhe bis zur Traufe beträgt in etwa 9,00 m. Die Ausführung soll in Stampflehmbauweise vor Ort erfolgen, wobei im oberen Bereich der Wände auch Stampflehm-Fertigteile zum Einsatz kommen sollen (siehe Bild 4).



Bild 1 Ansicht des Gebäudekomplexes mit mittiger Treppenanlage und dem links gelegenen Ausstellungshaus

Gemäß dem vorliegenden Brandschutzkonzept nach [1] ist das Ausstellungshaus, was im Wesentlichen zur Veranlassung für die Beantragung der Zustimmung im Einzelfall (ZiE) führte, baurechtlich in die Gebäudeklasse 3 im Sinne von §2 (3) BauO NRW [3] einzustufen. Die mittig im Ausstellungshaus angeordneten 60 cm dicken, tragenden Stampflehmwände müssen nach BauO NRW feuerhemmend F30 ausgeführt werden (siehe auch Bild 3).

Die aktuelle Architektur-Planung hinsichtlich der tragenden Stampflehmwände ist in den nachfolgenden Bildern 2 bis 4 nach [7] dargestellt. Im Grundriss und Schnitt sind die Stampflehmwände rot bzw. braun dargestellt, in den beiden Wandabwicklungen in Bild 4 jeweils gelb und grün (Stampflehm-Fertigteile).

Für den Einsatz von Lehmwänden liegen hinsichtlich des verwendeten Materials, den geometrischen Randbedingungen sowie den brandschutztechnischen Eigenschaften aktuell keine ausreichenden normativen Regelungen vor. Diesbezüglich muss für die geplante Ausführungsweise der tragenden Stampflehmwand eine Zustimmung im Einzelfall erwirkt werden. Diese ZiE unterteilt sich in 2 wesentliche Teile, in einen ersten Part, in dem Versuche zum Brandverhalten durchgeführt wurden und in einen zweiten Part, der zur Ermittlung wesentlicher Materialparameter von Stampflehm diene. Die Brandversuche werden hier nicht betrachtet, dazu gibt es eine eigene Gutachterliche Stellungnahme (siehe ausführlich [26]).

In Verbindung mit der ZiE müssen alle erforderlichen bautechnischen Nachweise für das Bauprodukt erbracht werden. Hierfür war die Ermittlung von wesentlichen mechanischen und physikalischen Eigenschaften für den Stampflehm erforderlich. Diese wurden in einem umfangreichen Prüfprogramm am IfMB in Oldenburg ermittelt (siehe hierzu ausführlich [23] und [24]). Parallel dazu wurden auch noch wesentliche

bauphysikalische Materialkennwerte des Stampflehms bestimmt [25]. Das Prüfprogramm wurde in enger Zusammenarbeit zwischen dem Team von Prof. Wigger (IfMB), Herrn Prof. Schulz von der Technischen Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Standort Detmold, und den beiden Unterzeichnenden ausgearbeitet. Darüber hinaus wurde der Umfang der Prüfungen mit der Arbeitsgruppe Lehm unter Mitarbeit des zuständigen Tragwerksplaners, Herrn Rosenkranz (Kempen-Krause Beratende Ingenieure GmbH, Köln), des zuständigen Prüfindgenieurs, Herrn Eisler (Engels Ingenieure Detmold), des Architekten, Herrn Waigand (ACMS Architekten GmbH, Wuppertal), Herrn Honermann (Fa. Lehm Ton Erde Baukunst GmbH, Schlins/ Österreich) und des Lehmlieferanten, Herrn Meyer (Fa. Conluto, Blomberg), besprochen und abgestimmt.

Die Ergebnisse der Stampflehmversuche wurden in dem 1. Zwischenbericht [23] und dem Abschlussbericht [24] dokumentiert.

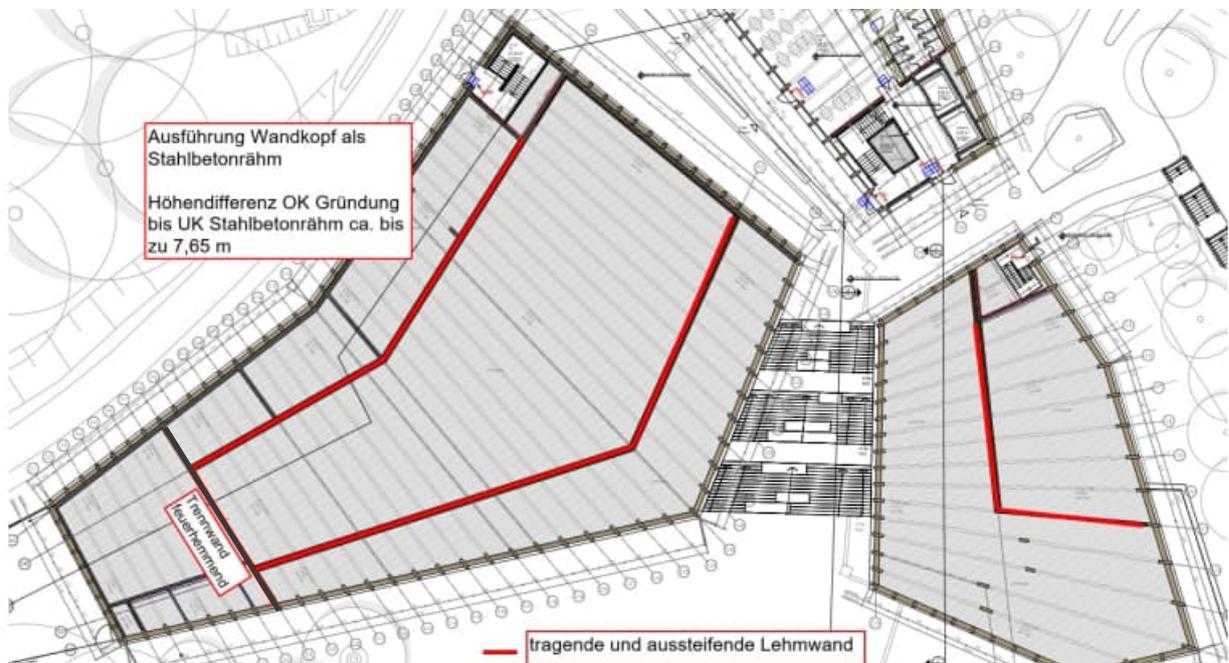
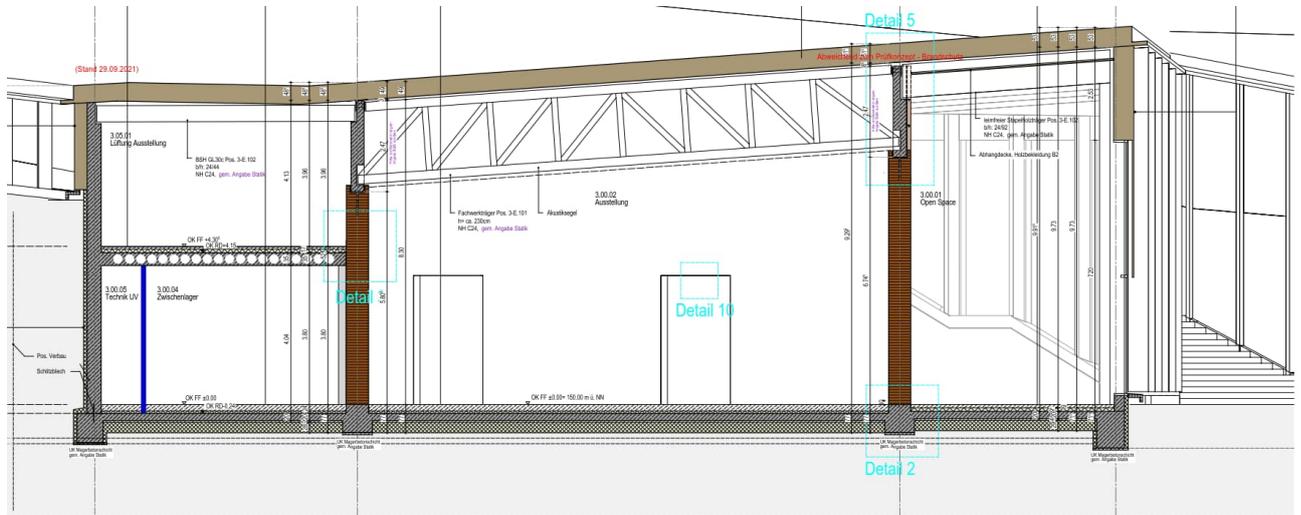
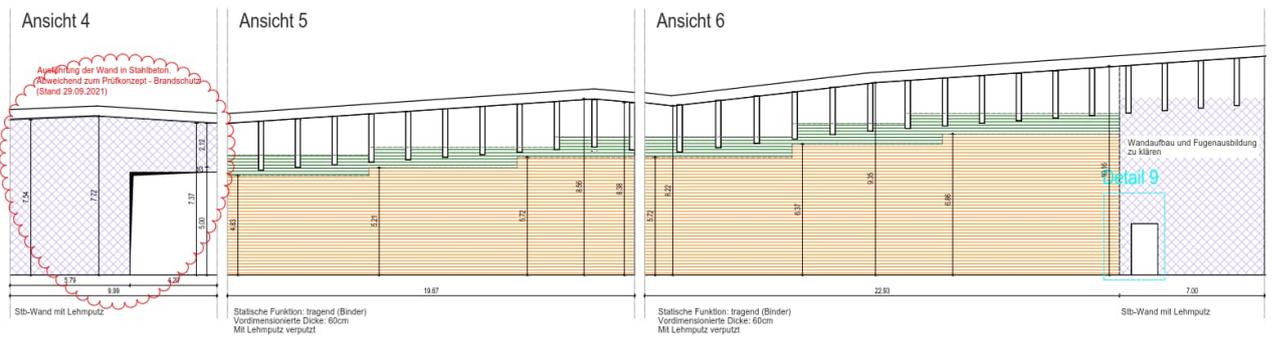


Bild 2 Grundriss Eingangs- und Empfangsgebäude mit tragenden und aussteifenden Lehmwänden (rot) nach [2]



Schnitt D-D, M: 1:50

Bild 3 Gebäudequerschnitt durch das Ausstellungsgebäude mit den beiden tragenden Lehmwänden mit Brandschutzanforderungen F30 in braun dargestellt (nach [7])



Wandwicklung Ausstellung, M: 1:100



Wandwicklung Open Space, M: 1:100

Bild 4 Wandabwicklungen der beiden tragenden Lehmwände aus Bild 2 (nach [7])

2 Erläuterungen zu den Versuchen

2.1 Durchgeführte Untersuchungen

Im Zuge des gesamten Untersuchungsprogrammes wurden Versuche an kleinformatigen Prüfkörpern und Bauteilprüfkörpern (großformatigen Prüfkörpern) durchgeführt.

Dabei wurden im 1. Zwischenbericht die Ergebnisse nachfolgender Materialkennwertbestimmungen dokumentiert:

- Rohdichte an Würfeln der Kantenlänge 200 mm bei 23 °C/ 80% r.F.,
- Rohdichte an Zylindern, Durchmesser 150 mm, Höhe 300 mm bei 23 °C/ 50% r.F.,
- Gleichgewichtsfeuchte an Würfeln und Zylindern,
- Charakteristische Druckfestigkeit an Würfeln der Kantenlänge 200 mm bei 23 °C/ 80% r.F.,
- Charakteristische Druckfestigkeit an Zylindern, Durchm. 150 mm, Höhe 300 mm bei 23 °C/ 50% r.F.,
- Statischer Elastizitätsmodul an Zylindern, Durchmesser 150 mm, Höhe 300 mm.

Im Abschlussbericht wurden die Ergebnisse folgender Materialkennwertbestimmungen dokumentiert:

- Kriechverhalten an Zylindern, Durchmesser 150 mm, Höhe 300 mm,
- Feuchtegehalte an Zylindern, Durchmesser 150 mm, Höhe 300 mm,
- Feuchtegehalte an Bauteilprüfkörpern, Wand breit (H/B/L = 100 cm/ 40 cm/ 108 cm) mit $\lambda = 2,5$,
- Feuchtegehalte an Bauteilprüfkörpern, Wand schmal (H/B/L = 100 cm/ 10 cm/ 108 cm) mit $\lambda = 10,0$,
- Feuchtegehalte an Bauteilprüfkörpern, Wand hoch (H/B/L = 200 cm/ 15 cm/ 140 cm) mit $\lambda = 13,3$,
- Rohdichte an Bauteilprüfkörpern,
- Druckfestigkeit an Bauteilprüfkörpern, Wand breit (H/B/L = 100 cm/ 40 cm/ 108 cm) mit $\lambda = 2,5$,
- Druckfestigkeit an Bauteilprüfkörpern, Wand schmal (H/B/L = 100 cm/ 10 cm/ 108 cm) mit $\lambda = 10,0$,
- Druckfestigkeit an Bauteilprüfkörpern, Wand hoch (H/B/L = 200 cm/ 15 cm/ 140 cm) mit $\lambda = 13,3$.

Wie bereits im Zusammenhang mit den Brandversuchen erläutert, war es aufgrund der realen Abmessungen der Wand im geplanten Freilichtmuseum nicht möglich, einen 1:1-Prüfkörper für die Ermittlung mechanischer Materialkennwerte, im Wesentlichen der Druckfestigkeit der Stampflehmwand zu errichten und zu beproben. Analog zu den Brandversuchen wurden zur Druckfestigkeitsermittlung Prüfkörper maßstabsgerecht über die Schlankheit verkleinert und im Druckversuch abgedrückt. Dabei konnte versuchstechnisch bedingt am IfMB in Oldenburg eine maximale Prüfkörperhöhe von 2,00 m realisiert werden.

Insgesamt wurde eine Prüfserie mit Schlankheiten $\lambda = 1,0$ (Würfel); 2,0 (Zylinder); 2,5 (breite Wand); 10,0 (schmale Wand) und von der realen Wandgeometrie abgeleitet mit $\lambda = 13,3$ (hohe Wand) hergestellt. Diese Vorgehensweise wurde mit den Gutachtern abgestimmt. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse reichen für die weitere Bemessung der Wand (Stand sicherheitsnachweise) mit hinreichender Sicherheit aus.

2.2 Ergebnisse

Die wichtigsten Ergebnisse des Versuchsprogramms sind in der

- schlankheitsabhängigen Bestimmung der Druckfestigkeit,
- Druckfestigkeitsabnahme in Abhängigkeit der Lehmfeuchte,
- dem Trocknungsverhalten des Lehms (Erreichen der Ausgleichfeuchte) und der

- vorhandenen Streuungen des Naturproduktes Lehm zu sehen.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die zusammengefassten Ergebnisse der Druckfestigkeitsentwicklung aller im Versuchsprogramm untersuchten Stampflehmproben in Abhängigkeit von der Schlankheit.

Tabelle 7: Anzahl, Abmessungen, Rohdichte und Druckfestigkeit sowie Variationskoeffizient des Stampflehms in Abhängigkeit der Schlankheit λ

Anzahl	Breite	Länge	Höhe	Schlankheit	Rohdichte	Druckfestigkeit*	Variationskoeffizient
n	b	l	h	λ	ρ	f	V
-	cm	cm	cm	-	kN/m ³	N/mm ²	%
12	20	20	20	1,0	2.166	3,47	16
10		15**	30	2,0	2.186	2,49	8
2	40	100	100	2,5	2.095	1,76	12
3	10	100	100	10,0	2.000	1,57	36
3	15	141	200	13,3	2.189	1,18	24

* Mittelwerte ** Durchmesser

Bild 5 Ermittelte Druckfestigkeiten des Stampflehms in Abhängigkeit von der Schlankheit nach [24]

Anhand der Werte (Bild 5) ist der allgemein bekannte Sachverhalt deutlich zu erkennen, dass mit zunehmender Schlankheit die Druckfestigkeit auch beim Stampflehm abnimmt (siehe nachfolgendes Diagramm).

Abhängigkeit Schlankheit - Druckfestigkeit

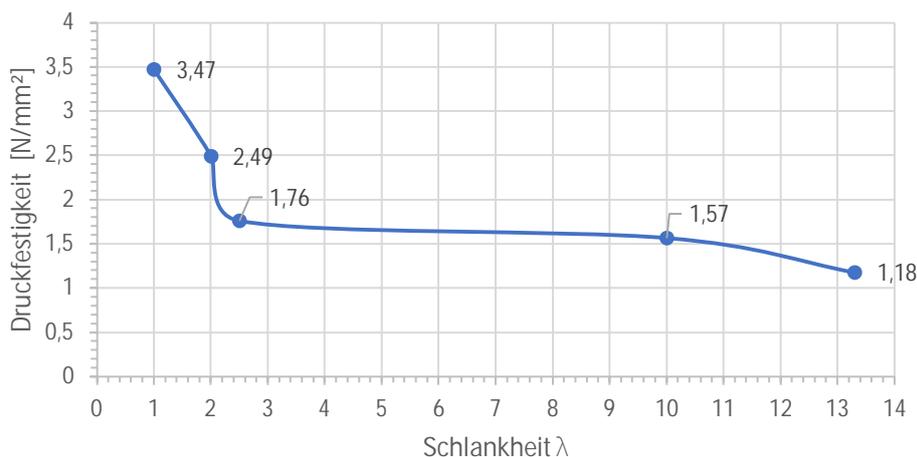


Bild 6 Abhängigkeit Schlankheit – Druckfestigkeit für alle ausgewerteten Prüfkörpergeometrien

Darüber hinaus wurden in zwei weiteren Prüfserien die Stampflehmprüfkörper unter unterschiedlichen Klimabedingungen konditioniert, eine Serie von Würfeln der Kantenlänge 20 cm mit 23°C/ 80% r.F. und eine

zweite Serie von Zylindern Durchmesser 15 cm/ Höhe 30 cm mit 23°C/ 50% r.F.. Danach wurde die Druckfestigkeit an den Proben ermittelt. Die Ergebnisse wurden anschließend mit denen einer Prüferie aus dem Jahr 2021 verglichen, die Fa. Conluto mit der gleichen Stampflehmmischung mit 23°C/ 50% r.F. in der Prüfstelle der Schomburg GmbH & Co. KG durchführen lassen hat [13]. Die Ergebnisse sind in nachfolgender Tabelle nach [23] zu sehen (Bild 7).

Tabelle 3: charakteristischen Druckfestigkeiten nach DIN EN 1990:2021-10

Prüfkörper	Anzahl	Schlankheit	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	5%-Quantilfaktor	char. Druckfestigkeit 5%-Quantil
		λ	m_x	s_x	V_x	k_n^*	$X_{k(n)}$
		-	N/mm ²	N/mm ²	-	-	N/mm ²
Würfel (23°C/80% r. F.)	10	1	2,75	0,17	0,06	1,92	2,42
Würfel ¹ (23°C/50% r. F.)	21	1	3,47	0,55	0,16	1,77	2,51
Zylinder (23°C/50% r. F.)	10	2	2,49	0,20	0,08	1,92	2,10

*mit V_x unbekannt [N 6]

¹ Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung, SCHOMBERG GMBH & Co. KG

Bild 7 Druckfestigkeiten in Abhängigkeit der äußeren klimatischen Bedingungen [23]

Anhand der Würfelergebnisse ist zu sehen, dass eine erhöhte Umgebungsfeuchte eine bis zu 20%-ige Minderung der Druckfestigkeit verursachen kann. Darauf ist bei der Herstellung der Stampflehmwände zu achten, ebenso auf das Erreichen der Ausgleichsfeuchte vor Aufbringen der planmäßig vorgesehenen Belastung.

Das Trocknungsverhalten der mit 60 cm sehr dicken Stampflehmwand und damit das Erreichen der Ausgleichsfeuchte im gesamten Wandquerschnitt spielt eine ganz entscheidende Rolle bei der Herstellung der Wandkonstruktion in Verbindung mit der Einleitung der Dachlasten. Das hat der erste Versuch bei der Beprobung der „breiten“ Wand (Bauteilprüfkörper mit L/B/H = 1,0 m/ 0,4 m/ 1,0 m, $\lambda = 2,5$) ganz deutlich gezeigt. Hier wurde nach etwa 15 Wochen (106 Tagen) Trocknungszeit der Wandprüfkörper W1 abgedrückt und erreichte nur eine Festigkeit von 1,25 N/mm² (vgl. Bild 8). Nachuntersuchungen hatten ergeben, dass nur die äußeren 10 cm des Wandquerschnittes mit 1,5 M.-% durchgetrocknet waren und die inneren 20 cm noch eine Kernfeuchte von etwa 2,8 M.-% besaßen. Im Vergleich dazu hatte der Wandprüfkörper W2 der „schmalen“ Wand (Bauteilprüfkörper mit L/B/H = 1,0 m/ 0,1 m/ 1,0 m, $\lambda = 10$) mit der 4-fachen Schlankheit bei der Druckfestigkeitsprüfung 2,20 N/mm² bei einer konstanten Feuchteverteilung über den Wandquerschnitt von 1,41 M.-% erreicht.

Die beiden durchgetrockneten Außenschalen hatten folglich eine höhere Steifigkeit als die Kernzone. Dadurch haben sie mehr Lasten angezogen, es kam zu einer Schalenbildung und nach dem Druckversagen der beiden Schalen zu einem sofortigen (verfrühten) Druckversagen des Gesamtsystems (Gesamtwandquerschnittes).

Im Mittel wurden bei den untersuchten Bauteilprüfkörpern Ausgleichsfeuchten von 1,16...1,32 M.-% bestimmt [24]. Darüber hinaus spielt natürlich die Umgebungsfeuchte auch eine gewisse Rolle im Hinblick auf die

Ausgleichsfeuchte. Hier lagen die Gleichgewichtsfeuchten zwischen 1,1 M.-% (23 °C, 50 % r.F.) und 1,9 M.-% (23 °C, 80 % r.F.).

Prüfkörper	Herstell-datum	Prüfdatum	Prüfalter	Bauteil-feuchte	Fläche	Gewicht	Rohdichte	Bruchlast	Druck-festigkeit
			Tage	M.-%					
W1 (b=0,4)	26.10.2021	09.02.2022	106	2,79	0,370	775	2095	461	1,25
W2 (b=0,4)	27.10.2021			0					
W3 (b=0,4)	20.12.2021			0					



Bild 8 Geprüfte „breite Wand“ mit hoher Kernfeuchte und niedriger Festigkeit (Quelle: Wigger IfMB)

Auf die o.g. Einhaltung der o.g. Werte für die Gleichgewichtsfeuchte wurde speziell bei den beiden Prüfkörpern der Brandversuche geachtet, hier galt als Mindestvorgabe für den Beginn des Brandversuches, dass die Prüfwand eine Ausgleichsfeuchte von mindestens 1,9 M.-% haben musste. Die nachfolgenden beiden Diagramme zeigen, dass für die Trocknung der 22 cm dicke Wand 132 Tage (ca. 4,5 Monate) und für die 60 cm dicke Stampflehmwand 204 Tage (fast 7 Monate) erforderlich waren (Bild 9).

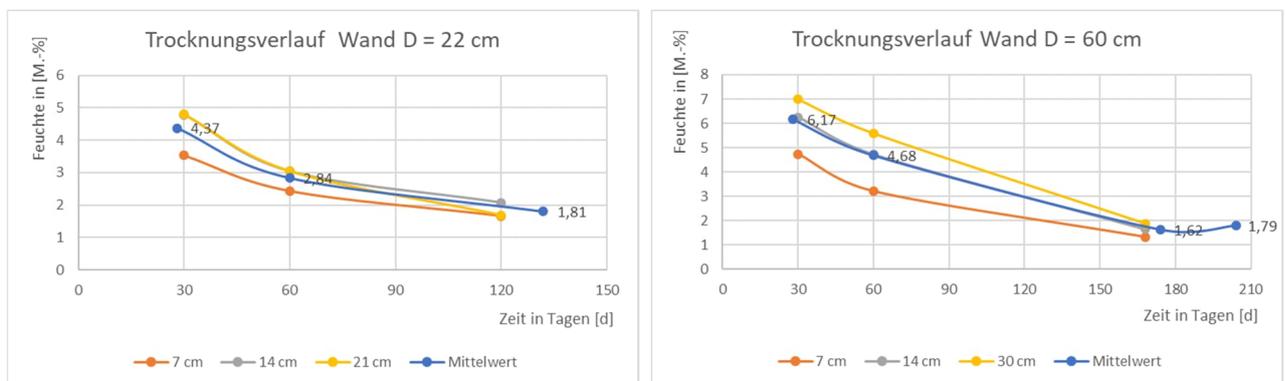


Bild 9 Trocknungsverlauf für die 22 cm dicke Wand nach 132 Tagen (links) und die 60 cm dicke Wand nach 204 Tagen (rechts)

Da auf der Baustelle in Detmold die etwa 2,5-fache Höhe der Wand hergestellt wird, sollte von einer Mindest-trocknungszeit der Wände von 7...8 Monaten ausgegangen werden. Hier folgen weitere Ausführungen im Kapitel 5.

Im Vergleich der ermittelten Druckfestigkeiten der vergangenen Jahre ist festzustellen, dass die Werte gewissen Schwankungen unterliegen. Hier wurden bei den Würfeldruckfestigkeiten zwischen 2009 und 2021 Festigkeitsunterschiede von bis zu 22,5 % und bei den Zylinderdruckfestigkeiten von bis zu 13 % festgestellt (vgl. Werte im 1. Zwischenbericht, abschnitt 6.3 nach [23]). Die kann natürlich mehrere Ursachen haben, wie z.B. Verdichtungsarbeit bei Herstellung, baustoffliche Zusammensetzung, Aufbereitung Stampflehm-mischung, Einbaufeuchte, Trocknungsbedingungen u.v.m. Zur Sicherstellung einer gleichbleibenden Stampf-lehmqualität sind daher baubegleitend in regelmäßigen Abständen Rückstellproben herzustellen und zu prüfen (siehe Abschnitt 5).

3 Ableitungen aus den Versuchsergebnissen

3.1 Ermittlung von Design Werten für die Druckfestigkeit

3.1.1 Ermittlung des Design-Wertes aus der charakteristischen Würfeldruckfestigkeit

Hier ergeben sich nach den Untersuchungen von Conluto-Stampflehm bei Schomburg GmbH & Co KG [13] aus dem Mittelwert der Würfeldruckversuche gemäß Abschlussbericht auf Seite 23 nach [24], siehe nachfolgende Tabelle 7, Zeile 4 in Bild 10 oder Tabelle in) nach Prof. Schulz (Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe) folgende Werte:

1. aus den Würfeldruckversuchen:

- Mittelwert der Würfeldruckfestigkeit: $f = 3,47 \text{ N/mm}^2$
- charakteristische Würfeldruckfestigkeit: $f_{c,k} = 2,49 \text{ N/mm}^2$
- Design-Wert: $f_{c,d} = 0,97 \text{ N/mm}^2$

Tabelle 7: Anzahl, Abmessungen, Rohdichte und Druckfestigkeit sowie Variationskoeffizient des Stampf-lehms in Abhängigkeit der Schlankheit λ

Anzahl	Breite	Länge	Höhe	Schlankheit	Rohdichte	Druckfestigkeit*	Variations-koeffizient
n	b	l	h	λ	ρ	f	V
-	cm	cm	cm	-	kN/m ³	N/mm ²	%
12	20	20	20	1,0	2.166	3,47	16
10		15**	30	2,0	2.186	2,49	8
2	40	100	100	2,5	2.095	1,76	12
3	10	100	100	10,0	2.000	1,57	36
3	15	141	200	13,3	2.189	1,18	24

* Mittelwerte ** Durchmesser

Bild 10 Ermittelte Druckfestigkeiten des Stampflehms in Abhängigkeit von der Schlankheit nach [24]

lfd. Nr.	Proben-Nr.	Rohdichte [kg/dm³]	Druckfestigkeit [N/mm²]	Prüfdatum	Prüfalter [d]	Prüfkörper	Bemerkung	
1	1.1	2,161	3,21	15.07.2021	59	200er Würfel	Serie 01-21	
2	1.2	2,190	3,88					
3	1.3	2,186	4,15					
	MW	2,179	3,75					
4	2.1	2,170	3,94	15.07.2021	59	200er Würfel	Serie 02-21	
5	2.2	2,155	4,16					
6	2.3	2,158	5,15					
	MW	2,161	4,42					
7	3.1	2,195	3,58	15.07.2021	59	200er Würfel	Serie 03-21	
8	3.2	2,139	3,89					
9	3.3	2,158	3,56					
	MW	2,164	3,68					
10	1.1	2,191	3,10	07.09.2021	56	200er Würfel	Serie 04-21	
11	1.2	2,218	3,13					
12	1.3	2,177	3,15					
	MW	2,195	3,12					
13	2.1	2,188	3,10	07.09.2021	56	200er Würfel	Serie 05-21	
14	2.2	2,191	3,11					
15	2.3	2,198	3,17					
	MW	2,192	3,12					
16	3.1	2,123	3,09	07.09.2021	56	200er Würfel	Serie 06-21	
17	3.2	2,150	3,15					
18	3.3	2,129	3,08					
	MW	2,134	3,11					
19	4.1	2,135	3,07	07.09.2021	56	200er Würfel	Serie 07-21	
20	4.2	2,150	3,10					
21	4.3	2,131	3,10					
	MW	2,139	3,09					
	Mittelwert:	2,166	3,47	Beprobungen Conluto 2021, Schomburg Raumklima 23°C/50% r.F.				
	Stbw.	0,03	0,55					
	Var.-koeff. V	0,01	0,16					

Prüfkörper		Würfel	Zylinder	Wand (Riley)
Abmessungen	mm	200 x 200 x 200	150 x 300	1200 x 300 x 1200
Kennwert	Einheit			
Trockenrohddichte	kg/m³	2.170	2.230	2.250
Dichte bei Ausgleichsfeuchte	kg/m³	2.220 rd. 1%	2.250 rd 1%	2.279 rd. 1,3 %
Druckfestigkeit	N/mm²	3,96	2,69	2,22
Elastizitätsmodul	N/mm²	k. A.	3.184	2.448
Poisson - Zahl	-		0,3 bis 0,45	

Bild 11 Ermittelte Druckfestigkeiten von Conluto-Stampflehm bei Schomburg GmbH, 2021 [13], links und nach Maybaum, 2010 [12], rechts

Herleitung:

Annahme: Für die Druckfestigkeitsverteilung wird die Normalverteilung angenommen (die Auswertung von 22 Stichproben stützt diese Annahme):

$$\gamma_{m,c} = \frac{1 - \alpha_m \cdot k_n \cdot V_m}{1 - \alpha_m \cdot \beta \cdot V_m}$$

$\gamma_{m,c}$ = Teilsicherheitsbeiwert der Druckfestigkeit ohne Systemunsicherheit und Umrechnungsfaktor (Teilsicherheitsbeiwert für eine Baustoffeigenschaft)

γ_{sys} = Systemunsicherheit

α_m = Wichtungsfaktor für den Bauteilwiderstand = 0,8

β = Zuverlässigkeitsindex nach Tabelle B.2 DIN EN 1990, für RC2 50 Jahre folgt $\beta = 3,8$

$V_{m,c}$ = Variationskoeffizient der Druckfestigkeit aus Stichproben ermittelt

k_n = Abminderungsfaktor nach Tabelle D.1 — Werte k_n für charakteristische Werte (5%-Fraktile) DIN EN 1990, für V_m = unbekannt (bzw. aus Stichproben $V_m = 0,16$ ermittelt)

$k_{n=21} \approx 1,765$ Mindestwert für $V_{m,c}$ ist 0,16

$$\gamma_{m,c} = \frac{1 - \alpha_m \cdot k_n \cdot V_{m,c}}{1 - \alpha_m \cdot \beta \cdot V_{m,c}} = \frac{1 - 0,8 \cdot 1,765 \cdot 0,16}{1 - 0,8 \cdot 3,8 \cdot 0,16} \approx 1,507$$

$$\gamma_{M,c} = \gamma_{m,c} \cdot \gamma_{sys} = 1,507 \cdot 1,2 \approx 1,8$$

Bestimmung der charakteristischen Würfeldruckfestigkeit

$$f_{c,k} = \sigma_{m,c}(1 - k_n \cdot V_{m,c}) = 3,47 \cdot (1 - 1,765 \cdot 0,16) \approx 2,49 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

Bestimmung des Bemessungswertes der Würfeldruckfestigkeit

$$f_{c,d} = \frac{\eta \cdot f_{c,k}}{\gamma_{M,c}} = \frac{0,7 \cdot 2,49}{1,8} \approx 0,97 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

η = Umrechnungsfaktor zur Berücksichtigung der Feuchte- und Lastdauereinflüsse

Annahme: $\eta = 0,7$

3.1.2 Ermittlung des Design-Wertes aus der charakteristischen Zylinderdruckfestigkeit

2. aus den Zylinderdruckversuchen:

Es wird empfohlen, den nachfolgenden Designwert aus den Zylinderdruckversuchen zu nehmen, da die Bestimmung der Würfeldruckfestigkeit noch von den älteren Normen her rührt und heute i.d.R. die Zylinderdruckfestigkeit geprüft wird.

- Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit: $f = 2,49 \text{ N/mm}^2$
- charakteristische Zylinderdruckfestigkeit: $f_{c,k} = 2,01 \text{ N/mm}^2$,
- Design-Wert: $f_{c,d} = 0,94$

(ergibt sich aus dem Mittelwert der Zylinderdruckversuche nach Tabelle 7, Abschlussbericht IfMB auf Seite 23, siehe obige Tabelle, Zeile 5, Bild 10)

Herleitung:

Annahme: Für die Druckfestigkeitsverteilung wird die Normalverteilung angenommen (die Auswertung von 11 Stichproben stützt diese Annahme):

$$\gamma_{m,c} = \frac{1 - \alpha_m \cdot k_n \cdot V_m}{1 - \alpha_m \cdot \beta \cdot V_m}$$

$\gamma_{m,c}$ = Teilsicherheitsbeiwert der Druckfestigkeit ohne Systemunsicherheit und Umrechnungsfaktor (Teilsicherheitsbeiwert für eine Baustoffeigenschaft)

α_m = Wichtungsfaktor für den Bauteilwiderstand = 0,8

β = Zuverlässigkeitsindex nach Tabelle B.2 DIN EN 1990, für RC2 50 Jahre folgt $\beta = 3,8$

γ_{sys} = Systemunsicherheit

$V_{m,c}$ = Variationskoeffizient der Druckfestigkeit aus Stichproben ermittelt

k_n = Abminderungsfaktor nach Tabelle D.1 — Werte k_n für charakteristische Werte (5%-Fraktile) DIN EN 1990, für $V_m =$ unbekannt (bzw. aus Stichproben $V_m = 0,08$ ermittelt)

$k_{n=11} \approx 1,92$ nach DIN EN 1990 ist der Mindestwert für $V_{m,c} = 0,1$

$$\gamma_{m,c} = \frac{1 - \alpha_m \cdot k_n \cdot V_{m,c}}{1 - \alpha_m \cdot \beta \cdot V_{m,c}} = \frac{1 - 0,8 \cdot 1,92 \cdot 0,1}{1 - 0,8 \cdot 3,8 \cdot 0,1} \approx 1,216$$

$$\gamma_{M,c} = \gamma_{m,c} \cdot \gamma_{sys} = 1,216 \cdot 1,2 \approx 1,5$$

Bestimmung der charakteristischen Zylinderdruckfestigkeit

$$f_{c,k} = \sigma_{m,c} (1 - k_n \cdot V_{m,c}) = 2,49 \cdot (1 - 1,92 \cdot 0,1) \approx 2,01 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

Bestimmung des Bemessungswertes der Zylinderdruckfestigkeit

$$f_{c,d} = \frac{\eta \cdot f_{c,k}}{\gamma_{M,c}} = \frac{0,7 \cdot 2,01}{1,5} \approx 0,94 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

η = Umrechnungsfaktor zur Berücksichtigung der Feuchte- und Lastdauereinflüsse

Annahme: $\eta = 0,7$

3.1.3 Ermittlung des Design-Wertes nach E DIN 18940:2022-10 für tragendes Lehmsteinmauerwerk

Man kann die Nachweisführung natürlich auch nach der aktuell im Entwurf befindlichen DIN 18940 für Tragendes Lehmsteinmauerwerk - Konstruktion, Bemessung und Ausführung (siehe [21]) durchführen. Hier ist das Nachweisverfahren stark an das vereinfachte Verfahren vom EC6, T.3 angelegt.

Herleitung:

$$f_d = \frac{\zeta \cdot M \cdot f_{c,k}}{\gamma_M}$$

$$\gamma_M = 1,5$$

$$\zeta = 0,85 \text{ oder für ständige Lasten } 1,0$$

$$M = 0,8$$

M Umgebungsfeuchtefaktor; berücksichtigt den Einfluss der relativen Luftfeuchte auf die Druckfestigkeit von Lehmsteinmauerwerk

ζ Dauerstandsfaktor

$$f_d = \frac{\zeta \cdot M \cdot f_{c,k}}{\gamma_M} = \frac{0,85 \cdot 0,8 \cdot f_{c,k}}{1,5} = \frac{0,68 \cdot f_{c,k}}{1,5} = \frac{0,68 \cdot 2,01}{1,5} \approx 0,91 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

Der Bemessungswert des vertikalen Tragwiderstands N_{Rd} ist zu ermitteln aus:

$$N_{Rd} = \Phi_S \cdot f_d \cdot A$$

Dabei ist

Φ_S der Traglastfaktor zur Berücksichtigung der Schlankheit und der Lastausmitte nach 7.6.4, gebildet aus

$$\Phi_s = \min(\Phi_1; \Phi_2)$$

- f_d der Bemessungswert der Druckfestigkeit des Lehmsteinmauerwerks nach 7.2.1;
 A die belastete Bruttoquerschnittsfläche der Wand.

Traglastfaktoren Φ_1, Φ_2

Bei geschosshohen Wänden des üblichen Hochbaus und gleichzeitiger Einhaltung der Randbedingungen nach 7.6.1 darf am Wandkopf und -fuß die Traglastminderung infolge der Lastausmitte bei Endauflagern auf Außen- und Innenwänden abgeschätzt werden zu:

$$\Phi_1 = \left(1,6 - \frac{l_f}{6}\right) \leq 0,9$$

Dabei ist

l_f die Stützweite der angrenzenden Geschossdecke, in m, bei zweiachsig gespannten Decken mit $0,5 \leq l_1/l_2 \leq 2,0$ darf für l_f das 0,85-Fache der kürzeren Stützweite eingesetzt werden.

Bei Decken über dem obersten Geschoss, insbesondere bei Dachdecken, gilt aufgrund geringer Auflasten:

$$\Phi_1 = 0,333$$

Für die mathematische Gleichung (7) gilt: Bei zweiachsig gespannten Decken mit $0,5 \leq l_1/l_2 \leq 2,0$ darf $\Phi_1 = 0,4$ gesetzt werden.

Wird die Traglastminderung infolge Deckenverdrehung durch konstruktive Maßnahmen, z. B. Zentrierleisten mittig unter dem Deckenaufleger, vermieden oder handelt es sich um eine Innenwand mit annähernd gleichen Stützweiten der angrenzenden Decken, so gilt unabhängig von der Deckenstützweite ein Traglastfaktor

$$\Phi_1 = 0,9$$

Zur Berücksichtigung der Traglastminderung bei Knickgefahr in Wandmitte gilt:

$$\Phi_2 = 0,9 - 0,03 \cdot \frac{h_{ef}}{t} \leq 0,8$$

Dabei ist

- h_{ef} die Knicklänge der Wand nach 7.6.5;
 t die Dicke der Wand.

Daraus ergibt sich konkret für den vorliegenden Fall der Stampflehmwand beim FLM Detmold:

- hier nur Dachkonstruktion zu beachten: $\Phi_1 = 0,33$
- zur Berücksichtigung der Traglastminderung bei Knickgefahr in Wandmitte gilt:
 $\Phi_2 = 0,9 - 0,03 \cdot h_{ef}/t \leq 0,8$ mit $h_{ef} = 8,22$ m und $t = 0,60$ m
 $\Phi_2 = 0,49 \leq 0,8$
 $\Phi_2 = 0,49 > \Phi_1 = 0,33$ daraus folgt: $\Phi_1 = 0,33$ ist maßgebend

Die Bestimmung der Druckfestigkeiten von Stampflehmwänden mit Schlankheiten $\lambda > 2$ galt der Kalibrierung des Nachweiskonzeptes.

3.2 Hinweise für die Nachweisführung der Stampflehmwand

Für die Nachweisführung der Stampflehmwand im antragsgegenständlichen Gebäude hat sich Rosenkranz nach [2] an das Verfahren der aktuellen Mauerwerksnormung nach EC6 gehalten. Nach DIN EN 1996-1-1/NA:2019-12, NCI Anhang NA.C [17] gibt es das vereinfachte Verfahren zur Berechnung der Lastausmitte bei Wänden. Die Berechnung des im Anhang NA.C dargestellten Wand-Decken-Knoten basiert allerdings auf der Annahme, dass es sich um Betondecken handelt, da das heute die übliche Bauweise im Mauerwerk ist. Es liegen somit hinsichtlich des Anschlusses von Fachwerk- oder Holzträgern am Wandkopf keine normativen Grundlagen vor.

Rosenkranz kompensiert dies dahingehend bzw. legt für die geplante Holzdachkonstruktion fest, dass er dem Fachwerkbinder und dem Brettstapelbinder einen wesentlich geringeren E-Modul (E-Modul für Holz $E \approx 11.000 \text{ MN/m}^2$) zuweist als Beton ($27.000 \dots 44.000 \text{ MN/m}^2$) und liegt damit tendenziell aufgrund des geringen Wertes auf der sicheren Seite (weichere Konstruktion, höheres Knotenmoment).

Aus Sicht der Gutachter kann man das so machen.

Die Nachweise basieren jedoch auf Materialkennwerten für den Lehm aus der Literatur bzw. aus früheren Untersuchungen. Bei den Berechnungen wurde eine charakteristische Festigkeit des Stampflehms von $f_{c,k} = 4,2 \text{ MN/m}^2$ angenommen und daraus ein Design-Wert von $f_{c,d} = 1,5 \text{ MN/m}^2$ ermittelt. Dieser Wert ist jedoch gemäß den im Untersuchungsprogramm ermittelten Zylinderdruckfestigkeiten nach [24] zu groß.

Für die Nachweise gemäß der Fachtechnischen Stellungnahme von Kempfen Krause Ingenieure GmbH, Köln nach [2] kann daher ein Design-Wert für die Zylinderdruckfestigkeit $f_{c,d} = 0,94 \text{ N/mm}^2$ empfohlen werden.

Mit diesem Wert sollen die erforderlichen Nachweise noch einmal durchgeführt werden.

3.3 Eigene Plausibilitätsuntersuchungen

Gemäß E DIN 18940:2022-10 ergibt sich nach Abschnitt 3.1.3 ein Design-Wert von $f_{c,d} = 0,91 \text{ N/mm}^2$.

Nach dem Entwurf der DIN 18940 ergibt sich folgender Berechnungsgang für den vertikalen Tragwiderstand.

7.6.3 Bemessungswert des vertikalen Tragwiderstands

Im Grenzzustand der Tragfähigkeit ist nachzuweisen, dass:

$$N_{Ed} \leq N_{Rd}$$

Dabei ist

N_{Ed} der Bemessungswert der vertikalen Belastung der Wand;

N_{Rd} der Bemessungswert des vertikalen Tragwiderstands der Wand nach Gleichung (4).

Der Bemessungswert des vertikalen Tragwiderstands N_{Rd} ist zu ermitteln aus:

$$N_{Rd} = \Phi_s \cdot f_d \cdot A \tag{4}$$

Dabei ist

Φ_s der Traglastfaktor zur Berücksichtigung der Schlankheit und der Lastausmitte nach 7.6.4, gebildet aus
 $\Phi_s = \min(\Phi_1; \Phi_2)$;

f_d der Bemessungswert der Druckfestigkeit des Lehmsteinmauerwerks nach [7.2.1 Gleichung 5](#);

A die belastete Bruttoquerschnittsfläche der Wand.

In Gleichung (4) ist für die belastete Bruttoquerschnittsfläche der Wand der maßgebende Wandabschnitt (bezogen auf einen Meter Wandlänge) anzusetzen.

Der Bemessungswert der Druckfestigkeit des Lehmsteinmauerwerks f_d ist über den Umgebungsfeuchtefaktor M (siehe 4.2) in Abhängigkeit der Nutzungsklasse nach Tabelle 19 abzumindern. Zu den Definitionen der Nutzungsklassen siehe Tabelle 3.

Tabelle 19 — Umgebungsfeuchtefaktoren M für die Nutzungsklassen

Nutzungsklasse	Umgebungsfeuchtefaktor M
NKL 1	0,80
NKL 2	0,55

Mit $\Phi_1 = 0,33$ ergibt sich für $N_{R,d}$ folgender Nachweis am Wandkopf:

$$N_{R,d0} = 0,33 \cdot 0,91 \text{ N/mm}^2 \cdot 6.400 \text{ mm} \cdot 600 \text{ mm}$$

$$N_{R,d0} = 1.153 \text{ kN}$$

Der Nachweis für den Wandkopf nach EWK 3 ergibt sich mit $N_{e,d} = 742 \text{ kN}$ (nach [2], Tabelle Seite 18, Wandkopf) zu:

$$\eta = 742 \text{ kN} / 1.153 \text{ kN} = \mathbf{0,64} < \mathbf{1,00}$$

Der Nachweis für die Wandmitte (Knickgefahr) lautet:

$$N_{R,dm} = 0,49 \cdot 0,91 \text{ N/mm}^2 \cdot 6.400 \text{ mm} \cdot 600 \text{ mm}$$

$$\mathbf{N_{R,dm} = 1.712 \text{ kN}}$$

$$\eta = 1.099 \text{ kN} / 1.712 \text{ kN} = \mathbf{0,64} < \mathbf{1,00} \quad \text{mit } N_{e,d} = 1.099 \text{ kN} \text{ (nach [2], Tabelle Seite 18, Wandmitte, EWK3)}$$

Die Nachweise sind auf der sicheren Seite eingehalten.

Darüber hinaus wurden die Versuche zur Ermittlung der Druckfestigkeit von Stampflehmwänden mit Schlankheiten $\lambda > 2$ ausgewertet und zur Kalibrierung des Nachweiskonzeptes herangezogen. Für die drei maßstabsgerechten Prüfwände mit Schlankheit $\lambda = 13,3$ wurden die im Versuch ermittelten Bruchlasten (siehe in [24], Seite 22, Tabelle 6) den nach E DIN 18940 [21] ermittelten vertikalen Tragwiderständen, die auf der Grundlage der ermittelten Zylinderdruckfestigkeiten des Stampflehms bestimmt wurden (vgl. Abschnitt 3.1.2, Seite 13), gegenübergestellt. Dabei ergibt sich mindestens eine 2-fache Sicherheit (siehe Bild 12).

Prüfkörper	Nr.	H [m]	L [m]	D [m]	Bruchkraft [kN]	f_c [N/mm ²]	λ	Φ DIN 18940	$f_{c,d \text{ zyl}}$ [kN]	$F = \Phi \cdot A \cdot f_{c,d \text{ zyl}}$ [kN]	η
Wand hoch	W1	1,99	1,41	0,15	200	0,95	13,27	0,5020	0,94	99,7	2,01
	W2	1,98	1,41	0,15	231	1,09	13,20	0,5040	0,94	100,1	2,31
	W3	2,00	1,41	0,15	314	1,48	13,33	0,5000	0,94	99,3	3,16
	Mittelwert					1,17	13,27				

Bild 12 Gegenüberstellung der Bruchlasten der Versuche mit den hohen Wänden ($\lambda = 13,3$ nach [24]) mit den nach E DIN 18940 ermittelten vertikalen Tragwiderständen auf der Grundlage der ermittelten Zylinderdruckfestigkeiten nach [24], Seite 23, Tabelle 7

4 Weitere wichtige Materialparameter

4.1 Kennwerte aus dem Versuchsprogramm

Elastizitätsmodul: Hinsichtlich des statischen E-Moduls kann für die weiteren Berechnungen mit dem Mittelwert der Versuchsreihe vom IfMB nach [23], Seite 12, Tabelle 4 von $E_{\text{stat}} = 2.900 \text{ N/mm}^2$ gerechnet werden.

Kriechverformung: Es kann mit einem Mittelwert der Kriechverformung $\varepsilon_{\infty} = 1,08 \text{ ‰}$ und einer Endkriechzahl von $\phi_{\infty} = 3,43$ nach den Versuchen nach [24] gerechnet werden.

4.2 Kennwerte aus der Fachliteratur

Im Versuchsprogramm des IfMB nach [23] und [24] wurden keine Versuche zur Haftscherfestigkeit und zu Reibungsbeiwerten durchgeführt. Diese Werte, so sie für den statischen Nachweis benötigt werden, müssen auf der sicheren Seite aus der Literatur entnommen werden.

Haftscherfestigkeit: Hinsichtlich der Haftscherfestigkeit kann auf DIN 18946:12-2018, Tabelle 3 und Abschnitt 5.4.6 zurückgegriffen werden. Hier steht ein Mindestwert drin:

Lehmmauermörtel für tragendes Mauerwerk muss mindestens einen charakteristischen Wert der Haftscherfestigkeit von 0,04 N/mm² aufweisen. Die Haftscherfestigkeit für Lehmmauermörtel der Festigkeitsklasse M2 bis M4 nach Tabelle 3 (siehe Bild 13) ist vom Hersteller zu bestimmen und zu deklarieren.

Tabelle 3 — Festigkeitsklassen von Lehmmauermörtel

	1	2	3
	Festigkeitsklasse	Druckfestigkeit N/mm ²	Haftscherfestigkeit N/mm ²
1	M2	≥ 2,0	≥ 0,04
2	M3	≥ 3,0	
3	M4	≥ 4,0	

Bild 13 Haftscherfestigkeit Lehm nach DIN 18946 [22]

Darüber hinaus gibt es auch neuere Untersuchungen von Fontana/ Grünberg (BAM) [27], bei denen Prüfungen mit rein mineralischem Lehmörtel der Festigkeitsklasse M2 eine charakteristische Haftscherfestigkeit von 0,04 N/mm² und der Festigkeitsklasse M3 von 0,12 N/mm² ergab.

Gemäß statischer Berechnung nach [2] bezieht sich Rosenkranz im Kapitel „2.2 Material“ auf einen Conluto Lehmmauermörtel schwer nach DIN 18946 - LMM 04 m - M3 - 2,0. Dies ist ein Baulehm gebrochen mit Sand 0-2 mm der Festigkeitsklasse M3 und Rohdichteklasse 2,0. Die Haftscherfestigkeit ist mit 0,06 N/mm² von Conluto angegeben. Es wird davon ausgegangen, dass der Wert von Conluto bestimmt und deklariert wurde. Der M3 von Fontana/ Grünberg (BAM) hatte auch diese Eigenschaften und brachte eine Haftscherfestigkeit von 0,12 N/mm². Das Schwindmaß war bei den Versuchen in der BAM mit 2,2% etwas größer als die angegebenen 1,9% und die Druckfestigkeit mit 3,11 N/mm² etwas kleiner ggü. 3,9 N/mm² von Conluto. Aus Sicht der Gutachter kann auch mit der von Conluto deklarierten Haftscherfestigkeit von 0,06 N/mm² gerechnet werden (entspricht 50% des von der BAM ermittelten Wertes von 0,12 N/mm²).

Reibungsbeiwert: Als Reibungsbeiwert Lehm/ Beton wird 0,35 empfohlen (siehe auch Schneider Bautabellen). Hinsichtlich Lehm/ Lehm gibt es mehrere Quellen: $\mu = 0,10 \dots 0,25$ (Erde - Erde, trocken) oder $\mu = 0,5$ (Mauerwerk - trockenem Lehm), beides nach G.F. Swain [29]. Nach Schachbasian [28] werden μ -Werte von Lehm (Einzelkornstruktur) auf trockenem Boden von $\mu = 0,47$ und von Lehm (Krümelstruktur) auf trockenem Boden von $\mu = 0,36$ genannt (siehe Bild 14).

Schachbasian [2] beobachtete, dass der Reibungsbeiwert bei feuchtem Boden höher war als bei trockenem Boden (Zahlentafel 2).

Zahlentafel 2
Reibungsbeiwerte auf verschiedenen Böden nach
Schachbasian [2]

	Kalksand	Lehm Einzelkornstruktur	Lehm Krümelstruktur	Humus	Kaolin
trockener Boden $\mu =$	0,38	0,47	0,36	0,39	0,33
feuchter Boden $\mu =$	0,63	0,53	0,47	0,65	0,43

Bild 14 Reibungsbeiwerte Lehm-Lehm nach [28]

Auf der sicheren Seite könnte man mit einem μ -Wert von 0,36 für Lehm auf Lehm rechnen.

5 Qualitätssicherung auf der Baustelle

Wie die mechanischen als auch die Brandversuche eindeutig zeigten, spielen die Rohdichte, die Druckfestigkeit und der Feuchtegehalt des Lehms für tragende Konstruktionen eine ganz entscheidende Rolle. Aus diesem Grund ist bei der Herstellung der tragenden Wände des Ausstellungshauses die Stampflehmqualität während des gesamten Herstellungsprozesses zu überwachen. In Deutschland gibt es jedoch derzeit noch keine verbindliche Norm zur Überwachung von Lehmbauarbeiten.

Speziell bei der Errichtung der beiden tragenden Wände der Ausstellungshalle werden von der Kubatur der Konstruktion her rund 400 m³ Lehm verarbeitet. Nach Aussagen von Fa. Conluto, Blomberg, Herrn Meyer, und Lehm Ton Erde Baukunst GmbH, Schlins/ Österreich, Herrn Honermann, wird bei ähnlichen Projekten i.d.R. alle 50 m³ die Qualität des Stampflehms überprüft.

Aus Sicht der Unterzeichnenden kann dieser Größenordnung zugestimmt werden. Hinsichtlich der Qualitätssicherung während der Errichtung der Wand wird daher folgende Vorgehensweise vorgeschlagen:

1. Herstellung von Prüfkörpern baubegleitend alle 50 m³:

1.1 Herstellung 5 Zylinder Durchmesser 150 mm/ H = 300 mm,

- Prüfung von: 1. Rohdichte feucht und Bestimmung Einbaufeuchte,

2. Rohdichte und Druckfestigkeit nach Erreichen der Massekonstanz

Hinweis: Es wird vorgeschlagen, die Prüfkörper nach dem Ausschalen im Trockenschrank bei 23 °C/ 50 % r.F. bis zur Massekonstanz zu belassen. Am Tag der Prüfung der Druckfestigkeit ist der Feuchtegehalt zu bestimmen und nach der Prüfung das Trockengewicht zu ermitteln.

Grenzwert: Die Druckfestigkeit muss dabei mindestens 2,40 N/mm² erreichen.

1.2 Entnahme von 3 Zylindern Durchmesser 100 mm/ H = 100 mm zur Bestimmung der Rohdichte

Hinweis: Im Bereich der zuletzt verbauten 50 m³ Stampflehm sind auf der bis dato hergestellten Mauerkrone 3 Bohrkerne im Trockenbohrverfahren senkrecht und über die Länge der Mauerkrone verteilt zu entnehmen und zum Nachweis eines ausreichenden Verdichtungsgrades die Rohdichte (Feuchte- und Trockenrohddichte) zu bestimmen.

Grenzwert: Die Trockenrohddichte muss dabei mindestens 2.000 kg/ m³ erreichen.

2. Überwachung des Trocknungsverlaufes der Wand

Bis zum Zeitpunkt des Absetzens der planmäßigen Belastung der Wand durch die Dachkonstruktion muss nachgewiesen werden, dass die Stampflehmwand ihre Ausgleichsfeuchte zwischen 1,1 bis 1,9 M.-% erreicht hat.

Hier hat die Höhe der Wand einen gewissen Einfluss, da das im Querschnitt eingeschlossene Wasser nicht nur über die Wandflächen nach außen diffundiert, sondern auch über den Kern nach unten durchsickert. Folglich werden die oberen Teile der Wand zuerst den Ausgleichsfeuchtezustand erreichen und die unteren Wandbereiche zeitlich versetzt erst später, obwohl sie eher hergestellt wurden.

Bei der Herstellung der 60 cm dicken Brandprüfwand in der MFPA Leipzig wurde die Ausgleichsfeuchte nach etwa 200 Tagen erreicht. Es ist davon auszugehen, dass diese Zeitdauer beim BV in Detmold auch einkalkuliert werden muss. Daher ist in regelmäßigen Zeitabständen der Feuchtegehalt der Wand zu prüfen.

Prüfung mittels:

1. Bohrkernentnahme im Trockenbohrverfahren Durchmesser 50 mm, L = 30...35 cm oder
2. Bohrmehlentnahme bis in eine Tiefe von 35 cm in Abständen zu 10 cm, z.B. mit einem Spiralbohrer Durchmesser 36 mm
3. Ermittlung des Feuchtegehaltes

Hinweis: Die Ermittlung des Feuchtegehaltes sollte in 3 verschiedenen Höhen der Wand (Vorschlag Drittelspunkte) und an 3 verschiedenen Stellen über die Wandlänge (Vorschlag ebenfalls Drittelspunkte) erfolgen.

Grenzwert: $U < 1,9 \text{ M.-%}$

Bei Einhaltung bzw. Erreichen der angegebenen Grenzwerte kann die Stampflehmwand belastet werden. Die entsprechenden Materialkennwerte sind zu protokollieren und zu dokumentieren.

6 Fazit

Gegenstand der Zustimmung im Einzelfall

Eigenschaften die erreicht werden sollen:

- feuerhemmend F30 der Stampflehmwand,
- standsicher gegenüber den abzutragenden Lasten aus Eigengewicht und Dachkonstruktion (Dachtragwerk und Dachdeckung), äußeren Einwirkungen sowie horizontaler Belastung gemäß DIN EN 1991-1-1/NA, Tab. 6.12. [19] unter 1 kN/m in Höhe von 1,2 m

Ergebnisse:

Der Feuerwiderstand der tragenden Stampflehmwand wurde innerhalb der durchgeführten Brandversuche nachgewiesen. Darauf wurde hier nicht näher eingegangen, es wird an dieser Stelle auf die Gutachterliche Stellungnahme nach [26] verwiesen.

In Verbindung mit der ZiE mussten alle erforderlichen bautechnischen Nachweise für das Bauprodukt erbracht werden. In Bezug auf die Standsicherheit der tragenden Stampflehmwand war die Ermittlung von wesentlichen mechanischen und physikalischen Eigenschaften für den Stampflehm erforderlich. Diese wurden in einem umfangreichen Prüfprogramm am IfMB in Oldenburg ermittelt (siehe hierzu ausführlich [23] und [24]). Es wurde nachgewiesen, dass der für die Errichtung der Wände vorgesehene Stampflehm den Anforderungen hinsichtlich der mechanischen und physikalischen Kennwerte, im Speziellen der Druckfestigkeit, gerecht wird. Bei Einhaltung der Randbedingungen und Grenzwerte hinsichtlich der Materialparameter sowie der Erfüllung der auf dieser Basis zu erstellenden statischen Nachweise ist die Konstruktion in der geplanten Art und Weise ausführbar.

Vorschlag der Gutachter

Aus Sicht der Gutachter wurde durch die Ergebnisse der antragsgegenständlichen Versuche zur Ermittlung der mechanischen und physikalischen Kennwerte des zu verwendenden Stampflehms eindeutig nachgewiesen, dass die geplante Stampflehmwandkonstruktion mit einer Dicke von 60 cm und einer Höhe von 8,20 m (7,65 m) sowohl den geforderten Feuerwiderstand gemäß aktuellem Brandschutzkonzept als auch der Belastung aus Eigengewicht und Dachkonstruktion sowie äußeren Einwirkungen gegenüber standsicher ist. Es wird der Obersten Bauaufsicht in Düsseldorf, Referat 614, empfohlen, die Zustimmung im Einzelfall gemäß Antrag zu erteilen.

Radebeul, 06.04.2023



Prof. Dr.-Ing. Wolfram Jäger
Jäger Ingenieure GmbH, Radebeul



Prof. Dr.-Ing. Toralf Burkert
Jäger Ingenieure GmbH, Radebeul

7 Literatur

- [1] Gabriel, J., Lauterbach, S.: LWL – Freilichtmuseum Detmold, Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude, 32760 Detmold, Paderborner Straße. Brandschutzkonzept 19-2662B. Aufgestellt durch: Thormählen + Peuckert – Beratende Ingenieure PartG mbB, Büro Paderborn – Technologiepark 31, 33100 Paderborn. 92 Seiten, 6 Pläne, 15.12.2020
- [2] Seitz, H., Rosenkranz, O., Anders, J.: Fachtechnische Stellungnahme zur Begleitung einer Zustimmung im Einzelfall für die Ausführung von tragenden Lehmwänden beim Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude Freilichtmuseum, Detmold. Proj.-Nr. 2019-0437 Freilichtmuseum Detmold, Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude, 32760 Detmold, Paderborner Straße. Kempen Krause Beratende Ingenieure GmbH, Konrad-Adenauer-Ufer 41, 50668 Köln. 25 Seiten, 07.2021
- [3] Bauordnung NRW (BauO NRW), Aktuelle Fassung vom 21. Juli 2018
- [4] Verordnung über Bau und Betrieb von Sonderbauten – Teil 1: Versammlungsstätten. Aktueller Stand: 02.08.2019
- [5] Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen NRW (VV TB NRW) vom 30. Juni 2021.
- [6] Dachverband Lehm e.V.: Lehmbau Regeln, 3. überarbeitete Auflage, Vieweg + Teubner Wiesbaden 2009.
- [7] ACMS-Architekten Contor Müller Schlüter: Basisplan 0V. Plan-Nr. 65.60, Werkplanung, M: 1:5. Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude, Paderborner Straße, 32760 Detmold. 29.09.2021
- [8] Liste der Technischen Baubestimmungen. Anlage zum RdErl. d. MWEBWV vom 22.05.2012. Ministerialblatt für das Land Nordrhein-Westfalen – Nr. 17 vom 20. Juni 2012.
- [9] Vornorm DIN 18954:1956-06: Ausführung von Lehmbauten, Richtlinien. (nicht mehr gültig)
- [10] Schulz, Jens-Uwe: Überlegungen zum Standsicherheitsnachweis im Lehmbau. Gefunden auf: <http://www.moderner-lehmbau.com> › editorial › lr_d65, 07.10.2021
- [11] DIN 1053: Mauerwerk – Berechnung und Ausführung. Fachnormenausschuß Bauwesen im Deutschen Normenausschuß, Arbeitsgruppe Einheitliche technische Baubestimmungen ETB), Berlin, Dezember 1952.

-
- [12] Maybaum, G.: Materialkennwerte Stampflehm. Ermittelt im Rahmen des Forschungsvorhabens: „Optimierung der Herstellung und der Tragfähigkeit von Stampflehmwänden“. HAWK Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst. Hochschule Hildesheim, Holzminden, Göttingen. 2010
- [13] N.N.: Bestimmung Rohdichte und Druckfestigkeit. Prüfprotokolle Serien 01-21 bis 03-21 mit je 3 Lehmwürfeln mit Kantenlänge 200 mm nach 59 Tagen (15.07.2021), Prüfprotokolle 04-21 bis 07-21 mit je 3 Lehmwürfeln der Kantenlänge 200 mm nach 56 Tagen (07.09.2021). Im Auftrag von: Conluto – Vielfalt aus Lehm, Blomberg. Schomburg GmbH & Co. KG, Zentrale Anwendungstechnik, zert. Betonprüfstelle, Baustofflabor. Aquafinstr. 2-8, 32760 Detmold.
- [14] DIN EN 1996-1-1:2013-02: Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk. NABau im DIN, Berlin 2013.
- [15] DIN EN 1996-3:2010-12: Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 3: Vereinfachte Berechnungsmethoden für unbewehrte Mauerwerksbauten. NABau im DIN, Berlin 2010.
- [16] DIN EN 1996-3/NA:2019-01: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 3: Vereinfachte Berechnungsmethoden für unbewehrte Mauerwerksbauten. NABau im DIN, Berlin 2012.
- [17] DIN EN 1996-1-1/NA:2019-12: Nationaler Anhang - Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk. NABau im DIN, Berlin 2019.
- [18] DIN 4102-4:1994-03: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile. NABau im DIN e.V., Berlin 1994.
- [19] DIN EN 1991-1-1/NA:2010-12: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau. NABau im DIN, Berlin 2010.
- [20] DIN EN 1990: 2010-12: Grundlagen der Tragwerksplanung. Deutsche Fassung EN 1990: 2002 + A1: 2005 + A1:2005/AC:2010: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 2010.
- [21] E DIN 18940:2022-10: Entwurf - Tragendes Lehmsteinmauerwerk – Konstruktion, Bemessung und Ausführung. Oktober 2022.
- [22] DIN 18946:2018-12: Lehmmauermörtel – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung. DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau), Berlin, 2018.

-
- [23] Wigger, H.; Relishkis, A.: Freilichtmuseum Detmold – Landesmuseum für Alltagskultur. Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude. Mechanische Eigenschaften des Stampflehms. Zwischenbericht Nr.: 0075/21 ME (IMS/AR/HW). Im Auftrag von: LWL – Bau- und Liegenschaftsbetrieb, Warenhofer Straße 24, 48145 Münster. Institut für Materialprüfung und Bauwerkserhaltung GmbH, Zeughausstraße 15, 26121 Oldenburg. 42 Seiten, Oldenburg, 08.02.2022.
- [24] Wigger, H.; Ince, M.: Freilichtmuseum Detmold – Landesmuseum für Alltagskultur. Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude. Mechanische und physikalische Eigenschaften des Stampflehms. Abschlussbericht Nr.: 0075/21 (IMS/JB/HW). Im Auftrag von: LWL – Bau- und Liegenschaftsbetrieb, Warenhofer Straße 24, 48145 Münster. Institut für Materialprüfung und Bauwerkserhaltung GmbH, Zeughausstraße 15, 26121 Oldenburg. 39 Seiten, Oldenburg, 13.03.2023.
- [25] Wigger, H.; Schmidtman, I.-M.: Freilichtmuseum Detmold – Landesmuseum für Alltagskultur. Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude. Bauphysikalische Eigenschaften des Stampflehms. Abschlussbericht Nr.: 0075/21 BP (AR/IMS/HW). Im Auftrag von: LWL – Bau- und Liegenschaftsbetrieb, Warenhofer Straße 24, 48145 Münster. Institut für Materialprüfung und Bauwerkserhaltung GmbH, Zeughausstraße 15, 26121 Oldenburg. 25 Seiten, Oldenburg, 09.03.2023.
- [26] Burkert, T.; Jäger, W.: Gutachterliche Stellungnahme zur Zustimmung im Einzelfall – Tragende Stampflehmwände mit Brandschutzanforderungen im Innenbereich – Feuerwiderstand einer tragenden Lehmwand. Jäger Ingenieure GmbH, Wichernstraße 12, 01445 Radebeul. 79 Seiten, Radebeul, 31.03.2023.
- [27] Fontana, P.; Grünberg, U.: Untersuchungen zur Haftscherfestigkeit von Lehmmauermörtel. BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin. In: Lehm 2012.
- [28] Schachbasian, J.: Untersuchungen über die Adhäsion und Reibung der Bodenarten an Holz und Eisen. Forsch. Agrikulturphysik. Herausgeber: Dr. E. Wollny. Bd. XIII. (1890).
- [29] Swain, G.F.; Mehmel, A.: Festigkeitslehre. Springer Berlin (Verlag), 1928.

Anlage A5:

Abschlussbericht

DBU-Projekt AZ 35442/02

Gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU)

Arbeitspaket 6: Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für die Umsetzbarkeit ökologischer Konstruktionen bei Großprojekten für das Material Lehm

Prüfbericht Nr. PB 3.2/21-263-1: Feuerwiderstandsprüfung einer 220 mm dicken, tragenden, raumabschließenden und wärmedämmenden Stampflehmwandkonstruktion auf Brandverhalten bei einseitiger Brandbeanspruchung gemäß DIN EN 1363-1: 2020-05 in Verbindung DIN EN 1365-1: 2013-08 sowie Stoßbeanspruchung nach DIN EN 1363-2: 1999-10

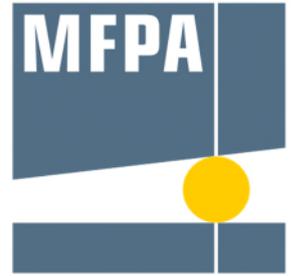
Freilichtmuseum Detmold – Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude

MFPA Leipzig GmbH, Leipzig

Im Auftrag von: LWL – Bau- und Liegenschaftsbetrieb, Münster

Autoren: M. Juknat und E. Dorn

30.06.2022



Mfpa Leipzig GmbH

Gesellschaft für Materialforschung
und Prüfungsanstalt für
das Bauwesen Leipzig mbH

Prüf-, Überwachungs- und Zerti-
fizierungsstelle für Baustoffe, Bau-
produkte und Bausysteme

Anerkannt nach
Landesbauordnung (SAC02),
notifiziert nach Bauprodukten-
verordnung (NB 0800)

Geschäftsbereich III:

Baulicher Brandschutz

Geschäftsbereichsleiter:

Dipl.-Ing. Michael Juknat

Tel.: +49 (0) 341-6582-134

Fax: +49 (0) 341-6582-197

brandschutz@mfpa-leipzig.de

Arbeitsgruppe 3.2

Brandverhalten von Bauarten und
Sonderkonstruktionen

Ansprechpartner*in:

Dipl.-Ing. (FH) Eik Dorn

Tel.: +49 (0) 341-6582-144

dorn@mfpa-leipzig.de



Durch die DAKKS GmbH nach DIN EN
ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflabora-
torium. Die Urkunde kann unter
www.mfpa-leipzig.de eingesehen wer-
den.

Prüfbericht Nr. PB 3.2/21-263-1

vom 30. Juni 2022

1. Ausfertigung

Gegenstand:	Feuerwiderstandsprüfung einer 220 mm dicken, tragenden, raumabschließenden und wärmedämmenden Stampflehmwandkonstruktion auf Brandverhalten bei einseitiger Brandbeanspruchung gemäß DIN EN 1363-1: 2020-05 in Verbindung DIN EN 1365-1: 2013-08 sowie Stoßbeanspruchung nach DIN EN 1363-2: 1999-10
Auftraggeber:	Landschaftsverband Westfalen-Lippe (LWL) LWL-Bau und Liegenschaftsbetrieb Warendorfer Straße 24 D-48133 Münster
Auftragsdatum:	20. Dezember 2021
Probeneingang:	13. Januar 2022
Probennahme:	Angaben über eine amtliche Entnahme liegen der Prüfstelle nicht vor.
Probenkennzeichnung:	keine
Prüfdatum:	24. Juni 2022
Bearbeiter:	Dipl.-Ing. M. Juknat Dipl.-Ing. (FH) E. Dorn

Dieser Prüfbericht umfasst 8 Seiten und 6 Anlagen.

Dieses Dokument darf nur ungekürzt vervielfältigt und veröffentlicht werden. Als rechtsverbindliche Form gilt die deutsche Schriftform mit Originalunterschriften und Originalstempel des/der Zeichnungsberechtigten. Es gelten die Allgemeinen Geschäftsbedingungen (AGB) der Mfpa Leipzig GmbH.

1 Allgemeines

Am 20. Dezember 2021 beauftragte der Landschaftsverband Westfalen-Lippe (LWL) die MFGPA Leipzig GmbH mit der Feuerwiderstandsprüfung einer 220 mm dicken, tragenden, raumabschließenden und wärmedämmenden Stampflehmwandkonstruktion zur Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer bei einseitiger Brandbeanspruchung.

Der Brandversuch wurde im Rahmen eines Bauvorhabens zur Erlangung einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE) durchgeführt. Planung und Aufbau wurden in Abstimmung mit dem Bauherrn unter der Leitung des Ingenieurbüros Jäger Ingenieure GmbH festgelegt. Insgesamt gehören zum Prüfkonzept zwei großmaßstäbliche Brandversuche. In diesem Prüfbericht wird der erste von zwei Brandversuchen an einer Stampflehmwand mit einer Querschnittsdicke von 220 mm und einer Wandgröße von $b \times h = 3000 \text{ mm} \times 3000 \text{ mm}$ beschrieben.

Dieser Prüfbericht beschreibt den konstruktiven Aufbau inklusive Montageverfahren, die Prüfbedingungen, sowie die Ergebnisse für das hier beschriebene spezifische Bauteil, nachdem dieses in Übereinstimmung mit DIN EN 1363-1: 2020-05 in Verbindung mit DIN EN 1365-1: 2013-08 geprüft wurde. Die Prüfung erfolgte auf dem Gelände der MFGPA Leipzig GmbH – Brandprüfstelle, MFGPA-Allee 1, D-04509 Laue bei Delitzsch.

2 Beschreibung der geprüften Konstruktion

2.1 Konstruktiver Aufbau der Wandkonstruktion

Die Stampflehmwandkonstruktion wurde am 19. Januar 2022 in der Brandprüfstelle der MFGPA Leipzig GmbH hergestellt und nach einer Trocknungszeit von 157 Tagen geprüft. Am 07. Februar 2022 wurde die Holzbrettschalung von der Stampflehmwand entfernt. In der Tabelle 1 wird der Aufbau der tragenden Stampflehmwand näher erläutert.

Tabelle 1 Auflistung der konstruktiven Details der geprüften Wandkonstruktion

Gesamtabmessungen der geprüften Konstruktion: Breite: $b = 3000 \text{ mm}$, Höhe: $h = 3000 \text{ mm}$, Dicke: $d = 220 \text{ mm}$		
Position	Material/ Abmessungen	Anmerkungen
Wandkonstruktion:  <i>Abbildung: Schalungskonstruktion</i>	<u>Stampflehmwand:</u> Lagenweises (Schichten von 100 mm bis 150 mm) einbringen und verdichten von „Conluto Stampflehm grob“ in eine vorbereitete Holzbrettschalung mit einer Öffnungsbreite von 220 mm Wärmeleitfähigkeit 1,40 W/mK Korngruppe, Überkorngröße 0/22, < 30 mm Druckfestigkeit $\geq 3 \text{ N/mm}^2$ Die Verdichtung erfolgte mit einem pneumatischen Stampfer Metallstampffuß 80 mm x 80 mm Verdichtungsenergie 29 Joule <u>Verschluss Schalungslöcher</u> Die Schalungslöcher wurden mit Conluto Stampflehm groß und fein verschlossen. Der Verschluss der Schalungslöcher erfolgte am 16. März 2022	<u>Anmerkung:</u> Der Stampflehm wurde in Big Bags zur Prüfstelle geliefert und vor dem Einbau auf dem Hallenboden ausgebreitet und mittels Lüfter vorgetrocknet Die Stampflehmwand wurde am 19. Januar 2022 hergestellt und bis zum 07. Februar 2022 in der Holzbrettschalung belassen Am 07. Februar 2022 wurde die Stampflehmwand komplett ausgeschalt <u>Anmerkung Schalungslöcher:</u> Durch die Stampflehmwand waren 16 Stück Gewindestangen zur Halterung der Holzbrettschalung geführt. Diese Gewindestangen wurden nach dem Ausschalen entfernt

2.2 Probekörper- und Baustoffkennwerte

Die Materialien wurden nicht amtlich entnommen. Zum Zeitpunkt der Prüfung entsprach der Feuchtegehalt des Probekörpers annähernd dem Zustand, welcher vom Ingenieurbüro Jäger Ingenieure GmbH mit 1,50 bis 1,90 M.-% vorgegeben wurde. Für die geprüfte Konstruktion und die verwendeten Baustoffe gelten die in der Tabelle 2 zusammengestellten Angaben hinsichtlich der Baustoffklassifizierung, der Rohdichten sowie der Feuchtegehalte.

Tabelle 2 Baustoffkennwerte der Stampflehmwandkonstruktion

Baustoffbezeichnung	Dicke [mm]	Rohdichte Einbauzustand [kg/m ³]	Feuchte- gehalt [M.-%]	Baustoffklassifizierung
Stampflehm grob Conluto ³⁾ Firma Conluto (Vielfalt aus Lehm) Wärmeleitfähigkeit 1,40 W/mK Korngruppe, Überkorngröße 0/22, < 30 mm Nennrohddichte (trocken) 2200 kg/m ³ Druckfestigkeit ≥ 3 N/mm ² Trocknungsschwindmaß < 0,5%	220	2151,4	nach 28 Tagen 4,37	A1 ¹⁾
1910,5		nach 60 Tagen 2,84		
2153,5		nach ²⁾ 132 Tagen 1,81		

¹⁾ Gemäß Produktdatenblatt der Firma Conluto

²⁾ Die Feuerwiderstandsprüfung erfolgte nach 157 Tagen Trocknungszeit

³⁾ Abschrift Produktdatenblatt der Firma Conluto: Stampflehm ist eine Fertigmischung nach den Lehm-Bau-Regeln (3.9) des „Dachverbandes Lehm“. Er wird hergestellt aus gemischt-körnigem bis steinigem Baulehm mit einer Bindekraft von 80 g/cm³ und mineralischen Zuschlägen aus Grobsand, Kies oder Splitt.

3 Prüfanordnung und -durchführung

Die geprüfte Stampflehmwandkonstruktion wurde vom Auftraggeber in der Prüfstelle der MFA Leipzig GmbH im Normtragrahmen aus Stahlbeton hergestellt. Sie wird als 2-seitig (oben und unten) gehaltene Wand mit den Abmessungen h x b = 3000 mm x 3000 mm beschrieben und bildet den vertikalen Raumabschluss.

Für den Ofenverschluss wurde der seitliche Spalt von ca. 25 mm zwischen den vertikalen Rändern der Prüfkonstruktion und des Prüfrahmens mit Mineralwolle (Schmelzpunkt > 1000°C) entsprechend DIN EN 1365-1: 2013-08 verfüllt.

Gemäß Vorgaben des Ingenieurbüros Jäger Ingenieure GmbH wurde die Belastung von 153 kN (51 kN/m) 15 Minuten vor Beginn der Feuerwiderstandsprüfung auf die Wandkonstruktion aufgebracht. Die Belastung wurde über zwei hydraulische Zylinder aufgebracht, welche die Last über eine lastverteilende und ausreichend biegesteife Traverse gemäß DIN EN 1365-1: 2013-08, Abschnitt 4.3 in die Konstruktion einleiteten und während der Feuerwiderstandsprüfung konstant hielten. Weiterhin erfolgte am oberen und unteren Rand die Einspannung der Wandkonstruktion durch die Lastaufbringung gemäß DIN EN 1365-1:2013-08, Abschnitt 7.3.

Die Aufheizung des Brandraums erfolgte nach der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) gemäß DIN EN 1363-1: 2020-05. Zur Messung der Temperaturen im Brandraum wurden acht Platten-Thermometer gemäß DIN EN 1363-1: 2020-05, Abschnitt 4.5.1.1 im Abstand von 100 mm von der Oberfläche der Wandkonstruktion installiert. Sie dienten der Steuerung der Brandraumtemperatur.

Zum Nachweis der Temperaturen auf der unbeflammten Seite des Probekörpers wurden 11 NiCr-Ni-Thermoelemente gemäß DIN EN 1363-1: 2020-05, Abschnitt 4.5.1.2 in Verbindung mit DIN EN 1365-1: 2013-08 verwendet.

Zusätzlich wurden fünf Messleitern mit jeweils acht NiCr-Ni-Thermoelemente (Messspitze Perle) innerhalb der Konstruktion angebracht, um den Temperaturverlauf innerhalb des Bauteiles über die Querschnittstiefe aufzuzeichnen. Die Messstellenanordnung der benannten Thermoelemente kann der Anlage 2 entnommen werden.

Die Umgebungstemperatur wurde seitlich in etwa 1 m Entfernung vom Probekörper in dessen Ebene ermittelt.

Die Druckmessung im Brandraum erfolgte gemäß DIN EN 1363-1: 2020-05, Abschnitt 4.5.2 und 5.2 mit einem Differenzdruck-Messumformer $PU \pm 100$ Pa in einer Höhe von 2,90 m gemessen vom Fußboden des Prüfofens.

Zur Messung und Aufzeichnung der Verformungen wurden an drei verschiedenen Stellen in halber Wandhöhe sowie an zwei Stellen an der unteren Traverse des Probekörpers potentiometrische Wegsensoren installiert. Die Lage der Wegsensoren kann der Anlage 2 entnommen werden.

Alle Brandraum- und Oberflächentemperaturen, die Verformungen der Wandkonstruktion sowie der Druck im Brandraum wurden im Zeitintervall von zehn Sekunden gemessen und registriert.

Die während der Feuerwiderstandsprüfung ermittelten Oberflächentemperaturen auf der feuerabgewandten Seite, die Brandraumtemperatur, die Temperaturen in der Wandkonstruktion, die Verformung der Wandkonstruktion und der Druck im Brandraum können der Anlage 3 sowie Anlage 4 entnommen werden.

4 Prüfergebnisse und -beobachtungen

Die während der Feuerwiderstandsprüfung ermittelten Messergebnisse können der Anlage 3 und 4 entnommen werden. Die Beobachtungen während der Feuerwiderstandsprüfung sind aus Tabelle 3 ersichtlich.

Tabelle 3 Beobachtungen während der Feuerwiderstandsprüfung vom 24. Juni 2022

Prüfzeit [min:s]	Beobachtungen während der Prüfung	Beobachtungsseite ¹⁾
-15:00	Vorgegebene Belastung von 51,0 kN/m vollständig aufgebracht.	---
0:00	Start der Prüfung.	---
2:00	Leichter Rauchaustritt am linken Wandanschluss im oberen Bereich (Übergang Mineralwolle).	FA
5:00	Nachlassender Rauchaustritt am linken Wandanschluss (Übergang	FA
6:00	Leichte Verfärbungen über der Stampflehmoberfläche.	F
8:00	Zunehmende Verfärbungen über der Stampflehmoberfläche.	F
10:00	Vertikalriss auf der linken Probekörperseite.	FA
13:00	Rissaufweitung des benannten Vertikalrisses auf der linken Probekörperseite.	FA
13:00	Punktförmige Schwarzfärbungen über der Probekörperoberfläche zu erkennen.	F
14:00	Zweiter Vertikalriss auf der rechten Probekörperseite erkennbar.	FA
15:00	Horizontalriss auf der rechten Probekörperseite im unteren Eckbereich.	FA
17:00	Rissaufweitung des Vertikalrisses auf der linken Probekörperseite.	FA

¹⁾ F = Feuerseite FA = Feuerabgewandte Seite

Fortsetzung der Tabelle 3 siehe nächste Seite

Fortsetzung Tabelle 3 Beobachtungen während der Feuerwiderstandsprüfung vom 24. Juni 2022

Prüfzeit [min:s]	Beobachtungen während der Prüfung	Beobachtungsseite ¹⁾
23:00	Weitere Rissaufweitung des Vertikalrisses auf der linken Probekörperseite.	FA
28:00	Weiterer Horizontalriss auf der linken Probekörperseite ca. in halber Höhe.	FA
30:00	Verformung der Stampflehmwand Richtung Brandraum zu erkennen.	F/FA
38:00	Rissaufweitung des benannten Vertikalrisses auf der linken Probekörperseite.	FA
48:00	Leichte Verfärbung (Wasserdampf) auf der Probekörperoberfläche in einem lokalen Bereich am Riss auf der linken Probekörperseite.	FA
50:00	Knackgeräusch im Probekörper wahrzunehmen.	---
64:00	Zunehmende Verfärbung (Wasserdampf) auf der Probekörperoberfläche in einem lokalen Bereich am Riss auf der linken Probekörperseite.	FA
67:00	Weiterer Riss auf der linken Probekörperseite zu erkennen.	FA
69:00	Weitere lokale Verfärbungen (Wasserdampf) auf der Probekörperoberfläche an verschiedenen Stellen in den Rissbereichen.	FA
76:00	Zunehmende Verformung der Stampflehmwand Richtung Brandraum.	F/FA
80:00	Weitere lokale Verfärbungen (Wasserdampf) auf der Probekörperoberfläche an verschiedenen Stellen in den Rissbereichen.	FA
90:00	Keine signifikante weitere Veränderung an der Wandkonstruktion.	F/FA
90:00	Wegsensoren für die Durchbiegungsmessung wurden entfernt.	FA
92:00	Ausführung des 1. Pendelschlags:	---
	Ergebnis: Keine sichtbare Veränderung/Beschädigung des Probekörpers aufgrund der Stoßbeanspruchung.	FA
	Ergebnis: Keine sichtbare Veränderung/Beschädigung des Probekörpers aufgrund der Stoßbeanspruchung.	F
93:00	Ausführung des 2. Pendelschlags:	---
	Ergebnis: Keine sichtbare Veränderung/Beschädigung des Probekörpers aufgrund der Stoßbeanspruchung.	FA
	Ergebnis: Keine sichtbare Veränderung/Beschädigung des Probekörpers aufgrund der Stoßbeanspruchung.	F
94:00	Reduzierung der Last auf 5% der Gesamtlast.	---
96:00	Ausführung des 3. Pendelschlags:	---
	Ergebnis: Keine sichtbare Veränderung/Beschädigung des Probekörpers aufgrund der Stoßbeanspruchung.	FA
	Ergebnis: Keine sichtbare Veränderung/Beschädigung des Probekörpers aufgrund der Stoßbeanspruchung.	F
100:00	Beendigung der Feuerwiderstandsprüfung in Abstimmung mit dem Auftraggeber.	---

¹⁾ F = Feuerseite FA = Feuerabgewandte Seite

5 Zusammenfassung der Prüfergebnisse - Gegenüberstellung mit den Leistungskriterien nach DIN EN 1363-1: 2020-05 in Anlehnung an DIN EN 1365-1: 2013-08

Am 24. Juni 2022 wurde die in Abschnitt 2 dieses Berichtes beschriebene Stampflehmwandkonstruktion gemäß DIN EN 1363-1: 2020-05 in Verbindung mit DIN EN 1365-1: 2013-08 einer Feuerwiderstandsprüfung unter einseitiger Brandbeanspruchung unterzogen.

Der Vergleich der Prüfergebnisse mit den Leistungskriterien nach DIN EN 1363-1: 2020-05 in Verbindung mit DIN EN 1365-1: 2013-08 für tragende, raumabschließende und wärmedämmende Wände bei einseitiger Brandbeanspruchung ist in Tabelle 4 hinsichtlich der Tragfähigkeit R, des Raumabschlusses E und der Isolation I aufgeführt.

Tabelle 4 Vergleich der Prüfergebnisse mit den Leistungskriterien nach DIN EN 1365-1 in Verbindung mit DIN EN 1363-1 für die tragende Wandkonstruktion in Stampflehmbauweise

Zeile	Norm- bezug Angaben nach DIN EN 1363-1: 2020-05 Abschnitt:	Anforderungen		Prüfergebnisse an der tragenden Stampflehmwandkonstruktion				Vergleich der Prüfergebnisse mit den Leistungs- kriterien nach DIN EN 1365-1: 2013-08	
				Beschreibung				REI 90-M	
1	11.1	Tragfähig- keit	Beibehaltung der Tragfähigkeit unter Last:	vorh. max. Belastung	51,0 kN/m			erfüllt	
2			Grenzwert der vertikalen Stauchung	Tragfähigkeitserhalt über:	mindestens 100 Minuten				
			Stauchungs- geschwindigkeit	C = h/100 C = 30 mm	Maximal 22,36 mm nach 90 Minuten an WS1				
3	11.2	Raumab- schluss d.h. Vermeidung von:	Entzündung des Wattebausches	Entzündung des Wattebausches erfolgte nach:	Test nicht erforderlich -nicht erfolgt-			erfüllt	
4			Auftreten von Spalten	Das Durchdringen einer Spaltlehre erfolgte nach:	Test nicht erforderlich -nicht erfolgt-			erfüllt	
5			Flammen auf der abgekehrten Seite	Anhaltende Flammenbildung trat auf nach:	-nicht erfolgt-			erfüllt	
6	11.3	Wärmedämmung d.h. Temperaturerhöhung auf der dem Feuer abgekehrten Seite über die Anfangs- temperatur: max. zul. Mittelwert $\Delta T = 140$ K max. zul. Einzelwert $\Delta T = 180$ K	Prüfdauer in min:	30	60	90	100	erfüllt	
7			max. festgestellte Temperaturerhöhung: Mittelwert in K:	0	7	37	45		
8			max. festgestellte Temperaturerhöhung: - Einzelwert in K:	1,5	12	45	51		
			- an Messstelle:	OF 6	OF 6	OF 10	OF 3		
9	5.6	Sonstige Angaben	Umgebungstemperatur bei Beginn der Prüfung im Labor:	29°C				Angaben, z.B. über Baustoffe, Rohdichten und Feuchtigkeitsgehalt, siehe Tabelle 2	
10			Die Umgebungs- temperatur stieg/ sank während der Prüfung um max.:	+ 1 K					
11			5.2.2.1	Druck im Brandraum:	gem. DIN EN 1363-1 vgl. Anlage 4				
12				Rauchentwicklung:	gering				
13				horizontale Verformung:	WS4				
				- Größe	40 mm				
		- Zeitpunkt	90 min						
14	DIN EN 1363-2: 1999-10 Abschnitt: 7	Mechanische Beanspruchung (Stoßprüfung) nach Erreichen der Klassifizierungszeit	Verhalten R-, E- und I nach Stoßprüfung eingehalten	1. Stoß	2. Stoß	3. Stoß	erfüllt		
				ja	ja	ja			

6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen auf der Grundlage von DIN EN 1363-1: 2020-05 in Verbindung mit DIN EN 1365-1: 2013-08

Aufgrund der erzielten und in Tabelle 4 aufgeführten Prüfergebnisse ergibt sich für die tragende, raumabschließende und wärmedämmende Stampflehmwandkonstruktion bei einseitiger Brandbeanspruchung eine Feuerwiderstandsdauer von 100 Minuten.

Die geprüfte Stampflehmwandkonstruktion hat bei einseitiger Brandbeanspruchung die Anforderungen hinsichtlich der Tragfähigkeit, des Raumabschlusses und der Wärmedämmung gemäß DIN EN 13501-2: 2016-12 für die Feuerwiderstandsklasse **REI 90-M** erfüllt. Voraussetzung für die Gültigkeit der vorgenannten Aussagen ist, dass die in diesem Prüfbericht angegebenen Randbedingungen eingehalten werden.

6.1 Direkter Anwendungsbereich gemäß DIN EN 1365-1: 2013-08

Die Ergebnisse der Feuerwiderstandsprüfung sind direkt auf ähnliche Ausführungen der Wandkonstruktion übertragbar, bei denen eine oder mehrere der nachstehenden Veränderungen vorgenommen werden und bei denen die Ausführung hinsichtlich der Steifigkeit und Festigkeiten weiterhin die Anforderungen der entsprechenden Bemessungsnorm erfüllt:

- Reduzierung der Höhe der Wand;
- Vergrößerung der Wanddicke;
- Reduzierung der aufgetragenen Belastung.

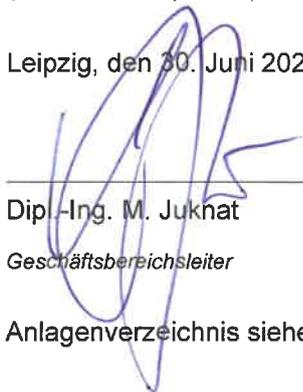
6.2 Bemerkung gem. DIN EN 1363-1: 2020-05, Abs. 12.1

Dieser Prüfbericht beschreibt ausführlich das Montageverfahren, die Prüfbedingungen und die Ergebnisse, die mit dem hier beschriebenen spezifischen Bauteil erzielt wurden, nachdem dieses nach dem in DIN EN 1363-1: 2020-05 dargestellten Verfahren geprüft wurde. Jede wesentliche Abweichung hinsichtlich Größe, konstruktiver Einzelheiten, Belastungen, Spannungszustände, Randbedingungen außer den Abweichungen, die im betreffenden Prüfverfahren für den direkten Anwendungsbereich zulässig sind, ist nicht durch diesen Prüfbericht abgedeckt.

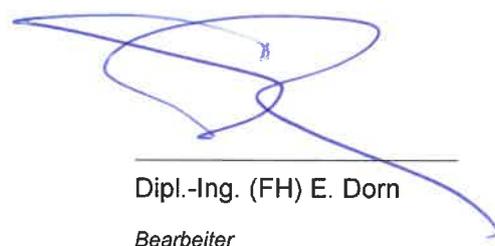
Aufgrund der Eigenart der Prüfungen der Feuerwiderstandsdauer und der daraus folgenden Schwierigkeiten bei der Quantifizierung der Unsicherheit bei der Messung der Feuerwiderstandsdauer ist es nicht möglich, einen festgelegten Genauigkeitsgrad des Ergebnisses anzugeben.

Die Ergebnisse der Prüfungen beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Gegenstände. Dieses Dokument ersetzt keinen Konformitäts- oder Verwendbarkeitsnachweis im Sinne der Bauordnungen (national/europäisch).

Leipzig, den 30. Juni 2022


Dipl.-Ing. M. Jukhat
Geschäftsbereichsleiter




Dipl.-Ing. (FH) E. Dorn
Bearbeiter

Anlagenverzeichnis siehe nächste Seite

Anlagenverzeichnis

Anlage 1 Konstruktiver Aufbau der Stampflehmwandkonstruktion

Anlage 2 Messstellenanordnung der Oberflächenthermoelemente und der eingebauten Thermoelemente in der Wandkonstruktion, sowie Lage der Wegsensoren

Anlage 3 Brandraumtemperaturen, -druck und Wandverformung

Anlage 4 Gemessene Oberflächentemperatur sowie Temperaturen in der Wandkonstruktion

Anlage 5 Fotodokumentation zum Wandaufbau und Einbau

Anlage 6 Fotodokumentation während der Feuerwiderstandsprüfung und der Stoßbeanspruchungen

Anlage 1 Konstruktiver Abmessungen der Stampflehmwandkonstruktion

Abbildung A1.1 Grafische Darstellung der konstruktiven Abmessungen

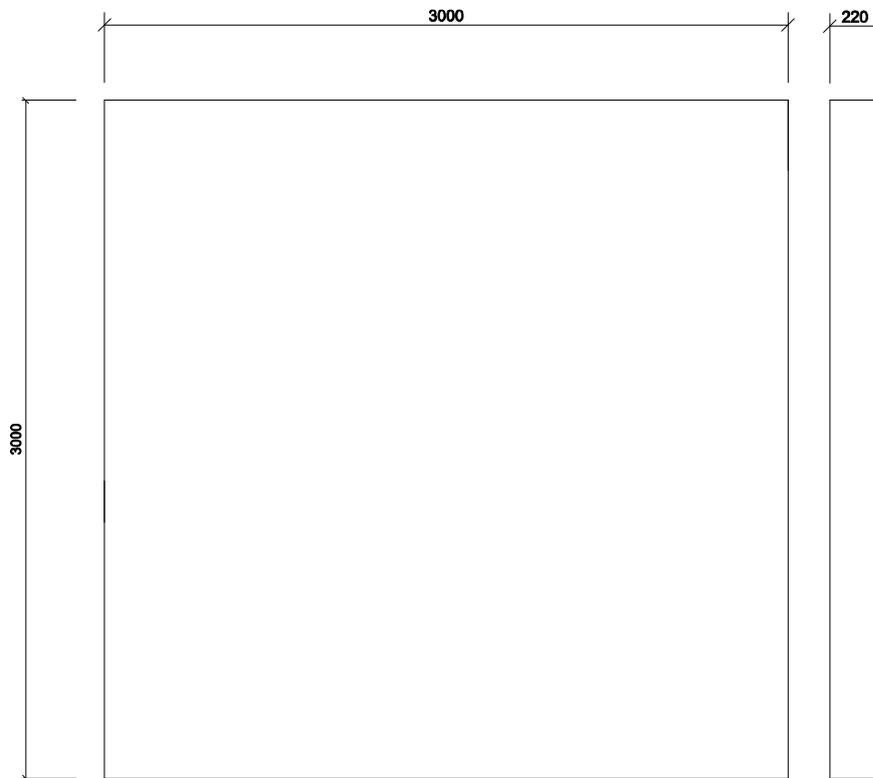
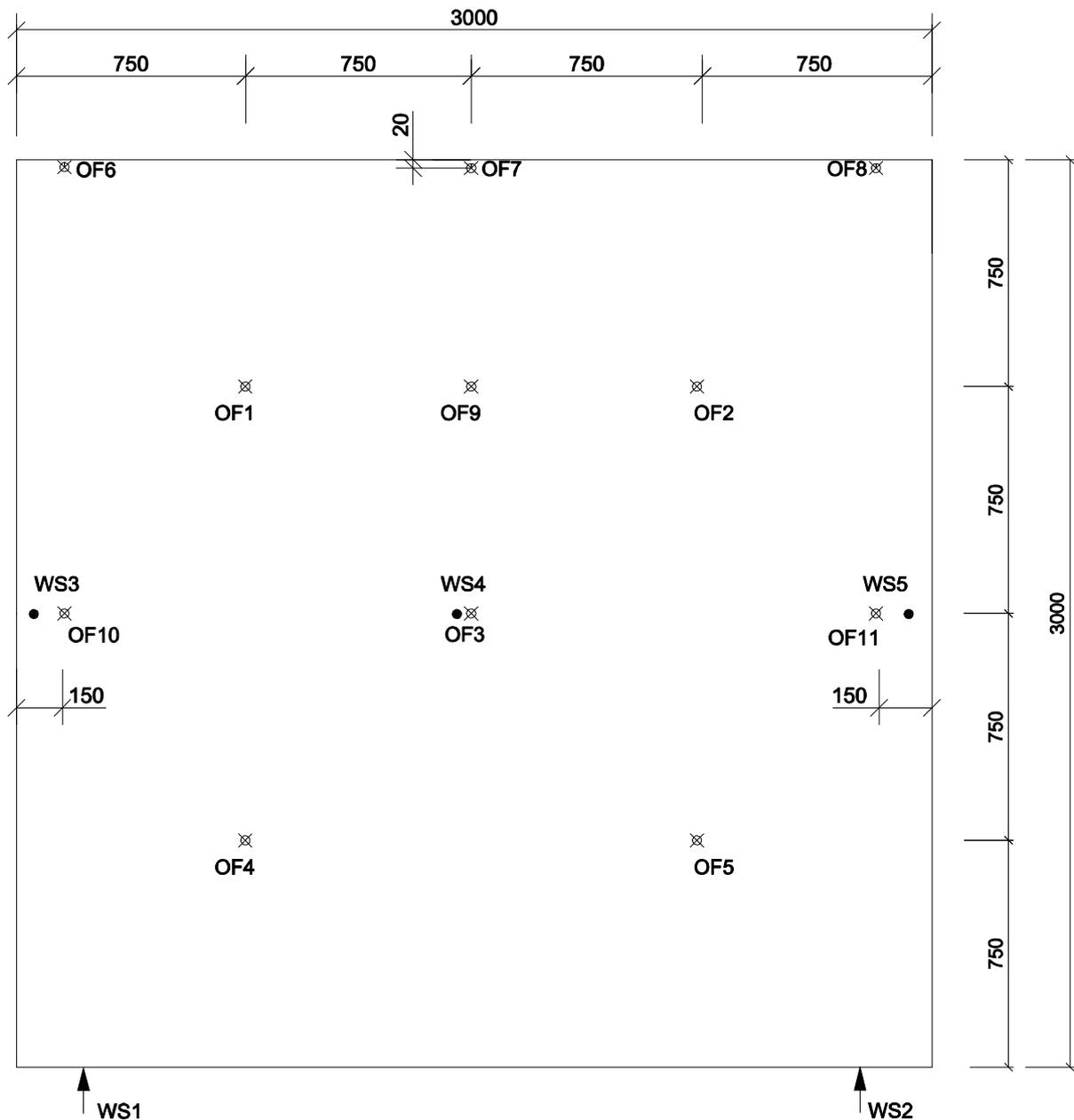


Abbildung A1.2 Abbildung der fertiggestellten Stampflehmwand $d = 220$ mm



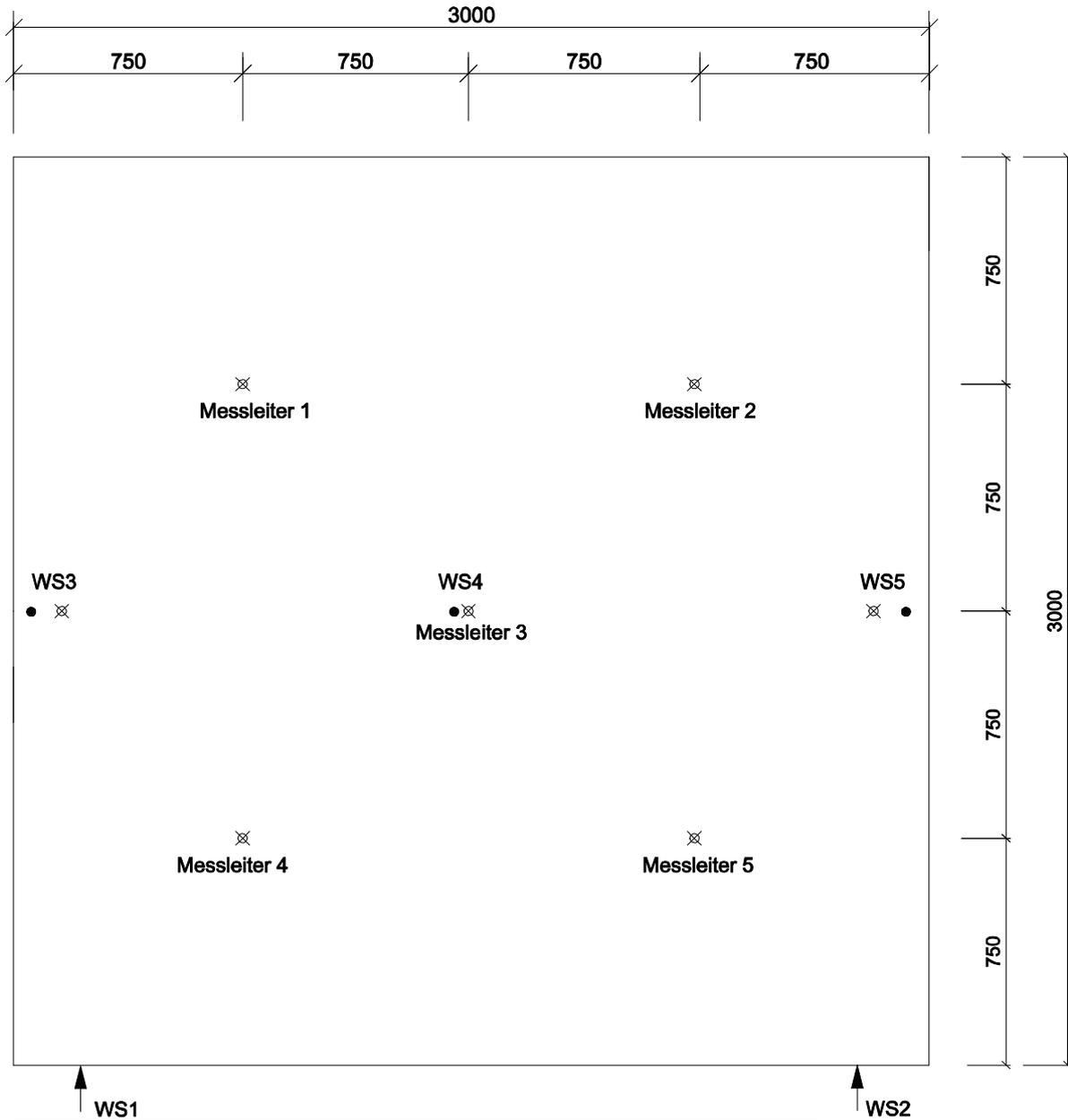
Anlage 2 Messstellenanordnung der Oberflächenthermoelemente und der eingebauten Thermoelemente in der Wandkonstruktion, sowie Lage der Wegsensoren

Abbildung A2.1 Messstellenplan der Oberflächenthermoelemente im Bereich der Wandkonstruktion und Lage der Wegsensoren

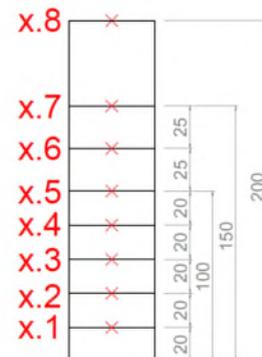


Messstellenübersicht	Positionsbeschreibung
OF1 bis OF5	Oberflächenmessstellen MW im Bereich der Wandkonstruktion (mindestes 50 mm von den Fugen entfernt) Homogener fugenloser Baustoff
OF6 bis OF11	Oberflächenmessstellen im Bereich der Wandkonstruktion
WS1 bis WS2	Verformungsmessung Stauchung
WS3 bis WS5	Verformungsmessung Durchbiegung

Abbildung A2.2 Messstellenplan der Thermoelemente im Probekörperquerschnitt



Messstellenübersicht	Positionsbeschreibung
Messleiter 1	Messung an acht Messpunkten über die Querschnittstiefe der Stampflehmwandkonstruktion verteilt
Messleiter 2	Messung an acht Messpunkten über die Querschnittstiefe der Stampflehmwandkonstruktion verteilt
Messleiter 3	Messung an acht Messpunkten über die Querschnittstiefe der Stampflehmwandkonstruktion verteilt
Messleiter 4	Messung an acht Messpunkten über die Querschnittstiefe der Stampflehmwandkonstruktion verteilt
Messleiter 5	Messung an acht Messpunkten über die Querschnittstiefe der Stampflehmwandkonstruktion verteilt



Anlage 3 Brandraumtemperaturen, -druck und Wandverformung

Diagramm A3.1 Temperatur im Brandraum nach ETK

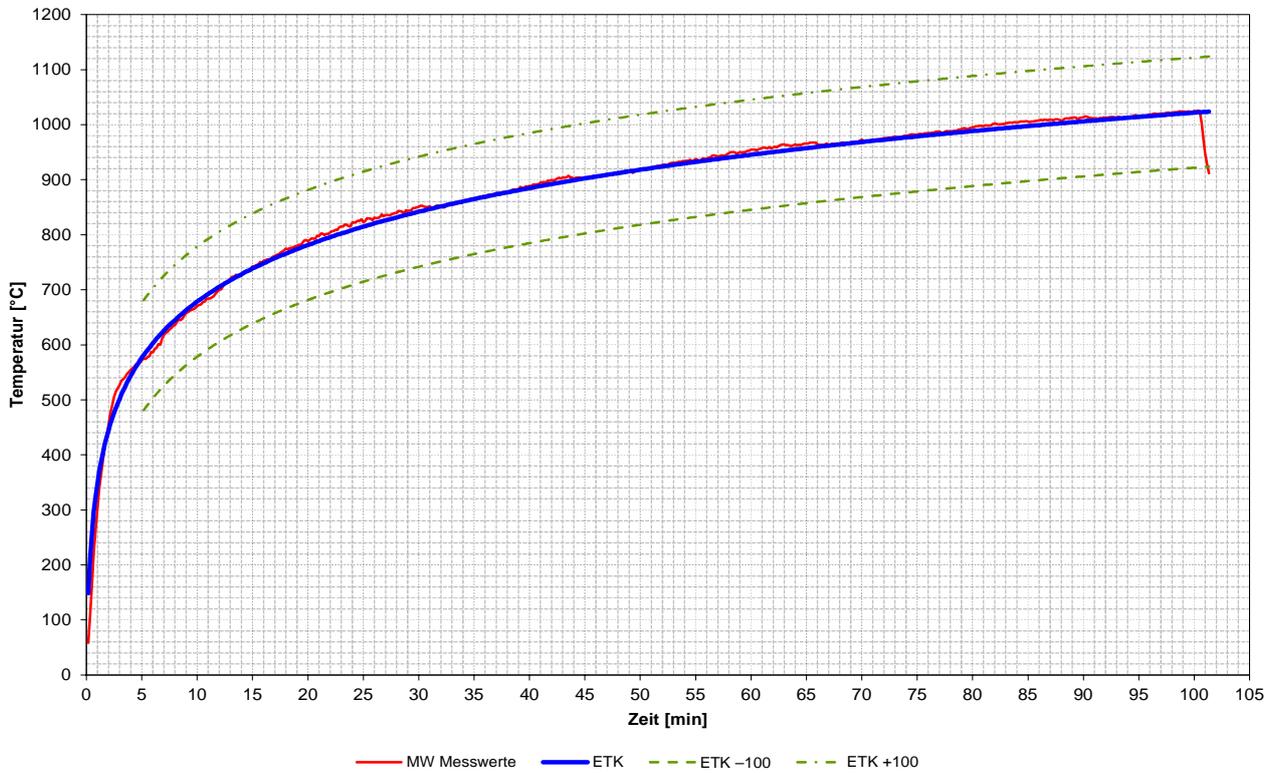


Diagramm A3.2 Relative Abweichung vom Integral der ETK

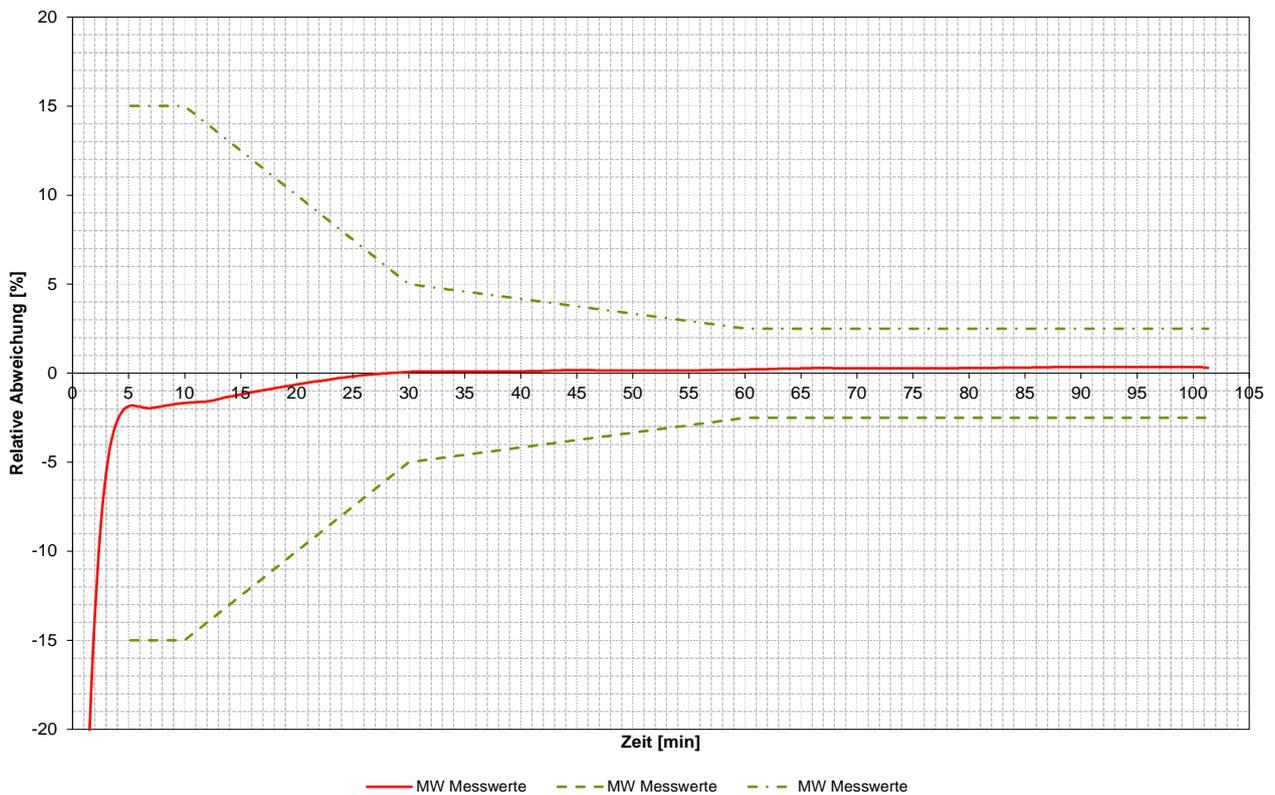


Diagramm A3.3 Gemessene Ofentemperatur aller Ofenthermoelemente OT1 bis OT8

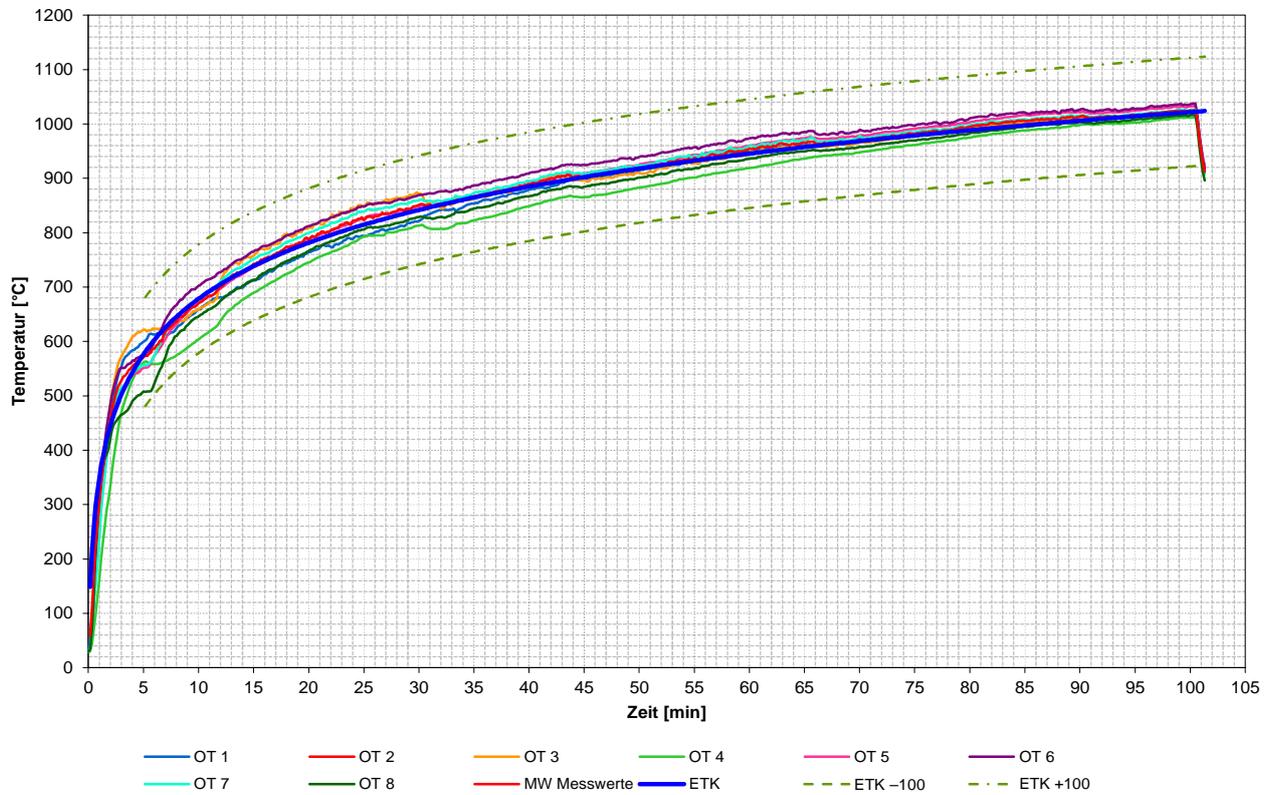


Diagramm A3.4 Druckentwicklung im Brandraum

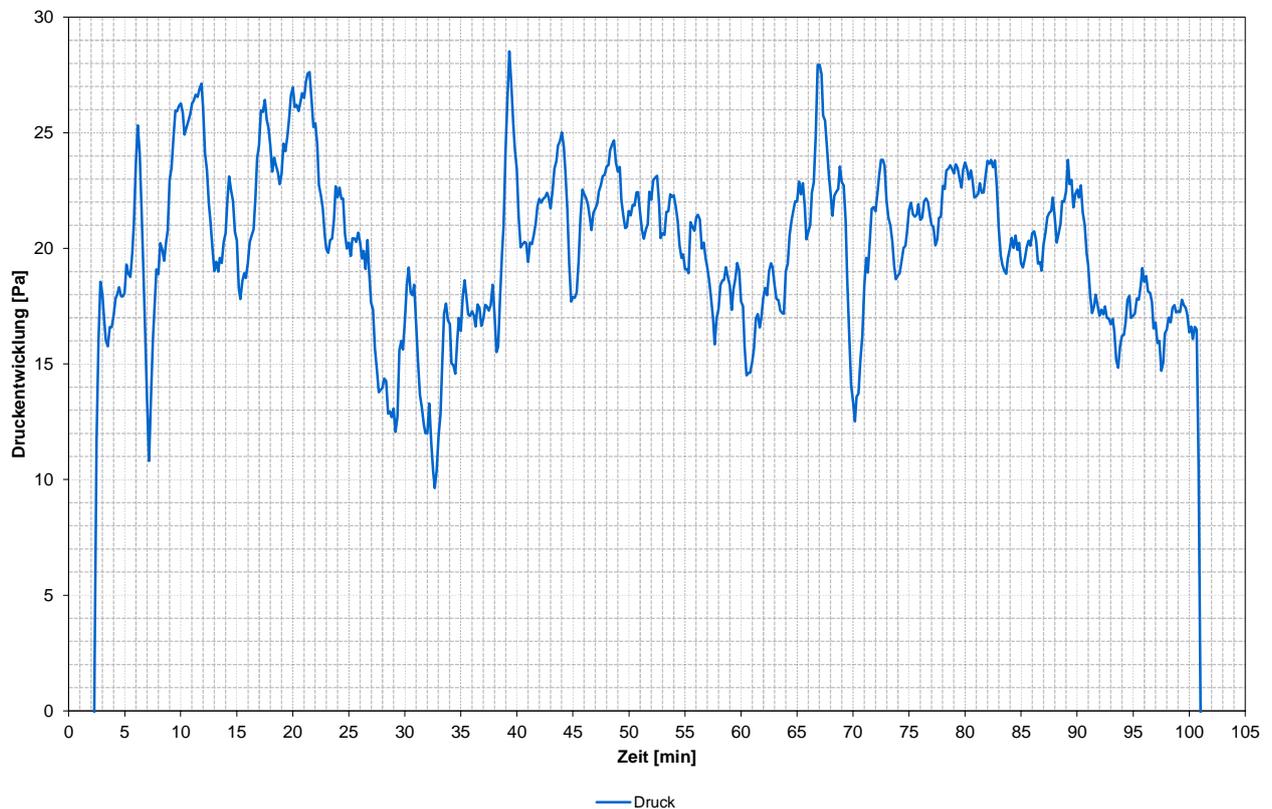


Diagramm A3.5 Raumtemperatur

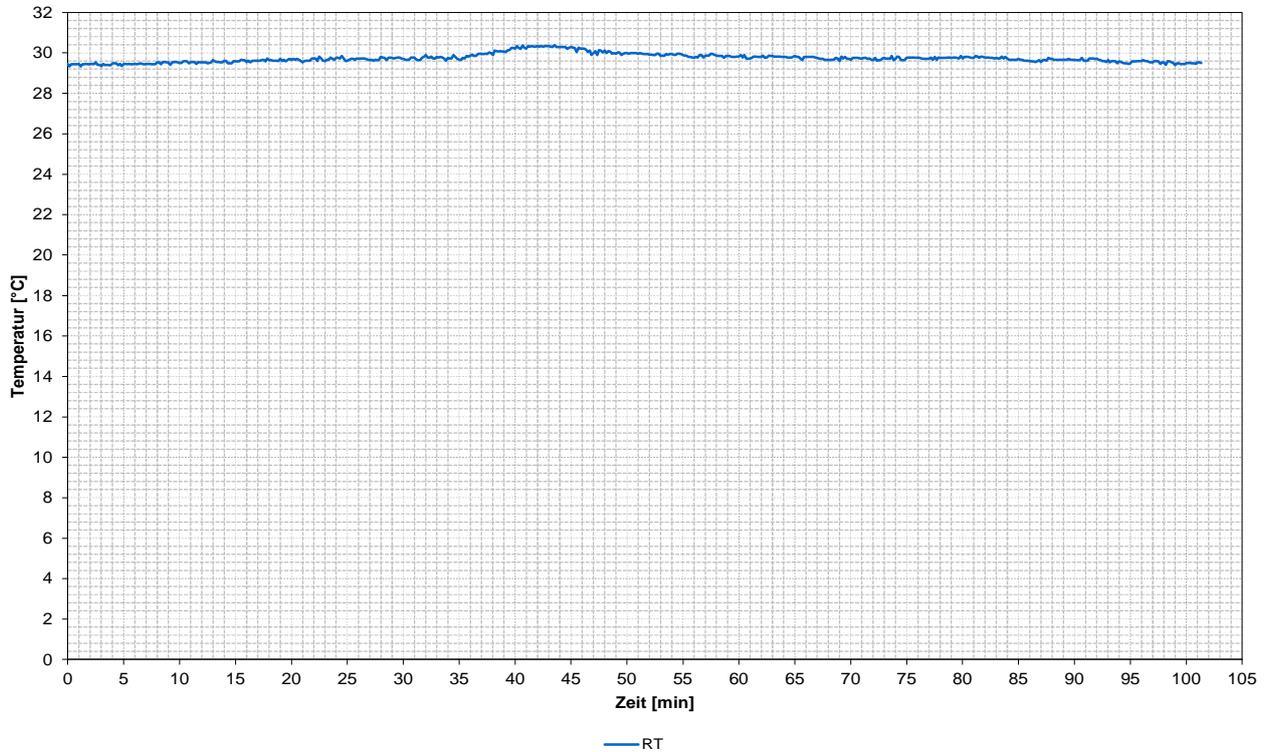


Diagramm A3.6 Horizontale Verformung gemessen in halber Wandhöhe (Durchbiegung)

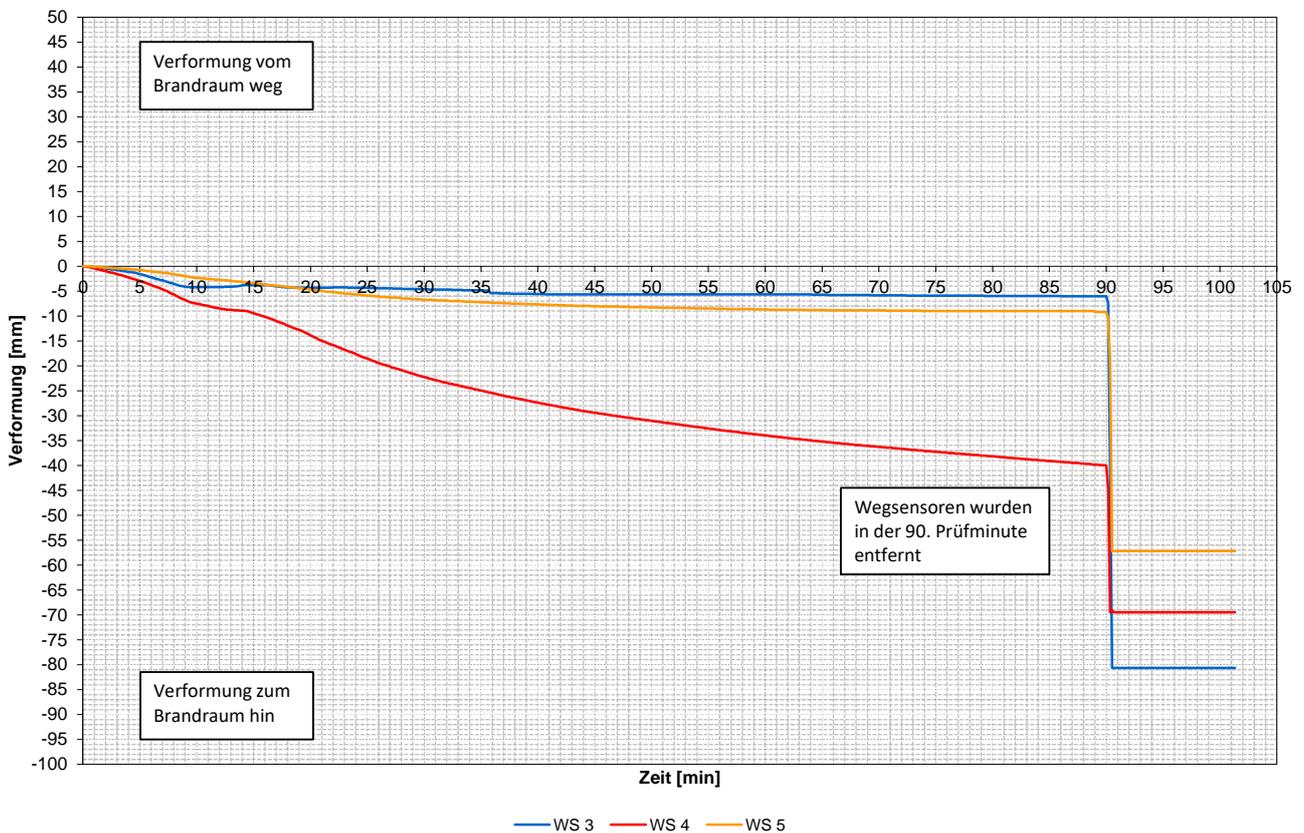


Diagramm A3.7 Stauchung der Wandkonstruktion

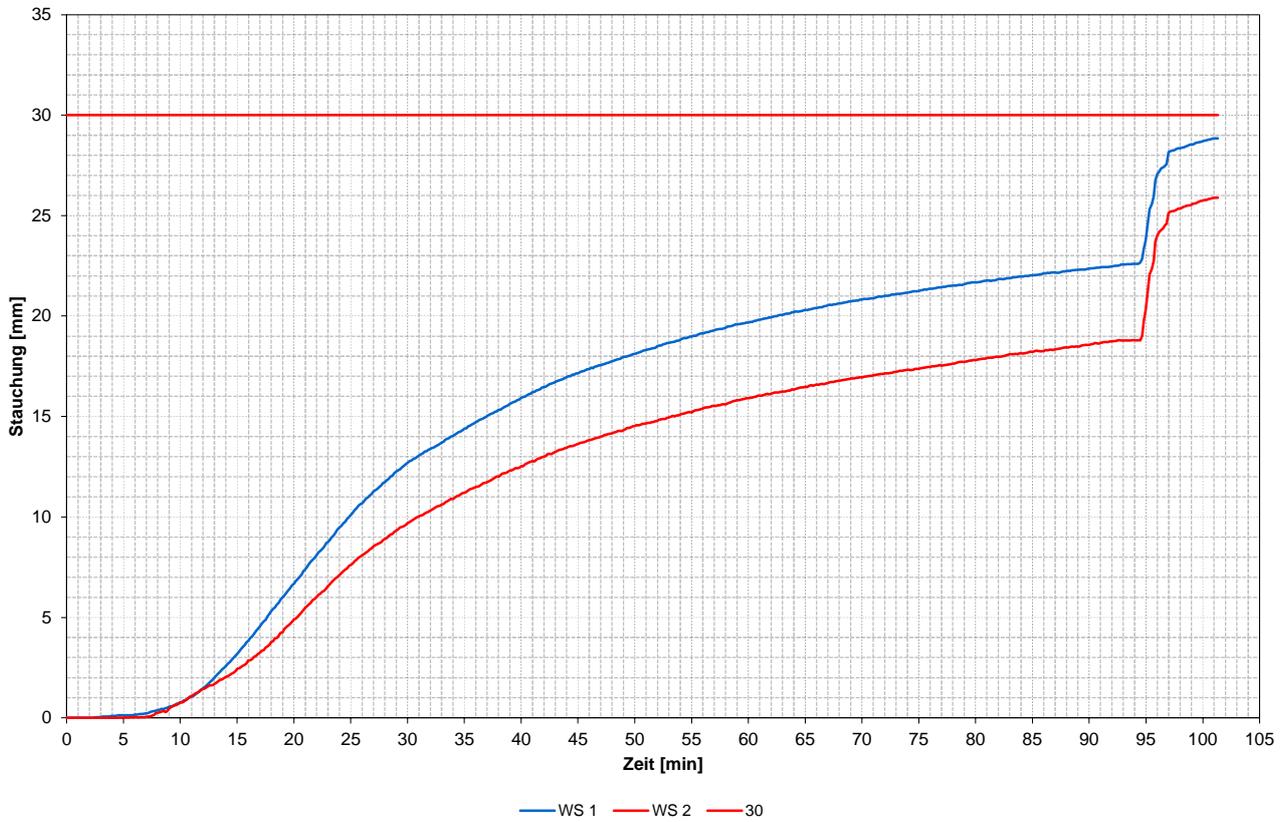


Diagramm A3.8 Stauchungsgeschwindigkeit

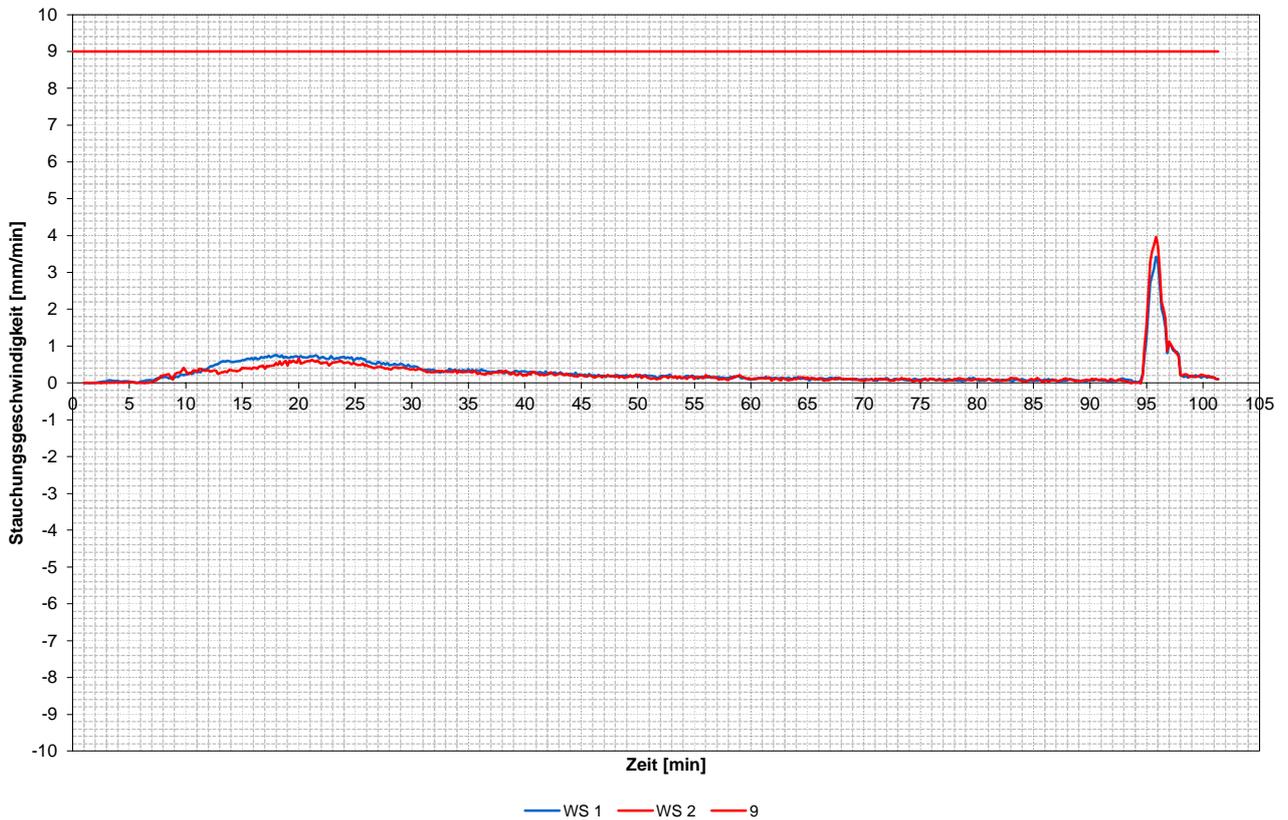
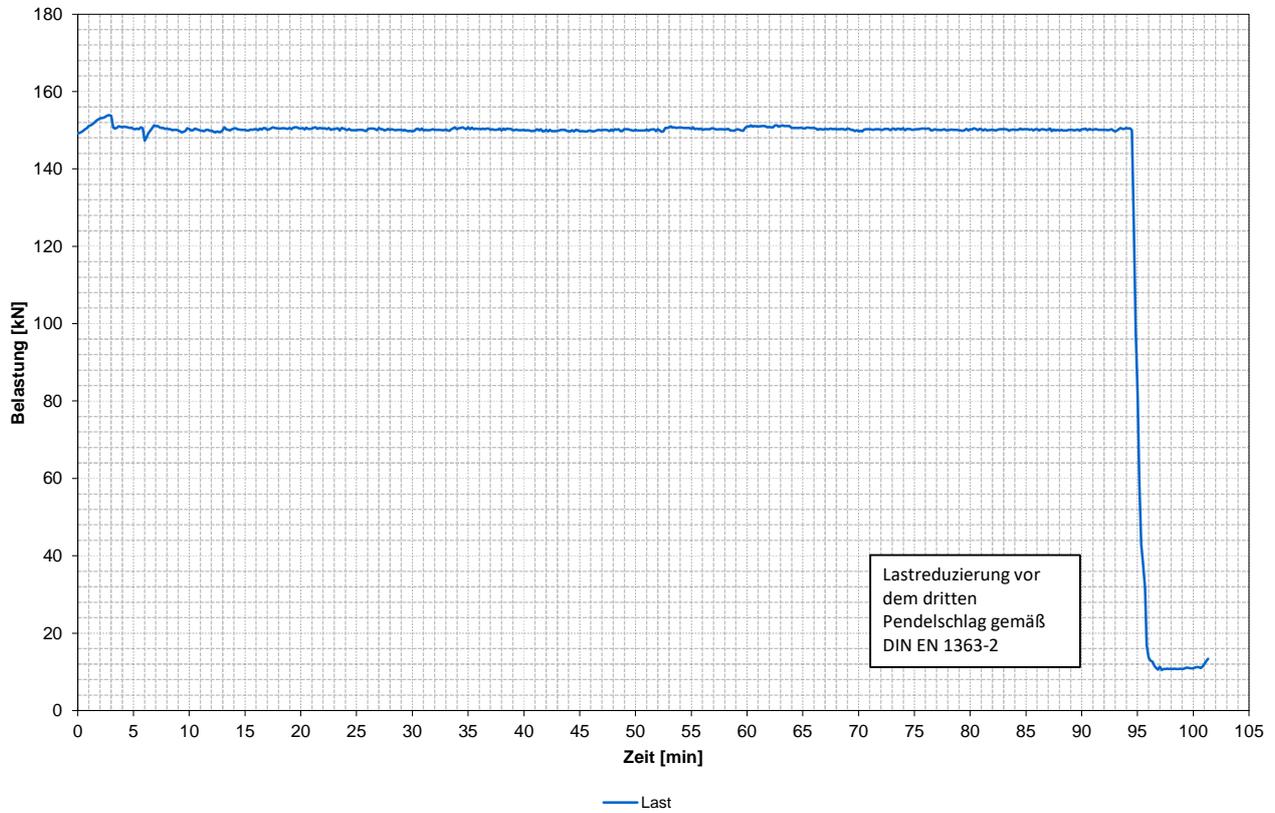


Diagramm A3.9 Belastung der Wandkonstruktion



Anmerkung: Von der endgültigen Belastungsgröße von 153 kN wurden 3 kN aus dem Eigengewicht des Lastausgleichsplatten abgezogen

Anlage 4 Gemessene Oberflächentemperatur sowie Temperaturen in der Wandkonstruktion

Diagramm A4.1 Oberflächenmessstellen Mittelwert OF1 bis OF5

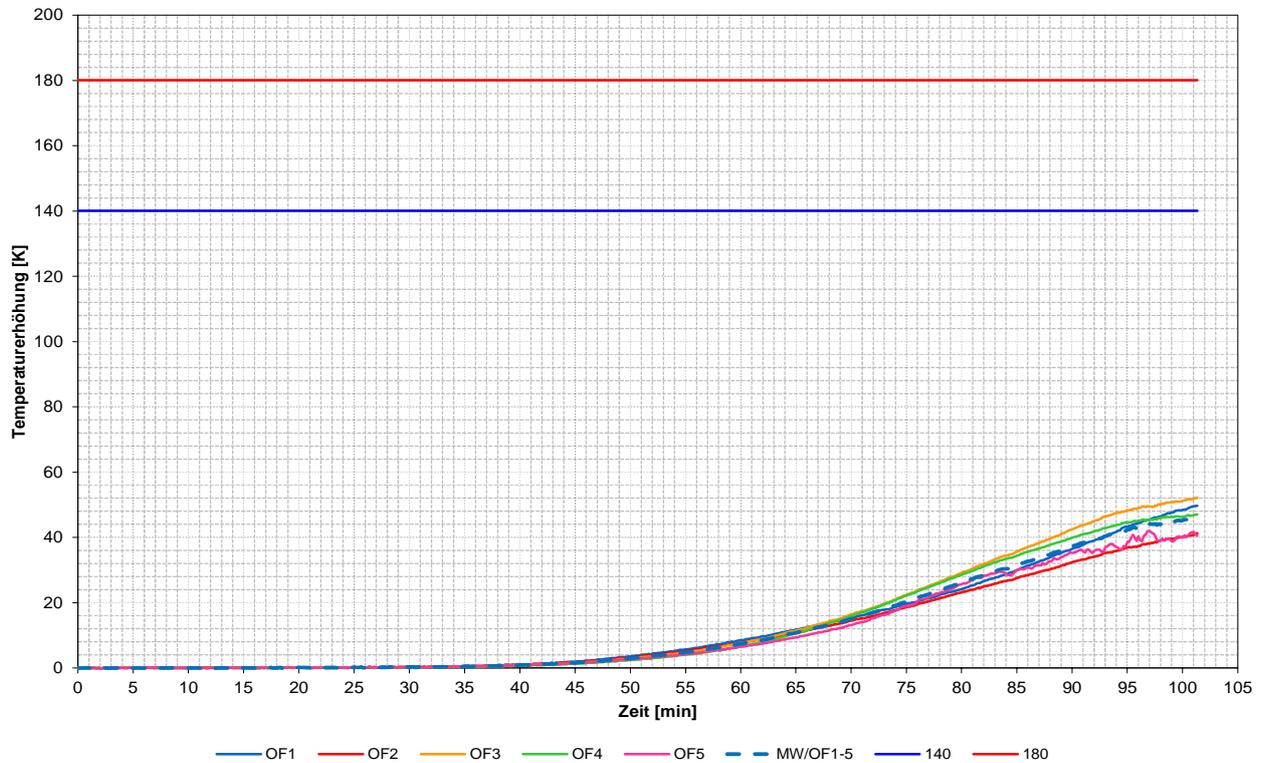


Diagramm A4.2 Oberflächenmessstellen Maximalwert OF6 bis OF11

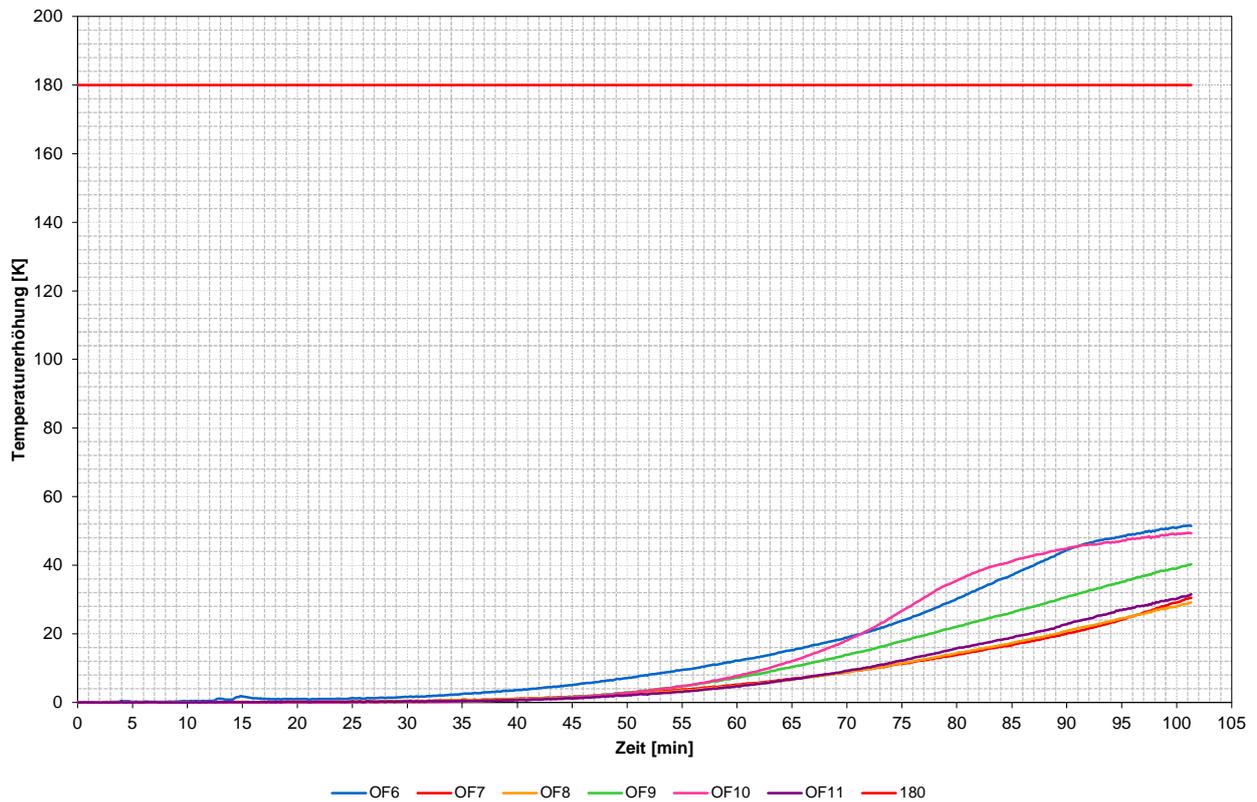


Diagramm A4.3 Messstellen im Probekörper: Messleiter 1

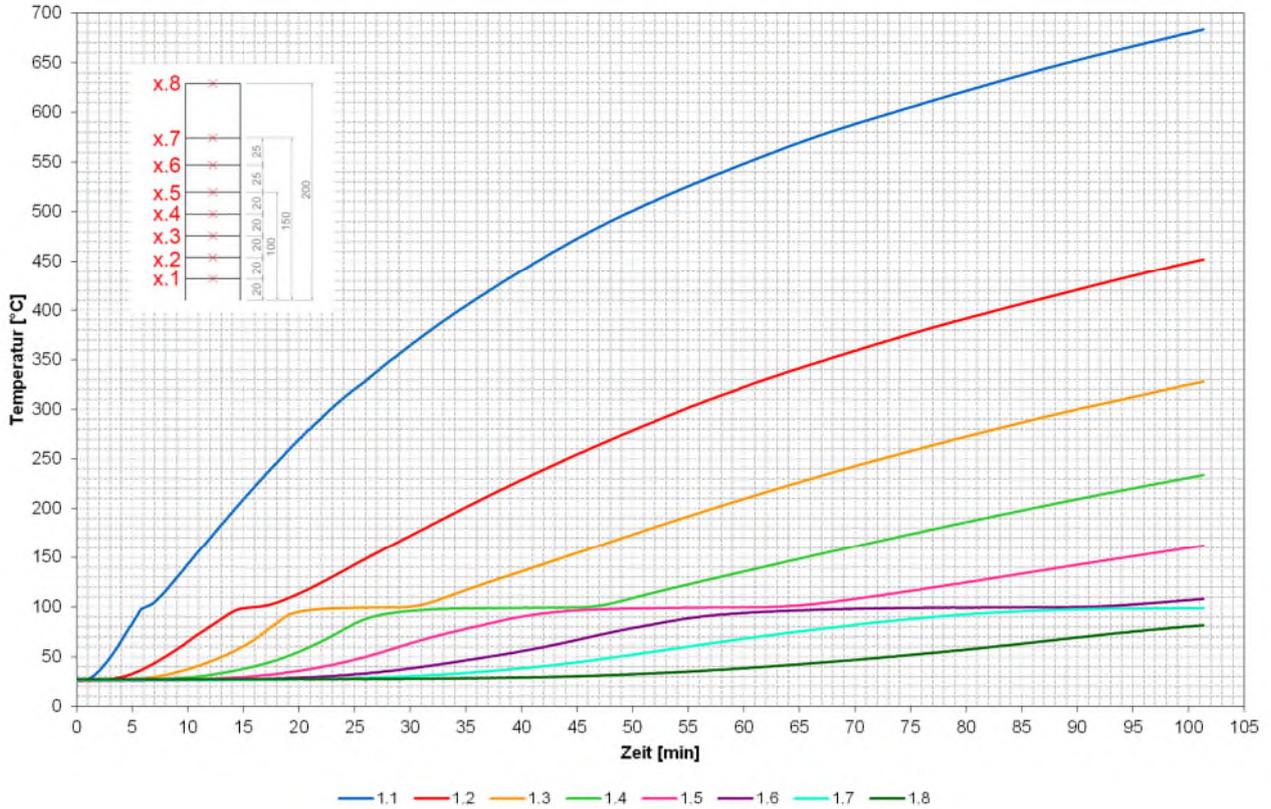


Diagramm A4.4 Messstellen im Probekörper: Messleiter 2

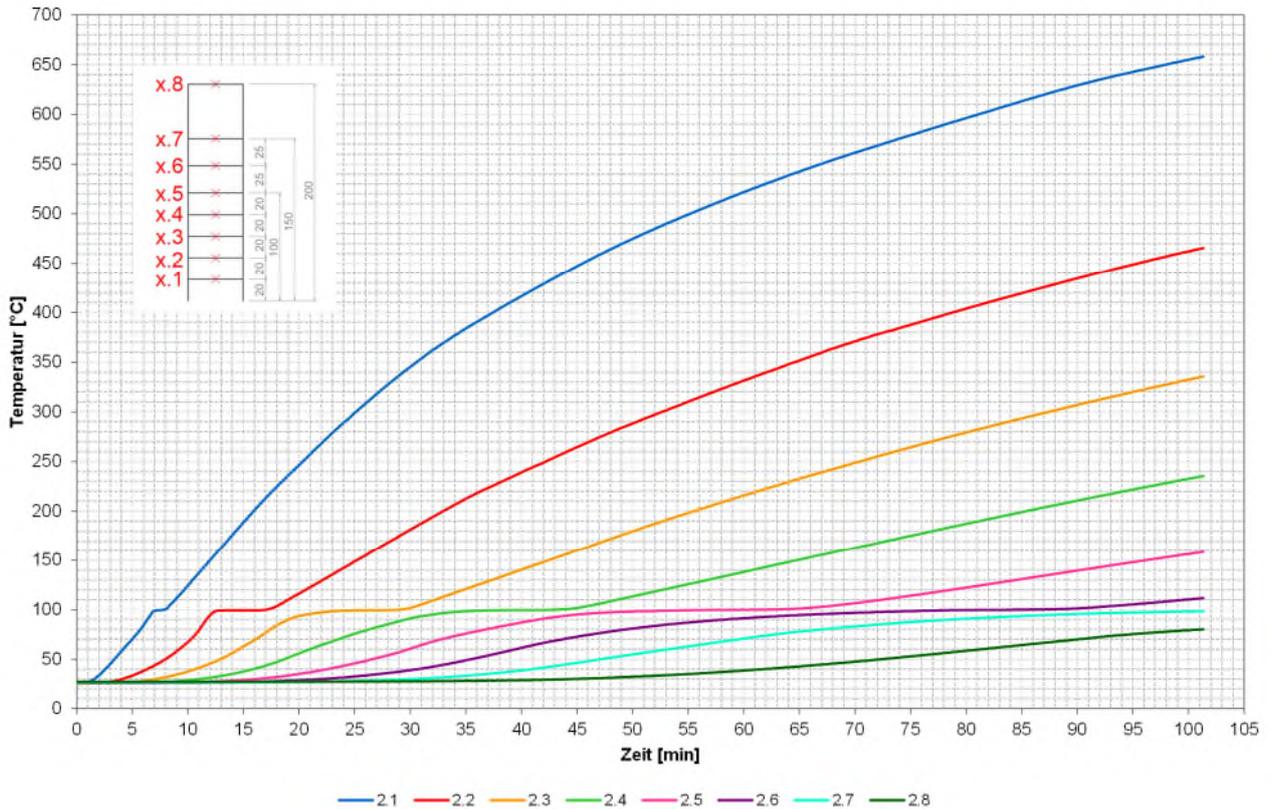


Diagramm A4.5 Messstellen im Probekörper: Messleiter 3

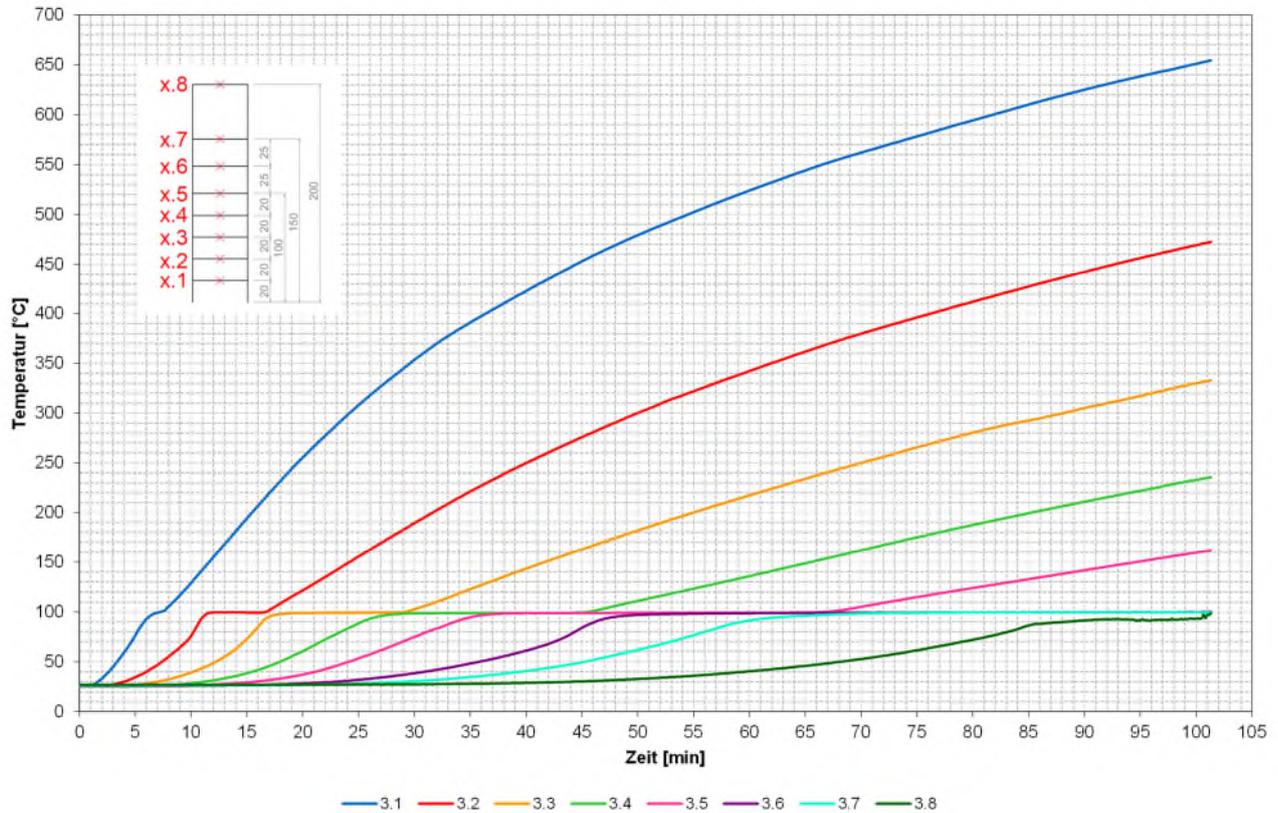


Diagramm A4.6 Messstellen im Probekörper: Messleiter 4

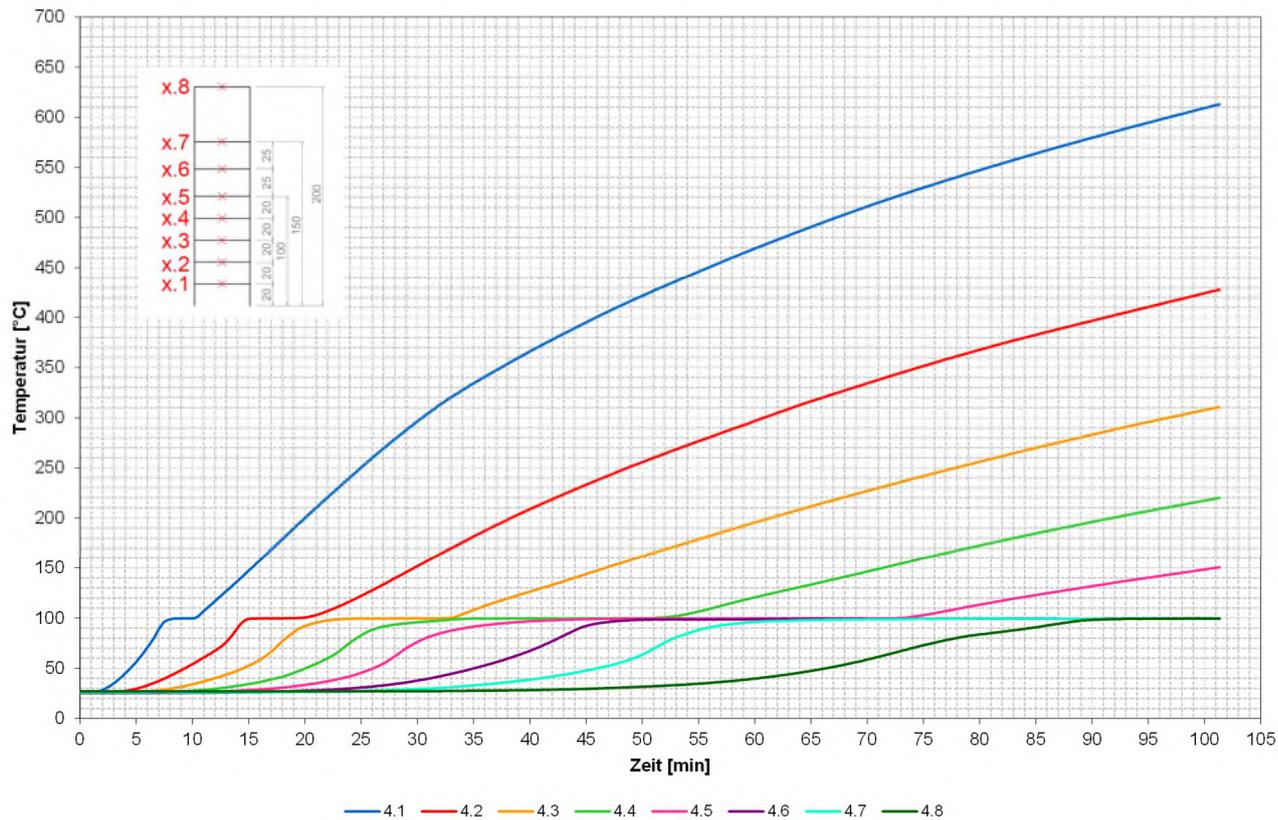
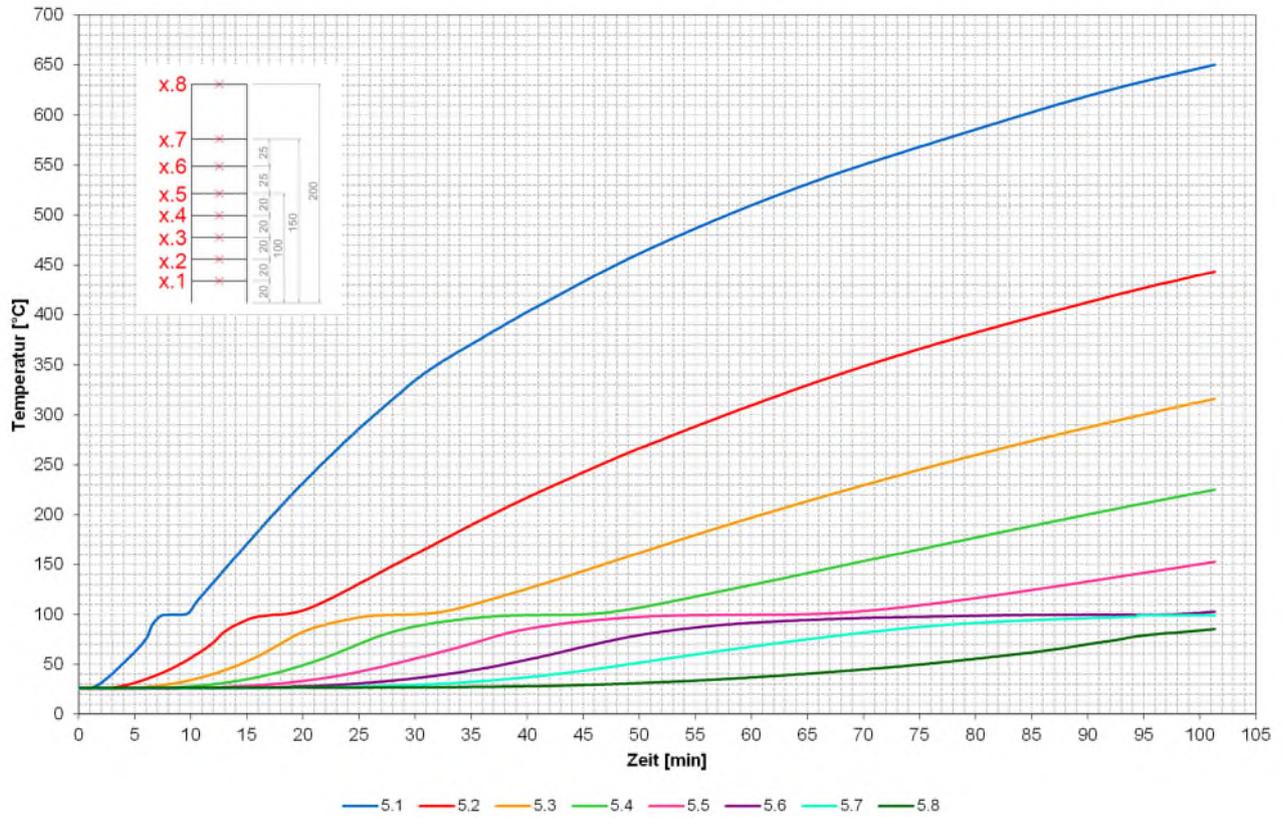


Diagramm A4.7 Messstellen im Probekörper: Messleiter 5



Anlage 5 Fotodokumentation zum Wandaufbau und Einbau



Bild A5.1 Der Stampflehm wurde vor dem Einbau in der Prüfhalle ausgebreitet und vorgetrocknet.



Bild A5.2 Montage der Schalung für die Erstellung der Stampflehmwand.



Bild A5.3 Einbringen des Stampflehms in die vorbereitete Schalung und Darstellung der Wanddicke von 220 mm.



Bild A5.4 Lagenweises einbringen des Stampflehms mittels pneumatischem Stampfer.



Bild A5.5 Verschluss der Öffnungen der Schalkonstruktions-Haltestangen.

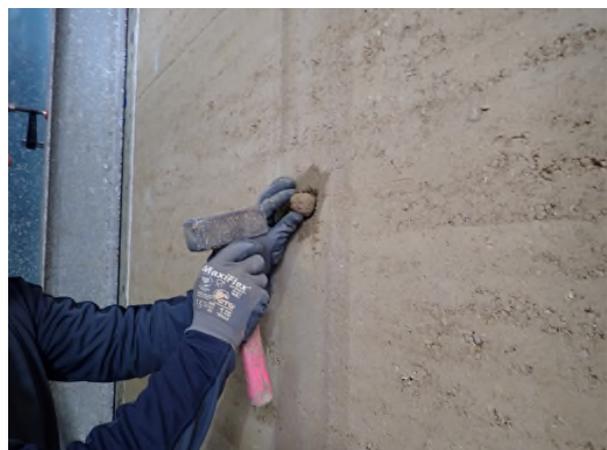


Bild A5.6 Verschluss der Öffnungen der Schalkonstruktions-Haltestangen.



Bild A5.7 Ansicht der feuerabgewandten Seite der Stampflehmwandkonstruktion $d = 220$ mm.

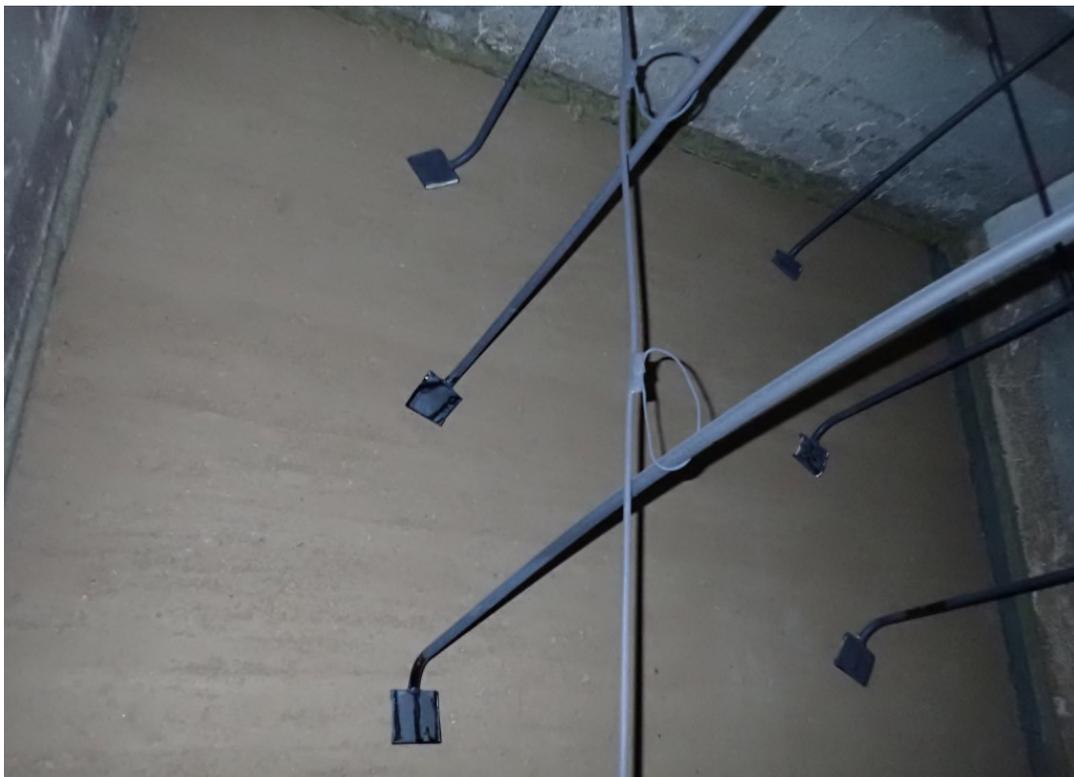


Bild A5.8 Ansicht der feuerzugewandten Seite der Stampflehmwandkonstruktion $d = 220$ mm.

Anlage 6 Fotodokumentation während der Feuerwiderstandsprüfung und der Stoßbeanspruchungen



Bild A6.1 Prüfminute 1: Ansicht der Stampflehmwandkonstruktion $d = 220$ mm.



Bild A6.2 Prüfminute 1: Ansicht der Stampflehmwandkonstruktion $d = 220$ mm feuerseitig.



Bild A6.3 Prüfminute 7: Verfärbungen auf der Probekörperoberfläche zu erkennen.

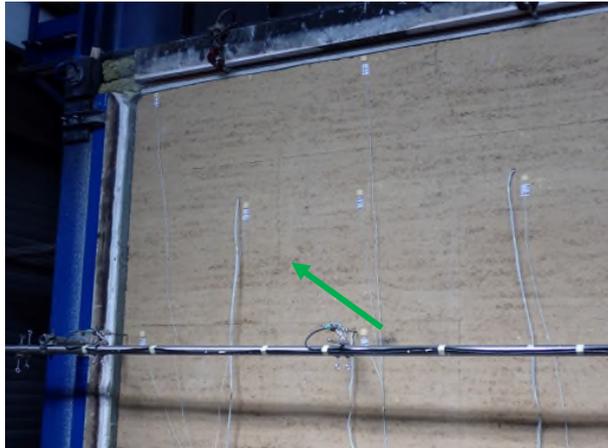


Bild A6.4 Prüfminute 11: Es entsteht ein Vertikalriss auf der linken Probekörperseite.



Bild A6.5 Prüfminute 15: Ein weiterer Vertikalriss entsteht auf der rechten Probekörperseite.



Bild A6.6 Prüfminute 17: Ansicht der Stampflehmwandkonstruktion.



Bild A6.7 Prüfminute 19: Auf der rechten Probekörperseite entsteht im unteren Eckbereich ein weiterer Riss.



Bild A6.8 Prüfminute 24: Rissaufweitung der beiden benannten Vertikalrisse erkennbar.



Bild A6.9 Prüfminute 25: Rissaufweitung der beiden benannten Vertikalrisse erkennbar.



Bild A6.10 Prüfminute 29: Auf der linken Probekörperseite entsteht ein weiterer Riss im Stampflehm.



Bild A6.11 Prüfminute 41: Zunehmende Rissaufweitung der beiden vertikalen Hauptrisse, Rissbreite am linken Riss ca. 8,0 mm



Bild A6.12 Prüfminute 46: Auf der rechten Probekörperseite entsteht neben dem bereits existierenden Riss ein weiterer kleinerer Riss.



*Bild A6.13 Prüfminute 52: Lokaler Kondenswasser-
austritt aus einer Rissöffnung auf der linken
Probekörperseite.*



Bild A6.14 Prüfminute 59: Ansicht des Probekörpers.



*Bild A6.15 Prüfminute 69: Lokaler Kondenswasser-
austritt an einer weiteren Rissöffnung.*



*Bild A6.16 Prüfminute 76: An mehreren weiteren lokalen
Stellen tritt Kondenswasser aus den
Rissbereichen aus.*



*Bild A6.17 Prüfminute 77: Verformung des Probe-
körpers Richtung Brandraum zu erkennen.*



Bild A6.18 Prüfminute 90: Ansicht des Probekörpers.



Bild A6.19 Prüfminute 92: Ansicht des Probekörpers unmittelbar nach der ersten Stoßbeanspruchung auf der feuerabgewandten Seite.



Bild A6.20 Prüfminute 92: Ansicht des Probekörpers unmittelbar nach der ersten Stoßbeanspruchung auf der feuerzugewandten Seite.



Bild A6.21 Prüfminute 94: Ansicht des Probekörpers unmittelbar nach der zweiten Stoßbeanspruchung auf der feuerabgewandten Seite.



Bild A6.22 Prüfminute 94: Ansicht des Probekörpers unmittelbar nach der zweiten Stoßbeanspruchung auf der feuerzugewandten Seite.

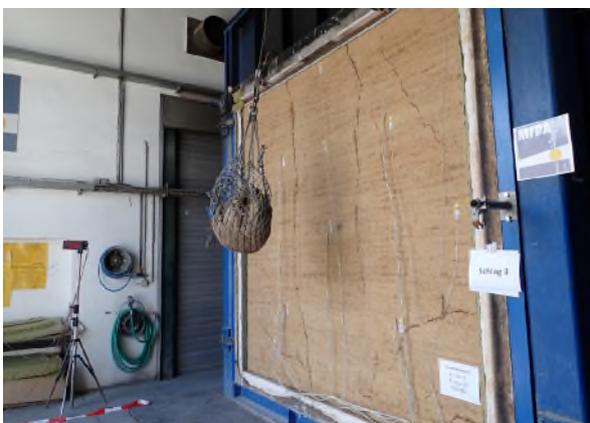


Bild A6.23 Prüfminute 96: Ansicht des Probekörpers unmittelbar nach der dritten Stoßbeanspruchung auf der feuerabgewandten Seite.



Bild A6.24 Prüfminute 96: Ansicht des Probekörpers unmittelbar nach der dritten Stoßbeanspruchung auf der feuerzugewandten Seite.



Bild A6.25 Ansicht der Stampflehmwandkonstruktion nach Beendigung der Feuerwiderstandsprüfung

Anlage A6:

Abschlussbericht

DBU-Projekt AZ 35442/02

Gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU)

Arbeitspaket 6: Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für die Umsetzbarkeit ökologischer Konstruktionen bei Großprojekten für das Material Lehm

Prüfbericht Nr. PB 3.2/21-263-2: Feuerwiderstandsprüfung einer 600 mm dicken, tragenden, raumabschließenden und wärmedämmenden Stampflehmwandkonstruktion auf Brandverhalten bei einseitiger Brandbeanspruchung gemäß DIN EN 1363-1: 2020-05 in Verbindung DIN EN 1365-1: 2013-08 sowie Stoßbeanspruchung nach DIN EN 1363-2: 1999-10

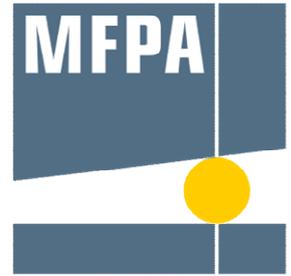
Freilichtmuseum Detmold – Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude

MFPA Leipzig GmbH, Leipzig

Im Auftrag von: LWL – Bau- und Liegenschaftsbetrieb, Münster

Autoren: M. Juknat und E. Dorn

29.08.2022



MFWA Leipzig GmbH

Gesellschaft für Materialforschung
und Prüfungsanstalt für
das Bauwesen Leipzig mbH

Prüf-, Überwachungs- und Zerti-
fizierungsstelle für Baustoffe, Bau-
produkte und Bausysteme

Anerkannt nach
Landesbauordnung (SAC02),
notifiziert nach Bauprodukten-
verordnung (NB 0800)

Geschäftsbereich III:

Baulicher Brandschutz

Geschäftsbereichsleiter:

Dipl.-Ing. Michael Juknat

Tel.: +49 (0) 341-6582-134

Fax: +49 (0) 341-6582-197

brandschutz@mfw-leipzig.de

Arbeitsgruppe 3.2

Brandverhalten von Bauarten und
Sonderkonstruktionen

Ansprechpartner*in:

Dipl.-Ing. (FH) Eik Dorn

Tel.: +49 (0) 341-6582-144

dorn@mfw-leipzig.de



Durch die DAkKS GmbH nach DIN EN
ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflabora-
torium. Die Urkunde kann unter
www.mfw-leipzig.de eingesehen wer-
den.

Prüfbericht Nr. PB 3.2/21-263-2

vom 29. August 2022

1. Ausfertigung

Gegenstand:	Feuerwiderstandsprüfung einer 600 mm dicken, tragenden, raumabschließenden und wärmedämmenden Stampflehmwandkonstruktion auf Brandverhalten bei einseitiger Brandbeanspruchung gemäß DIN EN 1363-1: 2020-05 in Verbindung DIN EN 1365-1: 2013-08 sowie Stoßbeanspruchung nach DIN EN 1363-2: 1999-10
Auftraggeber:	Landschaftsverband Westfalen-Lippe (LWL) LWL-Bau und Liegenschaftsbetrieb Warendorfer Straße 24 D-48133 Münster
Auftragsdatum:	20. Dezember 2021
Probeneingang:	13. Januar 2022
Probennahme:	Angaben über eine amtliche Entnahme liegen der Prüfstelle nicht vor.
Probenkennzeichnung:	keine
Prüfdatum:	26. August 2022
Bearbeiter:	Dipl.-Ing. M. Juknat Dipl.-Ing. (FH) E. Dorn

Dieser Prüfbericht umfasst 9 Seiten und 6 Anlagen.

Dieses Dokument darf nur ungekürzt vervielfältigt und veröffentlicht werden. Als rechtsverbindliche Form gilt die deutsche Schriftform mit Originalunterschriften und Originalstempel des/der Zeichnungsberechtigten. Es gelten die Allgemeinen Geschäftsbedingungen (AGB) der MFWA Leipzig GmbH.

1 Allgemeines

Am 20. Dezember 2021 beauftragte der Landschaftsverband Westfalen-Lippe (LWL) die MFPA Leipzig GmbH mit der Feuerwiderstandsprüfung einer 600 mm dicken, tragenden, raumabschließenden und wärmedämmenden Stampflehmwandkonstruktion zur Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer bei einseitiger Brandbeanspruchung.

Der Brandversuch wurde im Rahmen eines Bauvorhabens zur Erlangung einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE) durchgeführt. Planung und Aufbau wurden in Abstimmung mit dem Bauherrn unter der Leitung des Ingenieurbüros Jäger Ingenieure GmbH festgelegt. Insgesamt gehören zum Prüfkonzept zwei großmaßstäbliche Brandversuche. In diesem Prüfbericht wird der zweite von zwei Brandversuchen an einer Stampflehmwand mit einer Querschnittsdicke von 600 mm und einer Wandgröße von $b \times h = 3000 \text{ mm} \times 3000 \text{ mm}$ beschrieben. Dieser Prüfbericht beschreibt den konstruktiven Aufbau inklusive Montageverfahren, die Prüfbedingungen, sowie die Ergebnisse für das hier beschriebene spezifische Bauteil, nachdem dieses in Übereinstimmung mit DIN EN 1363-1: 2020-05 in Verbindung mit DIN EN 1365-1: 2013-08 geprüft wurde. Die Prüfung erfolgte auf dem Gelände der MFPA Leipzig GmbH – Brandprüfstelle, MFPA-Allee 1, D-04509 Laue bei Delitzsch.

2 Beschreibung der geprüften Konstruktion

2.1 Konstruktiver Aufbau der Wandkonstruktion

Die Stampflehmwandkonstruktion wurde am 13. Januar 2022 in der Brandprüfstelle der MFPA Leipzig GmbH hergestellt und nach einer Trocknungszeit von 225 Tagen geprüft. Die Holzbrettschalung wurde gleich am 13. Januar 2022 entfernt und eine Aussteifung über zwei vertikal angeordnete Holzbohlen, welche beidseitig angeordnet waren, angebracht. Diese Aussteifung wurde am 07. Februar 2022 entfernt. In der Tabelle 1 wird der Aufbau der tragenden Stampflehmwand näher erläutert.

Tabelle 1 Auflistung der konstruktiven Details der geprüften Wandkonstruktion

Gesamtabmessungen der geprüften Konstruktion:		
Breite: $b = 3000 \text{ mm}$, Höhe: $h = 3000 \text{ mm}$, Dicke: $d = 600 \text{ mm}$		
Position	Material/ Abmessungen	Anmerkungen
Wandkonstruktion:  <i>Abbildung: Zwischenunterstützung</i>	<u>Stampflehmwand:</u> Lagenweises (Schichten von 100 mm bis 150 mm) einbringen und verdichten von „Conluto Stampflehm grob“ in eine vorbereitete Holzbrettschalung mit einer Öffnungsbreite von 600 mm Wärmeleitfähigkeit 1,40 W/mK Korngruppe, Überkorngröße 0/22, < 30 mm Druckfestigkeit $\geq 3 \text{ N/mm}^2$ Die Verdichtung erfolgte mit einem pneumatischen Stampfer Metallstampffuß 80 mm x 80 mm Verdichtungsenergie 29 Joule <u>Verschluss Schalungslöcher</u> Die Schalungslöcher wurden mit Conluto Stampflehm groß und fein verschlossen. Der Verschluss der Schalungslöcher erfolgte am 16. März 2022	<u>Anmerkung:</u> Der Stampflehm wurde in Big Bags zur Prüfstelle geliefert und vor dem Einbau auf dem Hallenboden ausgebreitet und mittels Lüfter vorgetrocknet Die Stampflehmwand wurde am 13. Januar 2022 hergestellt und bis zum 07. Februar 2022 in einer Aussteifungskonstruktion mittels zwei vertikalen Holzbohlen, welche beidseitig angeordnet waren, belassen <u>Anmerkung Schalungslöcher:</u> Durch die Stampflehmwand waren 16 Stück Gewindestangen zur Halterung der Holzbrettschalung geführt. Diese Gewindestangen wurden nach dem Ausschalen entfernt

2.2 Probekörper- und Baustoffkennwerte

Die Materialien wurden nicht amtlich entnommen. Zum Zeitpunkt der Prüfung entsprach der Feuchtegehalt des Probekörpers annähernd dem Zustand, welcher vom Ingenieurbüro Jäger Ingenieure GmbH mit 1,50 bis 1,90 M.-% vorgegeben wurde. Für die geprüfte Konstruktion und die verwendeten Baustoffe gelten die in der Tabelle 2 zusammengestellten Angaben hinsichtlich der Baustoffklassifizierung, der Rohdichten sowie der Feuchtegehalte.

Tabelle 2 Baustoffkennwerte der Stampflehmwandkonstruktion

Baustoffbezeichnung	Dicke [mm]	Rohdichte Einbauzustand [kg/m ³]	Feuchtegehalt [M.-%]	Baustoffklassifizierung
Stampflehm grob Conluto ³⁾ Firma Conluto (Vielfalt aus Lehm) Wärmeleitfähigkeit 1,40 W/mK Korngruppe, Überkorngröße 0/22, < 30 mm Nennrohddichte (trocken) 2200 kg/m ³ Druckfestigkeit ≥ 3 N/mm ² Trocknungsschwindmaß < 0,5%	600	2281,5	nach 28 Tagen 5,90	A1 ¹⁾
2070,1		nach 60 Tagen 4,68		
1913,1		nach 174 Tagen 1,62		
2010,5		nach ²⁾ 204 Tagen 1,79		

¹⁾ Gemäß Produktdatenblatt der Firma Conluto

²⁾ Die Feuerwiderstandsprüfung erfolgte nach 225 Tagen Trocknungszeit

³⁾ Abschrift Produktdatenblatt der Firma Conluto: Stampflehm ist eine Fertigmischung nach den Lehm-Bau-Regeln (3.9) des „Dachverbandes Lehm“. Er wird hergestellt aus gemischt-körnigem bis steinigem Baulehm mit einer Bindekraft von 80 g/cm³ und mineralischen Zuschlägen aus Grobsand, Kies oder Splitt.

3 Prüfanordnung und -durchführung

Die geprüfte Stampflehmwandkonstruktion wurde vom Auftraggeber in der Prüfstelle der MFPA Leipzig GmbH im Normtragrahmen aus Stahlbeton hergestellt. Sie wird als 2-seitig (oben und unten) gehaltene Wand mit den Abmessungen $h \times b = 3000 \text{ mm} \times 3000 \text{ mm}$ beschrieben und bildet den vertikalen Raumabschluss.

Für den Ofenverschluss wurde der seitliche Spalt von ca. 25 mm zwischen den vertikalen Rändern der Prüfkonstruktion und des Prüfrahmens mit Mineralwolle (Schmelzpunkt $> 1000^\circ\text{C}$) entsprechend DIN EN 1365-1: 2013-08 verfüllt.

Gemäß Vorgaben des Ingenieurbüros Jäger Ingenieure GmbH wurde die Belastung von 414 kN (138 kN/m) 15 Minuten vor Beginn der Feuerwiderstandsprüfung auf die Wandkonstruktion außermittig aufgebracht. Die Darstellung der Lasteinleitung kann der Anlage 1 entnommen werden. Die Belastung wurde über zwei hydraulische Zylinder, welche die Last über eine lastverteilende und ausreichend biegesteife Traverse gemäß DIN EN 1365-1: 2013-08, Abschnitt 4.3 in die Konstruktion einleiteten und während der Feuerwiderstandsprüfung konstant hielten. Weiterhin erfolgte am oberen und unteren Rand die Einspannung der Wandkonstruktion durch die Lastaufbringung gemäß DIN EN 1365-1:2013-08, Abschnitt 7.3.

Die Aufheizung des Brandraums erfolgte nach der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) gemäß DIN EN 1363-1: 2020-05. Zur Messung der Temperaturen im Brandraum wurden acht Platten-Thermometer gemäß DIN EN 1363-1: 2020-05, Abschnitt 4.5.1.1 im Abstand von 100 mm von der Oberfläche der Wandkonstruktion installiert. Sie dienen der Steuerung der Brandraumtemperatur.

Zum Nachweis der Temperaturen auf der unbeflammten Seite des Probekörpers wurden 11 NiCr-Ni-Thermoelemente gemäß DIN EN 1363-1: 2020-05, Abschnitt 4.5.1.2 in Verbindung mit DIN EN 1365-1: 2013-08 verwendet.

Zusätzlich wurden fünf Messleitern mit jeweils elf NiCr-Ni-Thermoelemente (Messspitze Perle) innerhalb der Konstruktion angebracht, um den Temperaturverlauf innerhalb des Bauteiles über die Querschnittstiefe aufzuzeichnen. Die Messstellenanordnung der benannten Thermoelemente kann der Anlage 2 entnommen werden.

Die Umgebungstemperatur wurde seitlich in etwa 1 m Entfernung vom Probekörper in dessen Ebene ermittelt.

Die Druckmessung im Brandraum erfolgte gemäß DIN EN 1363-1: 2020-05, Abschnitt 4.5.2 und 5.2 mit einem Differenzdruck-Messumformer $PU \pm 100$ Pa in einer Höhe von 2,90 m gemessen vom Fußboden des Prüfofens.

Zur Messung und Aufzeichnung der Verformungen wurden an drei verschiedenen Stellen in halber Wandhöhe sowie an zwei Stellen an der unteren Traverse des Probekörpers potentiometrische Wegsensoren installiert. Die Lage der Wegsensoren kann der Anlage 2 entnommen werden.

Alle Brandraum- und Oberflächentemperaturen, die Verformungen der Wandkonstruktion sowie der Druck im Brandraum wurden im Zeitintervall von zehn Sekunden gemessen und registriert.

Die während der Feuerwiderstandsprüfung ermittelten Oberflächentemperaturen auf der feuerabgewandten Seite, die Brandraumtemperatur, die Temperaturen in der Wandkonstruktion, die Verformung der Wandkonstruktion und der Druck im Brandraum können der Anlage 3 sowie Anlage 4 entnommen werden.

4 Prüfergebnisse und -beobachtungen

Die während der Feuerwiderstandsprüfung ermittelten Messergebnisse können der Anlage 3 und 4 entnommen werden. Die Beobachtungen während der Feuerwiderstandsprüfung sind aus Tabelle 3 ersichtlich.

Tabelle 3 Beobachtungen während der Feuerwiderstandsprüfung vom 26. August 2022

Prüfzeit [min:s]	Beobachtungen während der Prüfung	Beobachtungsseite ¹⁾
-15:00	Vorgegebene Belastung von 138,0 kN/m vollständig aufgebracht.	---
0:00	Start der Prüfung.	---
2:00	Leichter Rauchaustritt am linken Wandanschluss im oberen Bereich (Übergang Mineralwolle).	FA
5:00	Anhaltender leichter Rauchaustritt am linken Wandanschluss (Übergang Mineralwolle).	FA
6:00	Leichte Verfärbungen über der Stampflehmoberfläche.	F
8:00	Zunehmende Verfärbungen über der Stampflehmoberfläche.	F
20:00	Vertikalriss ca. in Probekörpermitte in der oberen Probekörperhälfte.	FA
26:00	Im unteren Bereich bricht ein Teil der Stampflehmoberfläche zusammen, danach rutscht die gesamte obere Stampflehmwandscheibenoberfläche nach und stellt sich vor den Probekörper	F
28:00	Entstehender Vertikalriss in der vorstehenden Stampflehmplattenscholle zu erkennen.	F
32:00	Zunehmender Vertikalriss in der vorstehenden Stampflehmplattenscholle zu erkennen.	F
33:00	Leichter Horizontalriss in der vorstehenden Stampflehmplattenscholle zu erkennen.	F
46:00	Die Stampflehmplattenscholle ist in sich zusammengefallen.	F
48:00	Weitere Stampflehmbestandteile fallen vom Probekörper ab.	F
52:00	Leichter Rauchaustritt am oberen Abschluss zwischen Stampflehm und Mörtelbett.	FA
60:00	Stampflehmbestandteile stehen vom Probekörper ab.	F
62:00	Weitere Stampflehmbestandteile fallen vom Probekörper ab.	F
67:00	Leichter Rauchaustritt an einer lokalen Stelle im benannten Vertikalriss.	FA
70:00	Weitere Stampflehmbestandteile fallen vom Probekörper ab.	F
80:00	Weitere Stampflehmbestandteile fallen vom Probekörper ab.	F
90:00	Weitere Stampflehmbestandteile fallen vom Probekörper ab.	F
90:00	Keine signifikante weitere Veränderung an der Wandkonstruktion.	F/FA
90:00	Wegsensoren für die Durchbiegungsmessung wurden entfernt.	FA
92:00	Ausführung des 1. Pendelschlags:	---
	Ergebnis: Keine sichtbare Veränderung/Beschädigung des Probekörpers aufgrund der Stoßbeanspruchung.	FA
	Ergebnis: Keine sichtbare Veränderung/Beschädigung des Probekörpers aufgrund der Stoßbeanspruchung.	F

Fortsetzung der Tabelle 3 siehe nächste Seite

Fortsetzung Tabelle 3 Beobachtungen während der Feuerwiderstandsprüfung vom 26. August 2022

Prüfzeit [min:s]	Beobachtungen während der Prüfung	Beobachtungsseite ¹⁾
93:00	Ausführung des 2. Pendelschlags:	---
	Ergebnis: Keine sichtbare Veränderung/Beschädigung des Probekörpers aufgrund der Stoßbeanspruchung.	FA
	Ergebnis: Keine sichtbare Veränderung/Beschädigung des Probekörpers aufgrund der Stoßbeanspruchung.	F
94:00	Reduzierung der Last auf 5% der Gesamtlast.	---
96:00	Ausführung des 3. Pendelschlags:	---
	Ergebnis: Keine sichtbare Veränderung/Beschädigung des Probekörpers aufgrund der Stoßbeanspruchung.	FA
	Ergebnis: Keine sichtbare Veränderung/Beschädigung des Probekörpers aufgrund der Stoßbeanspruchung.	F
102:00	Beendigung der Feuerwiderstandsprüfung in Abstimmung mit dem Auftraggeber.	---

¹⁾ F = Feuerseite

FA = Feuerabgewandte Seite

5 Zusammenfassung der Prüfergebnisse - Gegenüberstellung mit den Leistungskriterien nach DIN EN 1363-1: 2020-05 in Anlehnung an DIN EN 1365-1: 2013-08

Am 26. August 2022 wurde die in Abschnitt 2 dieses Berichtes beschriebene Stampflehmwandkonstruktion gemäß DIN EN 1363-1: 2020-05 in Verbindung mit DIN EN 1365-1: 2013-08 einer Feuerwiderstandsprüfung unter einseitiger Brandbeanspruchung unterzogen.

Der Vergleich der Prüfergebnisse mit den Leistungskriterien nach DIN EN 1363-1: 2020-05 in Verbindung mit DIN EN 1365-1: 2013-08 für tragende, raumabschließende und wärmedämmende Wände bei einseitiger Brandbeanspruchung ist in Tabelle 4 hinsichtlich der Tragfähigkeit R, des Raumabschlusses E und der Isolation I aufgeführt.

Tabelle 4 Vergleich der Prüfergebnisse mit den Leistungskriterien nach DIN EN 1365-1 in Verbindung mit DIN EN 1363-1 für die tragende Wandkonstruktion in Stampflehmbauweise

Zeile	Norm- bezug Angaben nach DIN EN 1363-1: 2020-05 Abschnitt:	Anforderungen		Prüfergebnisse an der tragenden Stampflehmwandkonstruktion d = 600 mm				Vergleich der Prüfergebnisse mit den Leistungs- kriterien nach DIN EN 1365-1: 2013-08
				Beschreibung				REI 90-M
1	11.1	Tragfähig- keit	Beibehaltung der Tragfähigkeit unter Last:	vorh. max. Belastung	138,0 kN/m			erfüllt
2			Grenzwert der vertikalen Stauchung	C = h/100 C = 30 mm	Maximal 5,42 mm nach 90 Minuten an WS2			
			Stauchungs- geschwindigkeit	dC/dt = 3*H/1000 dC/dt = 9 mm/min	Maximal 0,04 mm/min nach 90 Minuten an WS2			
3	11.2	Raumab- schluss d.h. Vermeidung von:	Entzündung des Wattebausches	Entzündung des Wattebausches erfolgte nach:	Test nicht erforderlich -nicht erfolgt-			erfüllt
4			Auftreten von Spalten	Das Durchdringen einer Spaltlehre erfolgte nach:	Test nicht erforderlich -nicht erfolgt-			erfüllt
5			Flammen auf der abgekehrten Seite	Anhaltende Flammenbildung trat auf nach:	-nicht erfolgt-			erfüllt
6	11.3	Wärmedämmung d.h. Temperaturerhöhung auf der dem Feuer abgekehrten Seite über die Anfangs- temperatur: max. zul. Mittelwert $\Delta T = 140$ K max. zul. Einzelwert $\Delta T = 180$ K	Prüfdauer in min:	30	60	90	102	erfüllt
7			max. festgestellte Temperaturerhöhung: Mittelwert in K:	0	1	1	1	
8			max. festgestellte Temperaturerhöhung: - Einzelwert in K:	0,5	1	3	4	
			- an Messstelle:	OF 11	OF 6	OF 6	OF 6	
9	5.6	Sonstige Angaben	Umgebungstemperatur bei Beginn der Prüfung im Labor:	26°C				Angaben, z.B. über Baustoffe, Rohdichten und Feuchtigkeitsgehalt, siehe Tabelle 2
10			Die Umgebungs- temperatur stieg/ sank während der Prüfung um max.:	+ 2 K				
11			Druck im Brandraum:	gem. DIN EN 1363-1 vgl. Anlage 4				
12			Rauchentwicklung:	gering				
13			horizontale Verformung:	WS4				
			- Größe	16,57 mm				
			- Zeitpunkt	90 min				
14	DIN EN 1363-2: 1999-10 Abschnitt: 7	Mechanische Beanspruchung (Stoßprüfung) nach Erreichen der Klassifizierungszeit	Verhalten R-, E- und I nach Stoßprüfung eingehalten	1. Stoß	2. Stoß	3. Stoß	erfüllt	
				ja	ja	ja		

6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen auf der Grundlage von DIN EN 1363-1: 2020-05 in Verbindung mit DIN EN 1365-1: 2013-08

Aufgrund der erzielten und in Tabelle 4 aufgeführten Prüfergebnisse ergibt sich für die tragende, raumabschließende und wärmedämmende Stampflehmwandkonstruktion bei einseitiger Brandbeanspruchung eine Feuerwiderstandsdauer von 102 Minuten.

Die geprüfte Stampflehmwandkonstruktion hat bei einseitiger Brandbeanspruchung die Anforderungen hinsichtlich der Tragfähigkeit, des Raumabschlusses und der Wärmedämmung gemäß DIN EN 13501-2: 2016-12 für die Feuerwiderstandsklasse **REI 90-M** erfüllt. Voraussetzung für die Gültigkeit der vorgenannten Aussagen ist, dass die in diesem Prüfbericht angegebenen Randbedingungen eingehalten werden.

6.1 Direkter Anwendungsbereich gemäß DIN EN 1365-1: 2013-08

Die Ergebnisse der Feuerwiderstandsprüfung sind direkt auf ähnliche Ausführungen der Wandkonstruktion übertragbar, bei denen eine oder mehrere der nachstehenden Veränderungen vorgenommen werden und bei denen die Ausführung hinsichtlich der Steifigkeit und Festigkeiten weiterhin die Anforderungen der entsprechenden Bemessungsnorm erfüllt:

- Reduzierung der Höhe der Wand;
- Vergrößerung der Wanddicke;
- Reduzierung der aufgetragenen Belastung. Die Belastung erfolgte in der Prüfung außermittig gemäß Abbildung in der Anlage 1.

6.2 Bemerkung gem. DIN EN 1363-1: 2020-05, Abs. 12.1

Dieser Prüfbericht beschreibt ausführlich das Montageverfahren, die Prüfbedingungen und die Ergebnisse, die mit dem hier beschriebenen spezifischen Bauteil erzielt wurden, nachdem dieses nach dem in DIN EN 1363-1: 2020-05 dargestellten Verfahren geprüft wurde. Jede wesentliche Abweichung hinsichtlich Größe, konstruktiver Einzelheiten, Belastungen, Spannungszustände, Randbedingungen außer den Abweichungen, die im betreffenden Prüfverfahren für den direkten Anwendungsbereich zulässig sind, ist nicht durch diesen Prüfbericht abgedeckt.

Aufgrund der Eigenart der Prüfungen der Feuerwiderstandsdauer und der daraus folgenden Schwierigkeiten bei der Quantifizierung der Unsicherheit bei der Messung der Feuerwiderstandsdauer ist es nicht möglich, einen festgelegten Genauigkeitsgrad des Ergebnisses anzugeben.

Die Ergebnisse der Prüfungen beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Gegenstände. Dieses Dokument ersetzt keinen Konformitäts- oder Verwendbarkeitsnachweis im Sinne der Bauordnungen (national/europäisch).

Leipzig, den 29. August 2022


Dipl.-Ing. M. Juhnke
Geschäftsbereichsleiter




Dipl.-Ing. (FH) E. Dorn
Bearbeiter

Anlagenverzeichnis siehe nächste Seite



Anlagenverzeichnis

Anlage 1 Konstruktiver Aufbau der Stampflehmwandkonstruktion

Anlage 2 Messstellenanordnung der Oberflächenthermoelemente und der eingebauten Thermoelemente in der Wandkonstruktion, sowie Lage der Wegsensoren

Anlage 3 Brandraumtemperaturen, -druck und Wandverformung

Anlage 4 Gemessene Oberflächentemperatur sowie Temperaturen in der Wandkonstruktion

Anlage 5 Fotodokumentation zum Wandaufbau und Einbau

Anlage 6 Fotodokumentation während der Feuerwiderstandsprüfung und der Stoßbeanspruchungen

Anlage 1 Konstruktiver Abmessungen der Stampflehmwandkonstruktion

Abbildung A1.1 Grafische Darstellung der konstruktiven Abmessungen

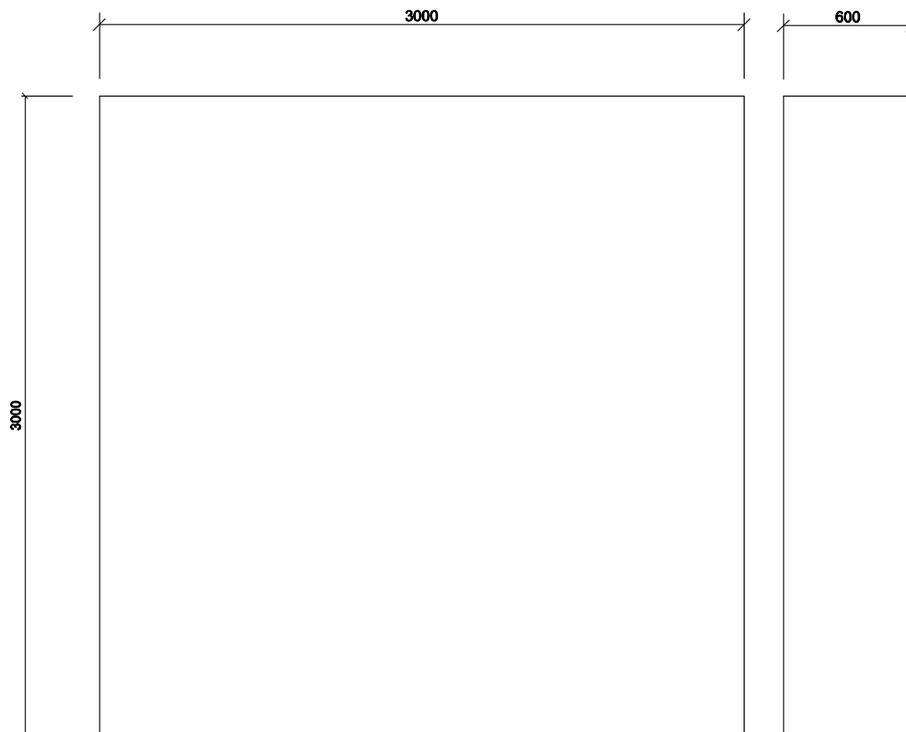


Abbildung A1.2 Abbildung der fertiggestellten Stampflehmwand $d = 600$ mm





Abbildung A1.3 Darstellung der Lasteinleitung in die Stampflehmwandkonstruktion

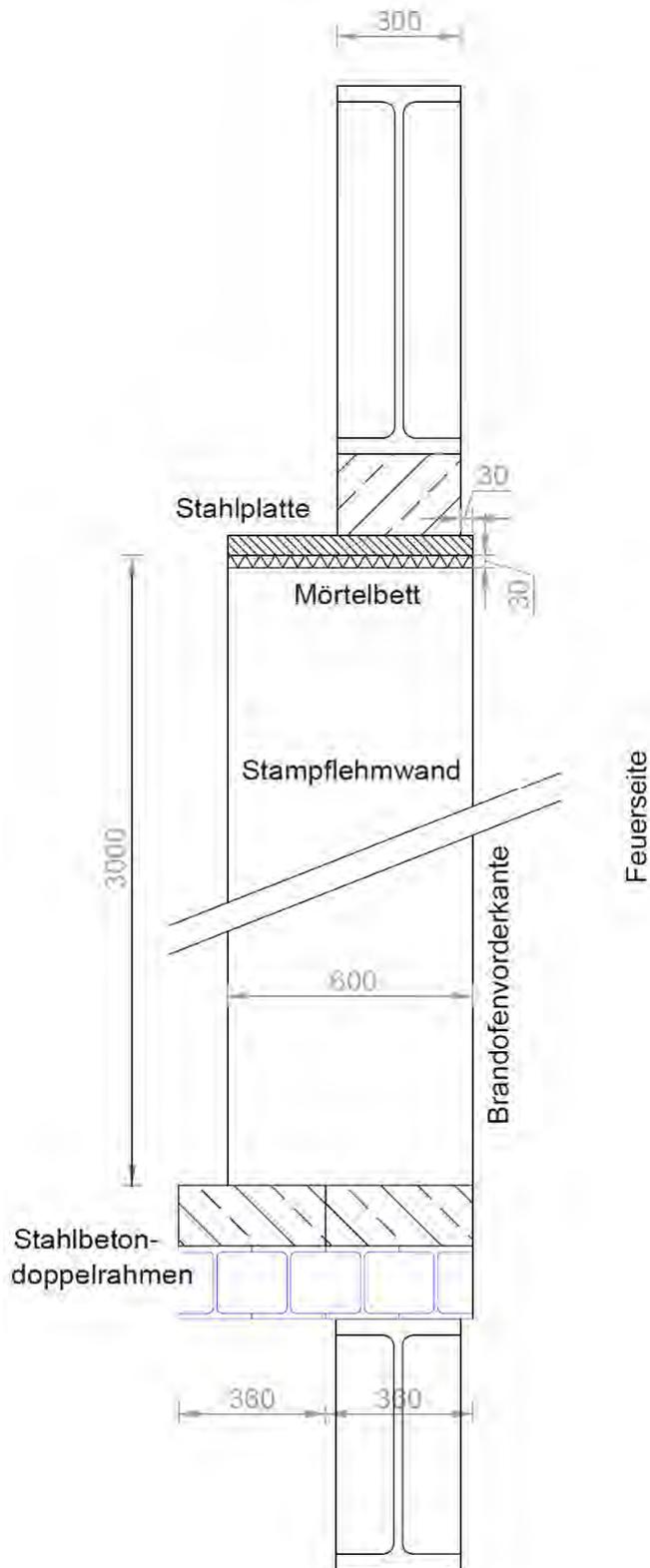
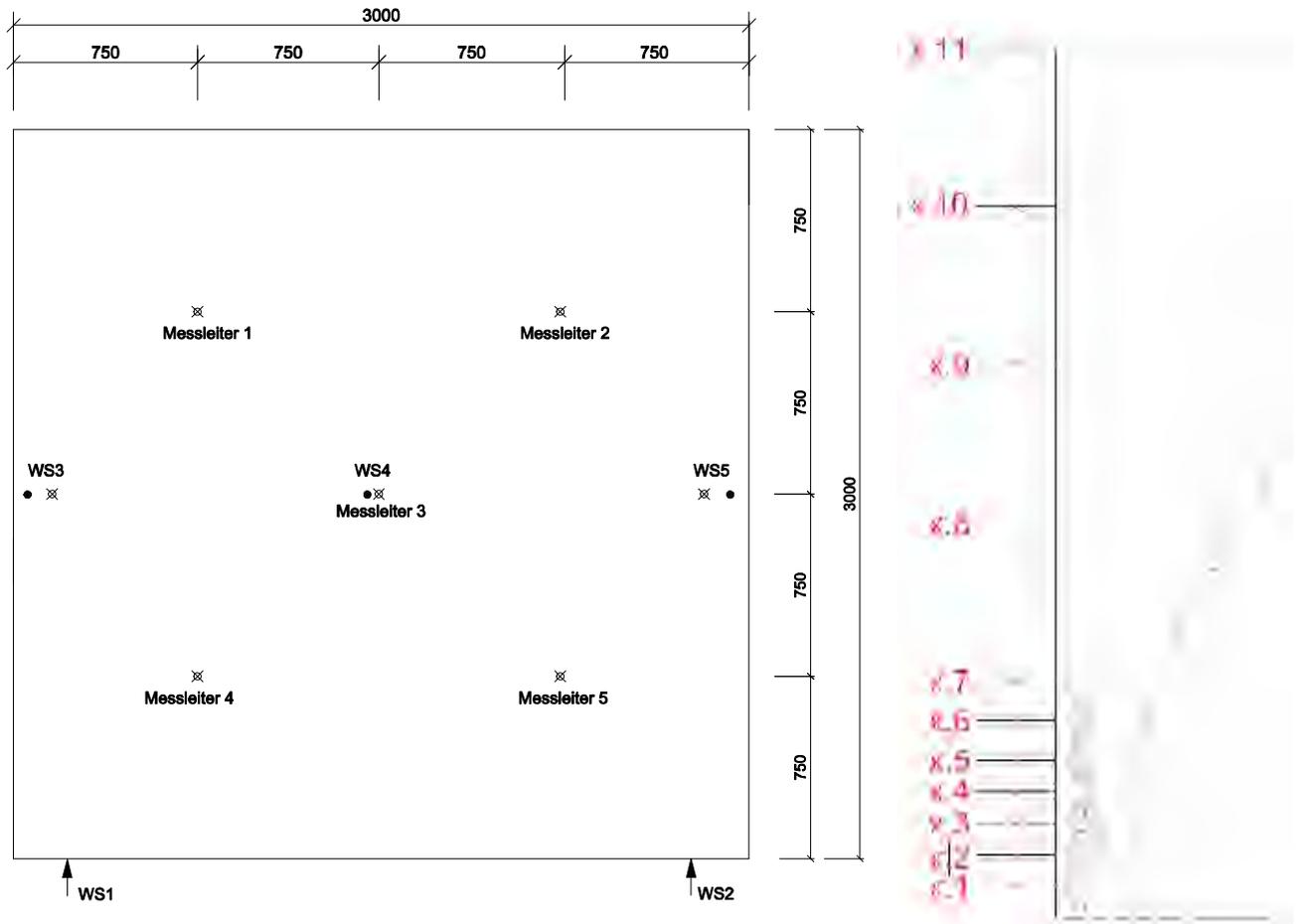


Abbildung A2.2 Messstellenplan der Thermoelemente im Probekörperquerschnitt



Messstellenübersicht	Positionsbeschreibung
Messleiter 1	Messung an elf Messpunkten über die Querschnittstiefe der Stampfehmwandkonstruktion verteilt
Messleiter 2	Messung an elf Messpunkten über die Querschnittstiefe der Stampfehmwandkonstruktion verteilt
Messleiter 3	Messung an elf Messpunkten über die Querschnittstiefe der Stampfehmwandkonstruktion verteilt
Messleiter 4	Messung an elf Messpunkten über die Querschnittstiefe der Stampfehmwandkonstruktion verteilt
Messleiter 5	Messung an elf Messpunkten über die Querschnittstiefe der Stampfehmwandkonstruktion verteilt



Anlage 3 Brandraumtemperaturen, -druck und Wandverformung

Diagramm A3.1 Temperatur im Brandraum nach ETK

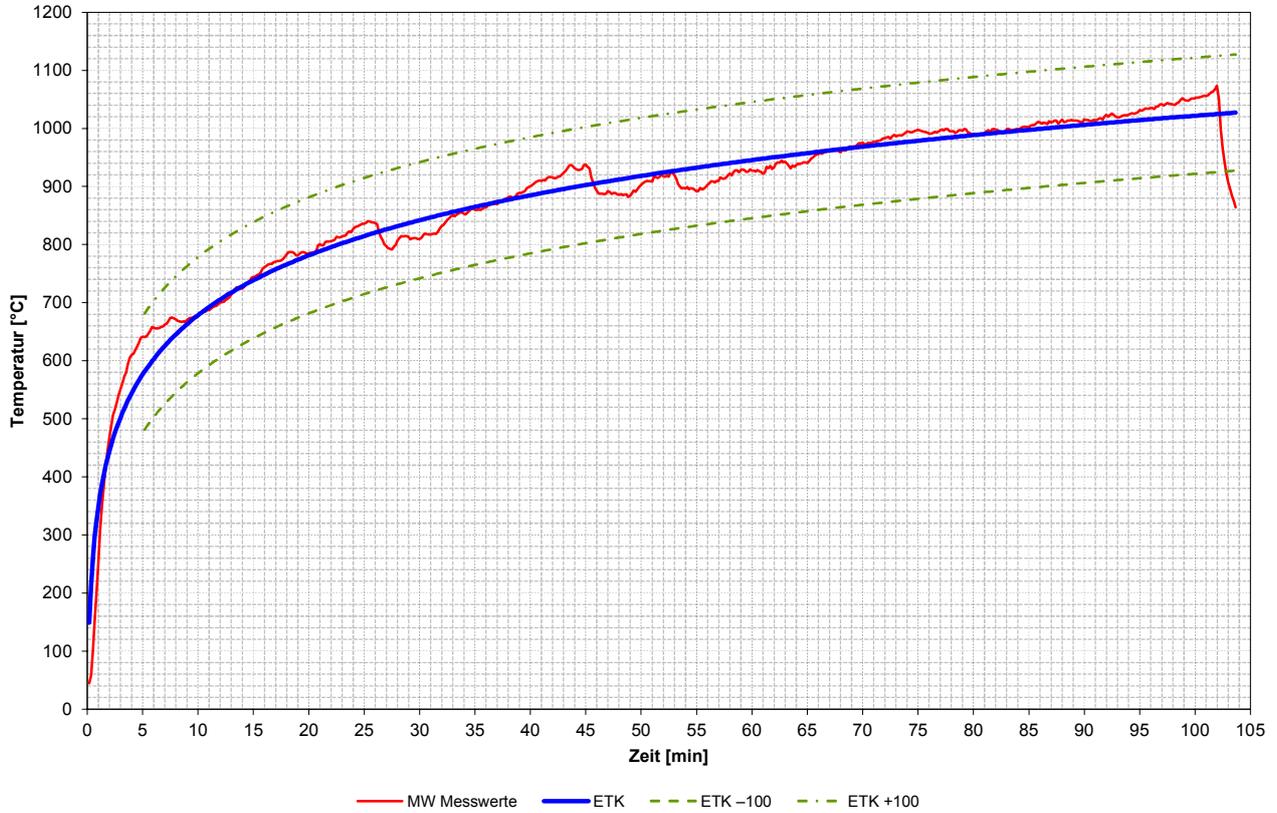


Diagramm A3.2 Relative Abweichung vom Integral der ETK

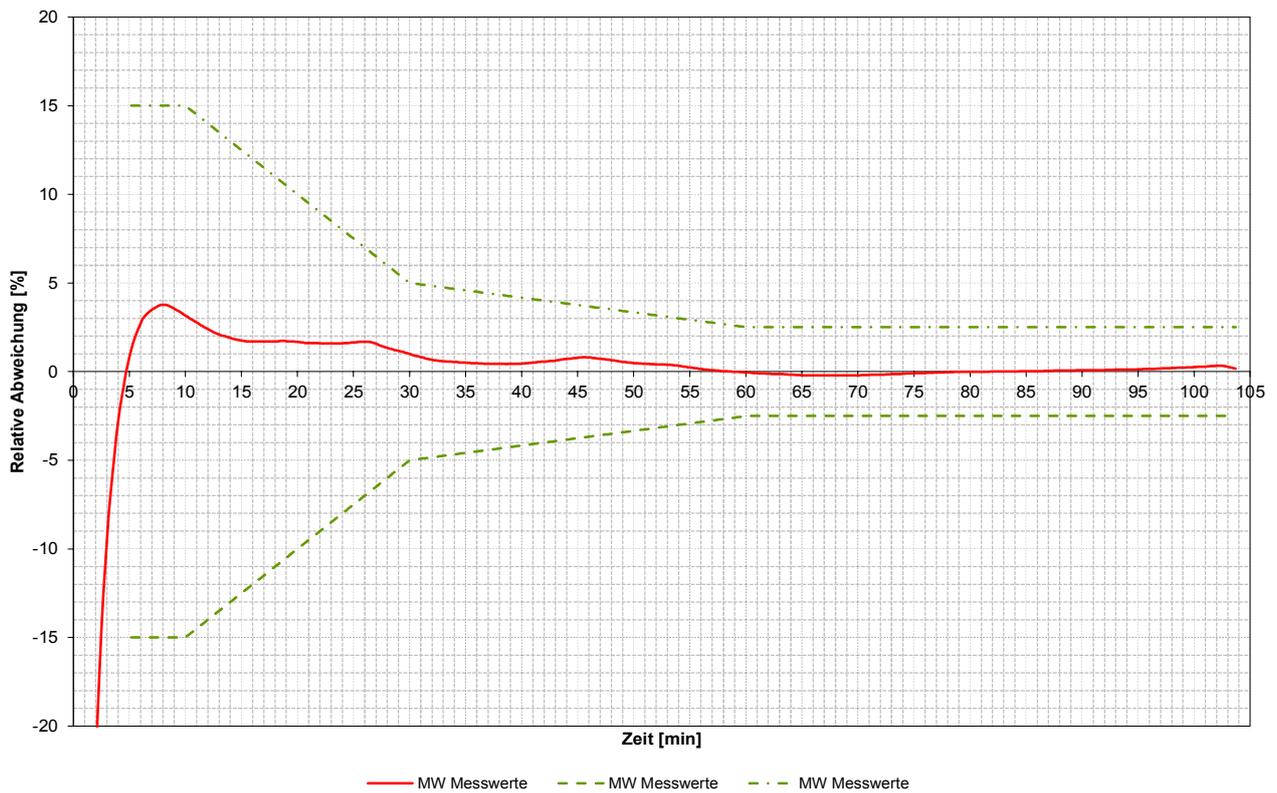


Diagramm A3.3 Gemessene Ofentemperatur aller Ofenthermoelemente OT1 bis OT8

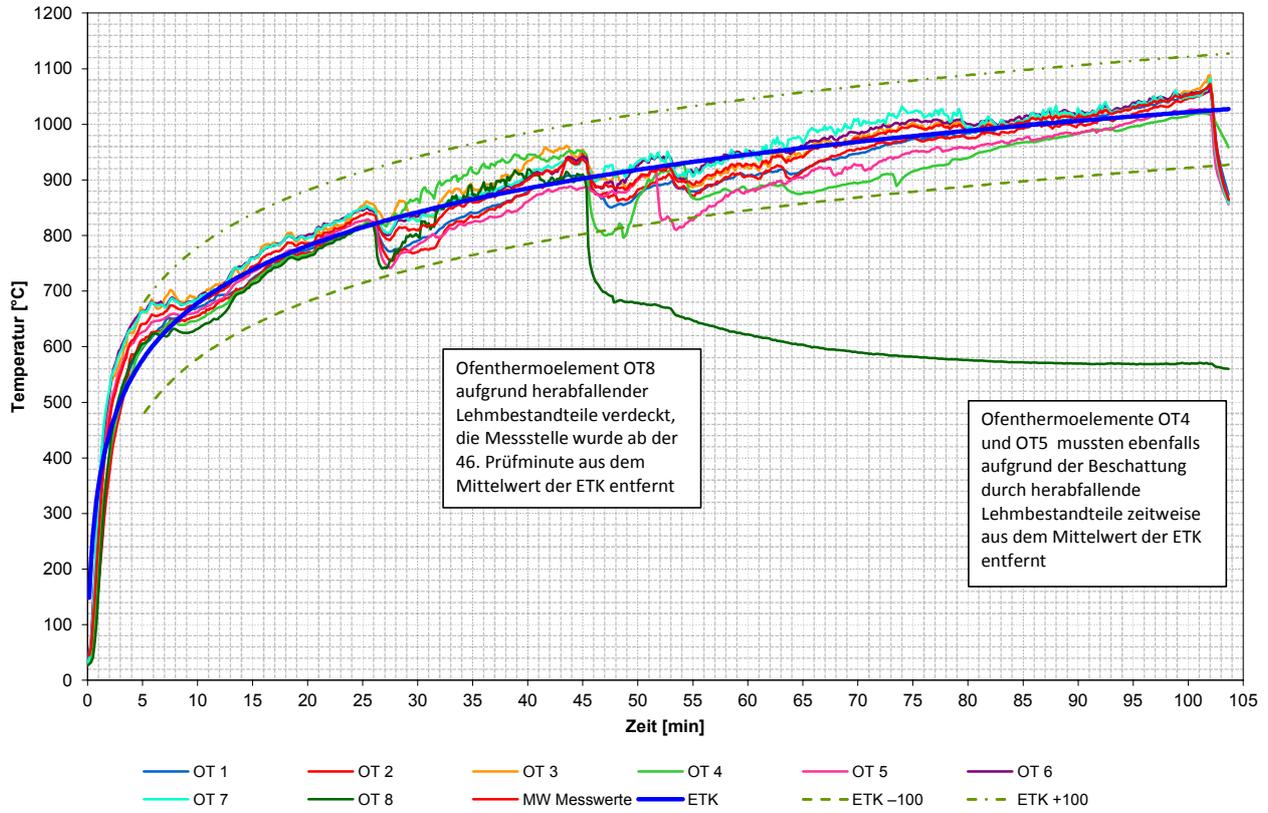


Diagramm A3.4 Druckentwicklung im Brandraum

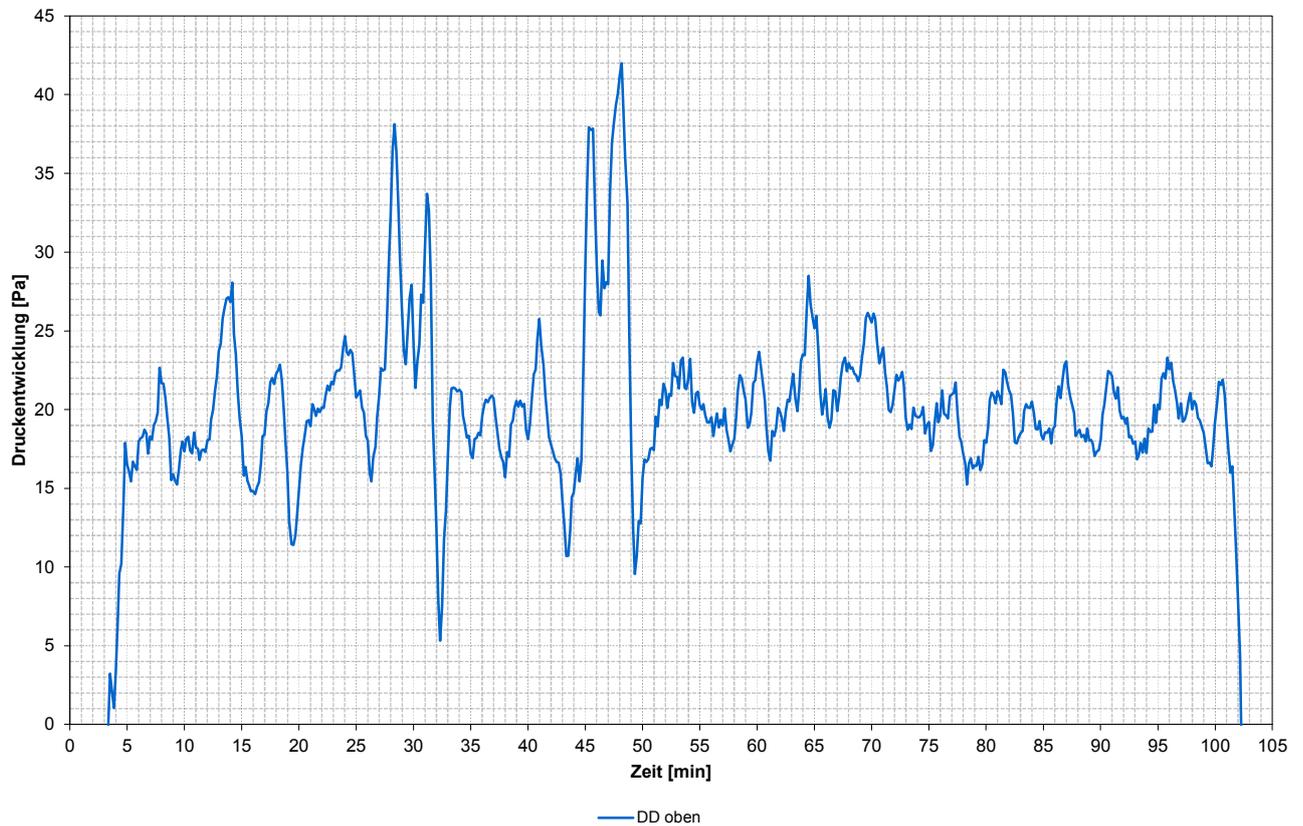




Diagramm A3.5 Raumtemperatur

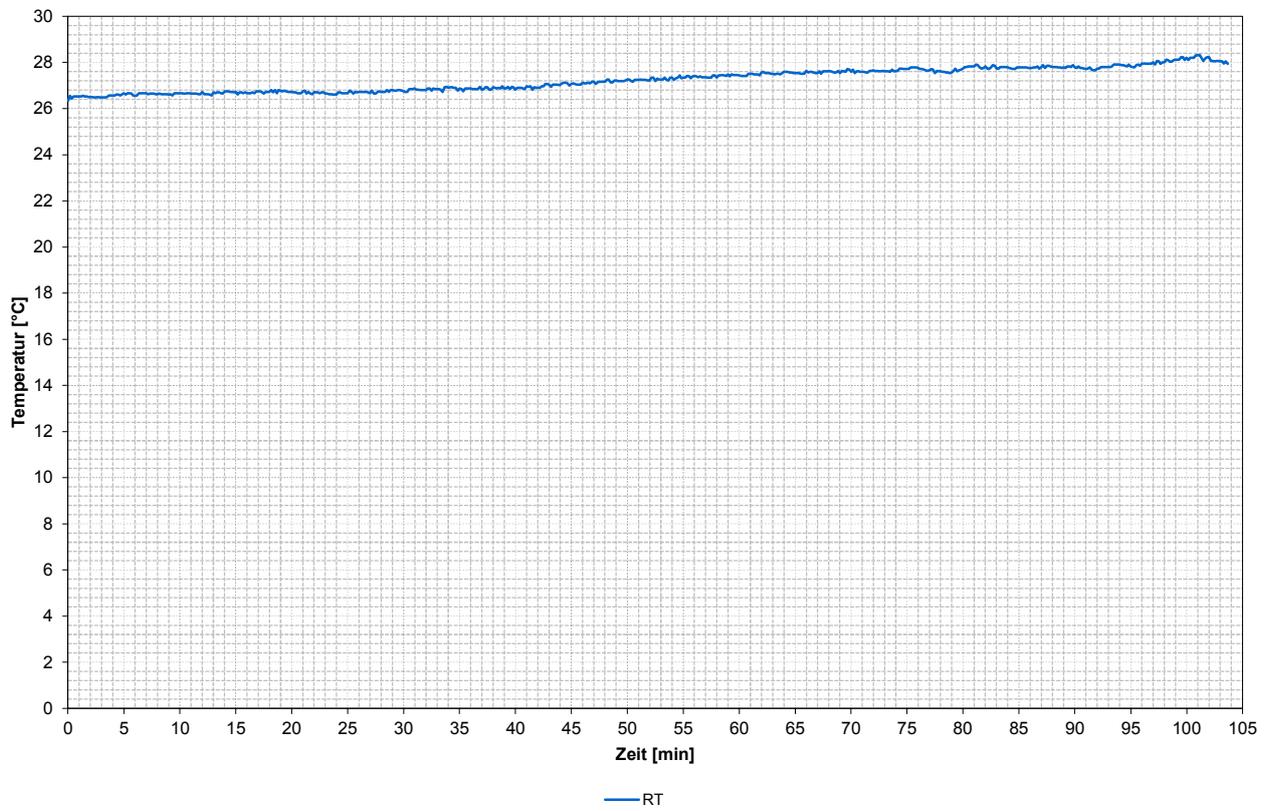


Diagramm A3.6 Horizontale Verformung gemessen in halber Wandhöhe (Durchbiegung)

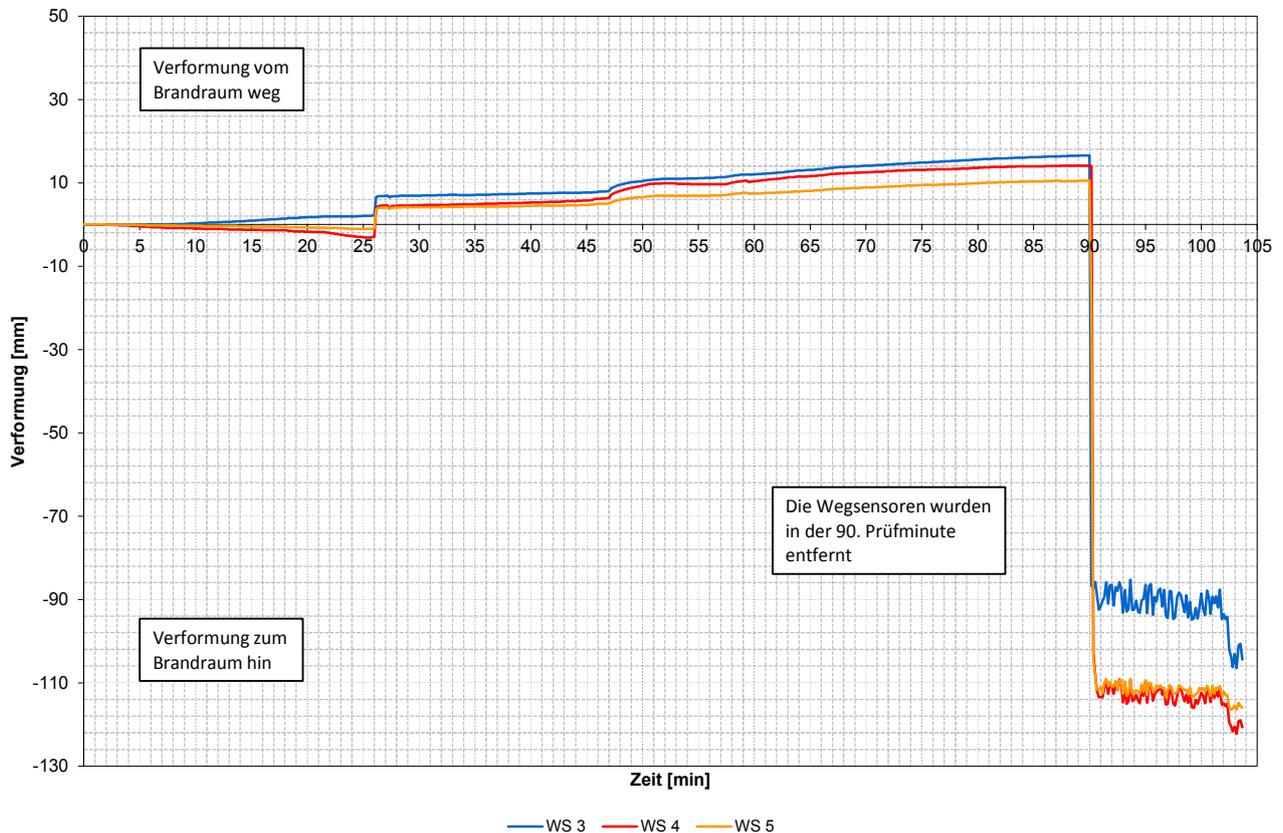


Diagramm A3.7 Stauchung der Wandkonstruktion

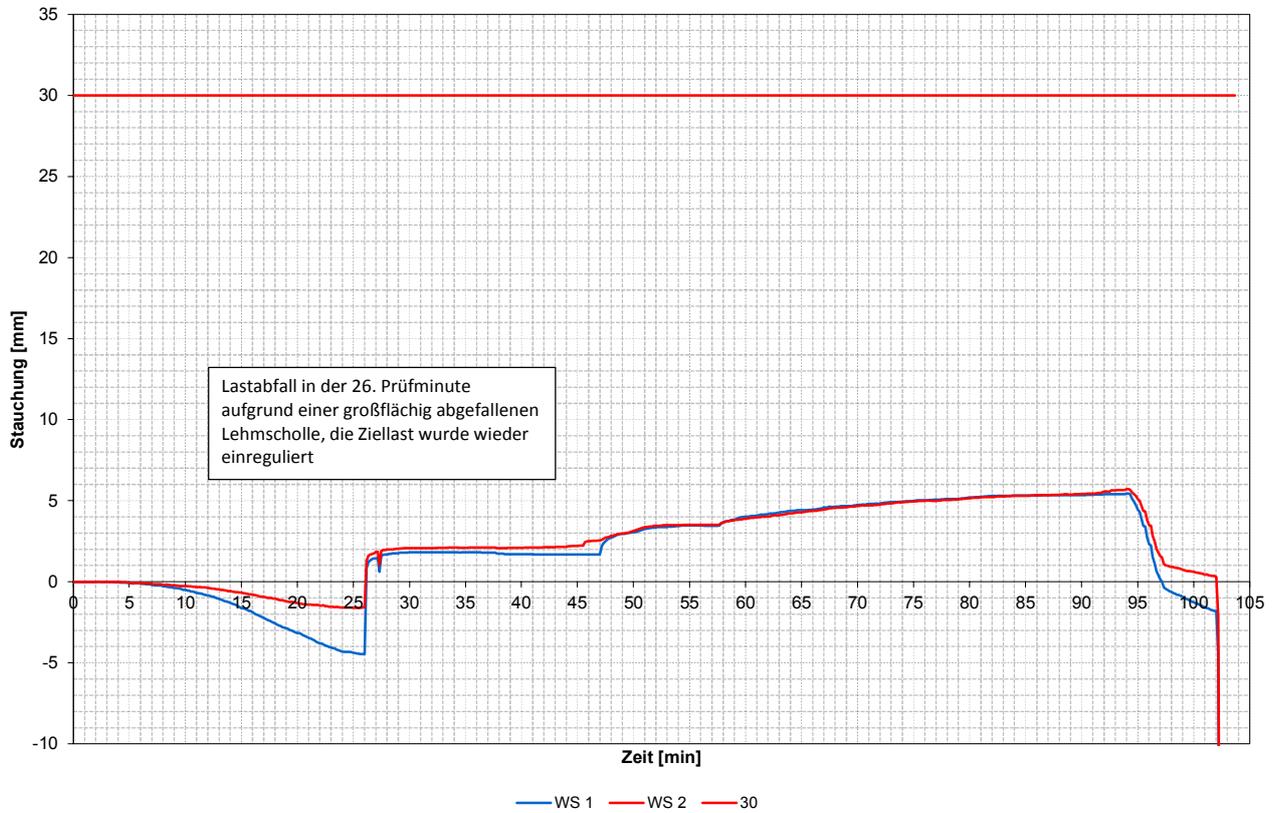


Diagramm A3.8 Stauchungsgeschwindigkeit

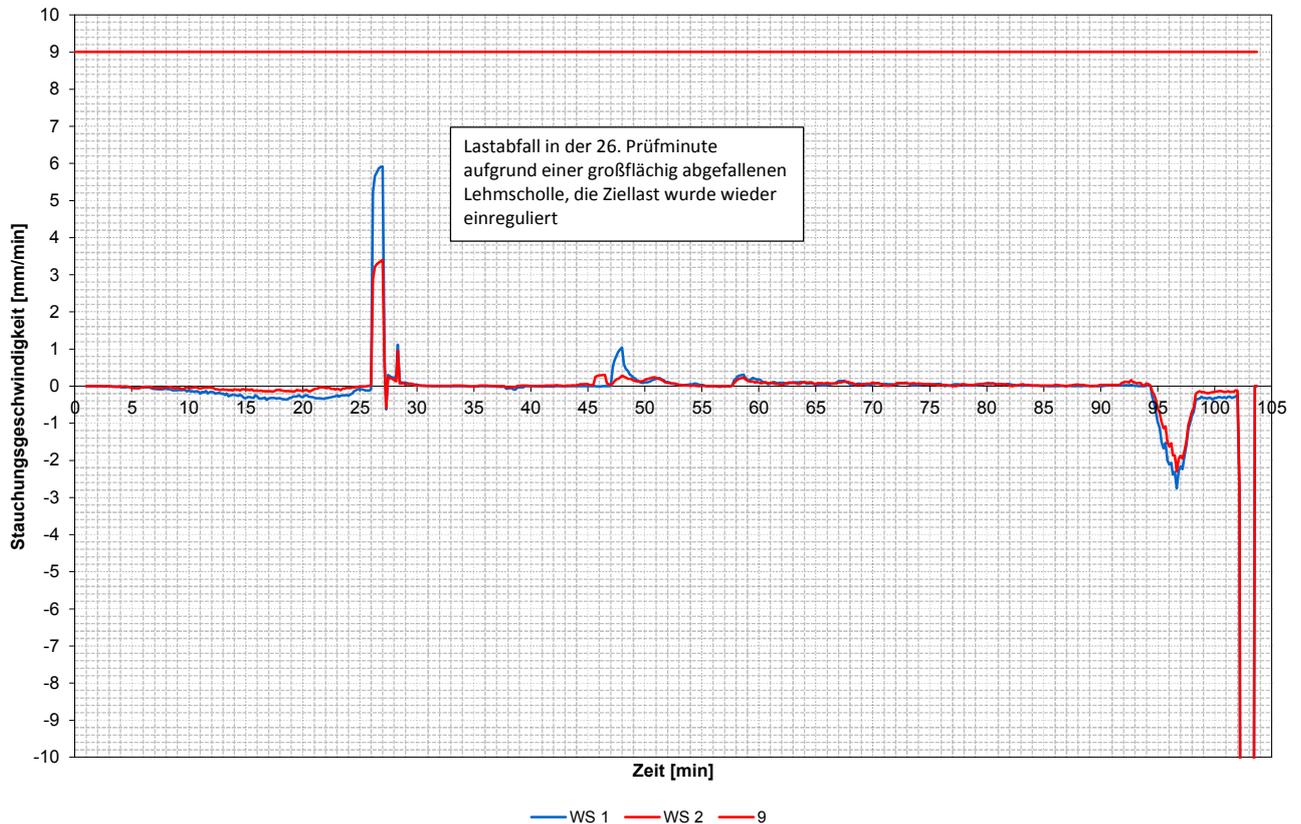
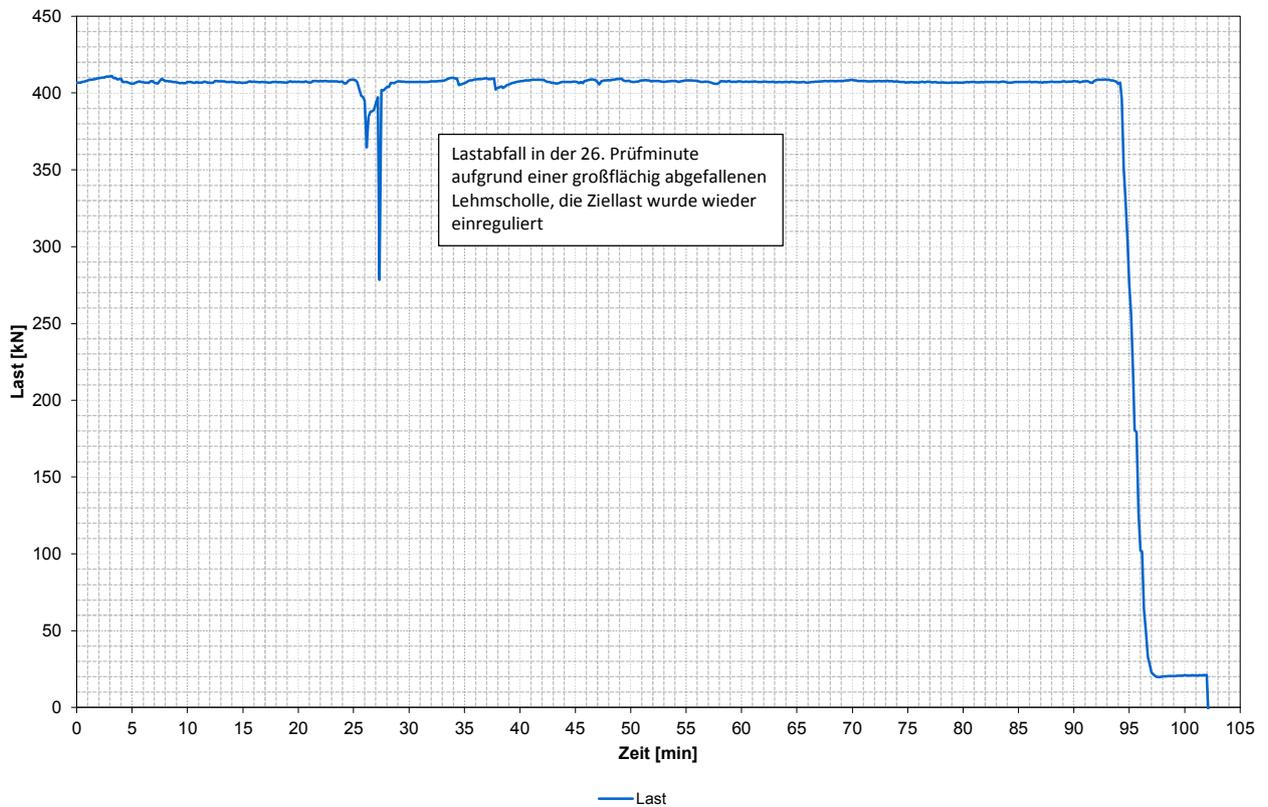


Diagramm A3.9 Belastung der Wandkonstruktion



Anmerkung: Von der endgültigen Belastungsgröße von 414 kN wurden 7 kN aus dem Eigengewicht des Lastausgleichsplatten abgezogen



Anlage 4 Gemessene Oberflächentemperatur sowie Temperaturen in der Wandkonstruktion

Diagramm A4.1 Oberflächenmessstellen Mittelwert OF1 bis OF5

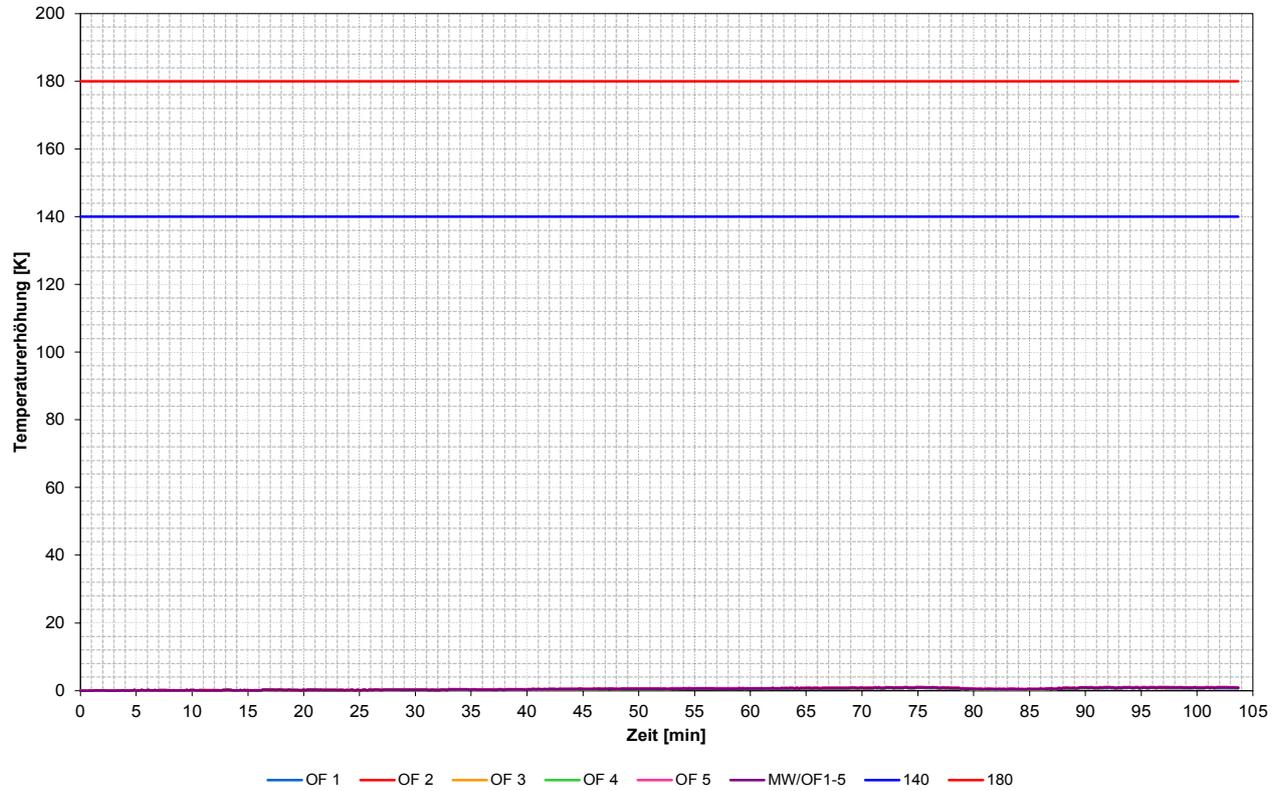


Diagramm A4.2 Oberflächenmessstellen Maximalwert OF6 bis OF11

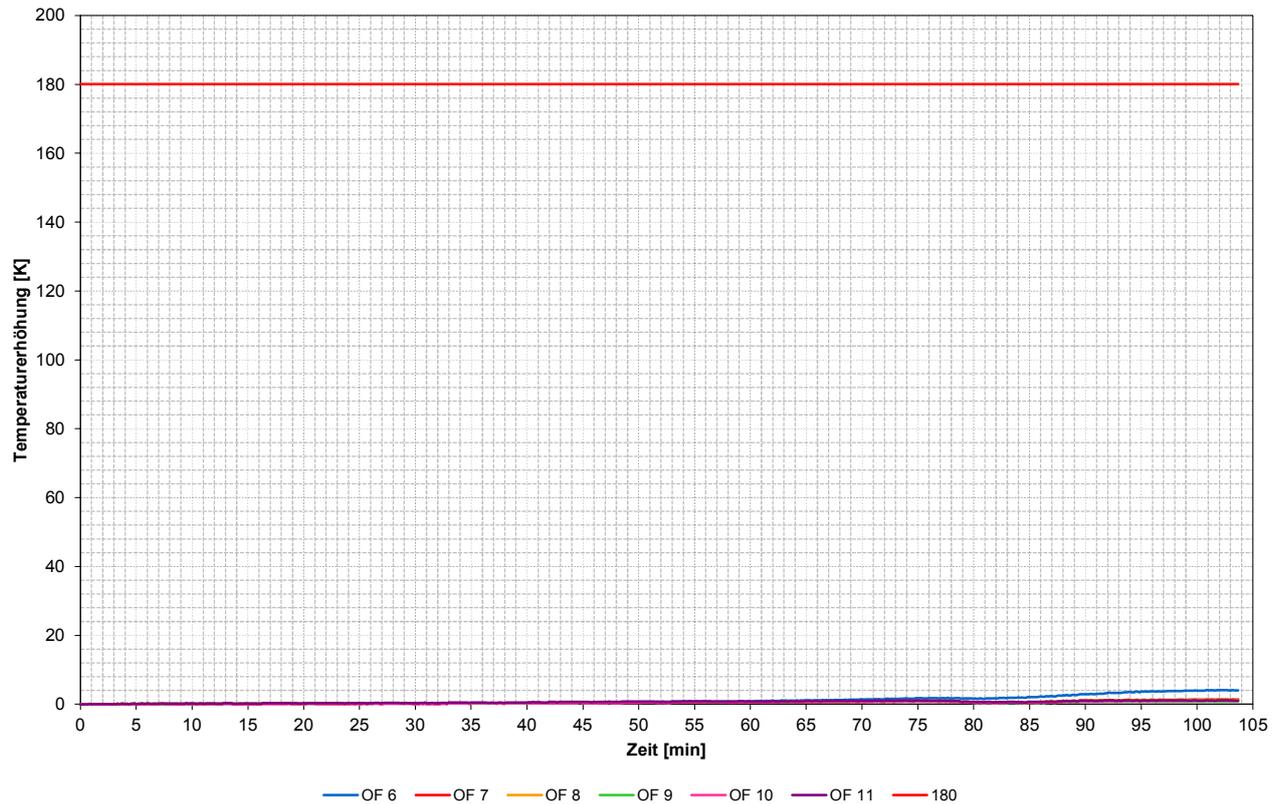


Diagramm A4.3 Messstellen im Probekörper: Messleiter 1

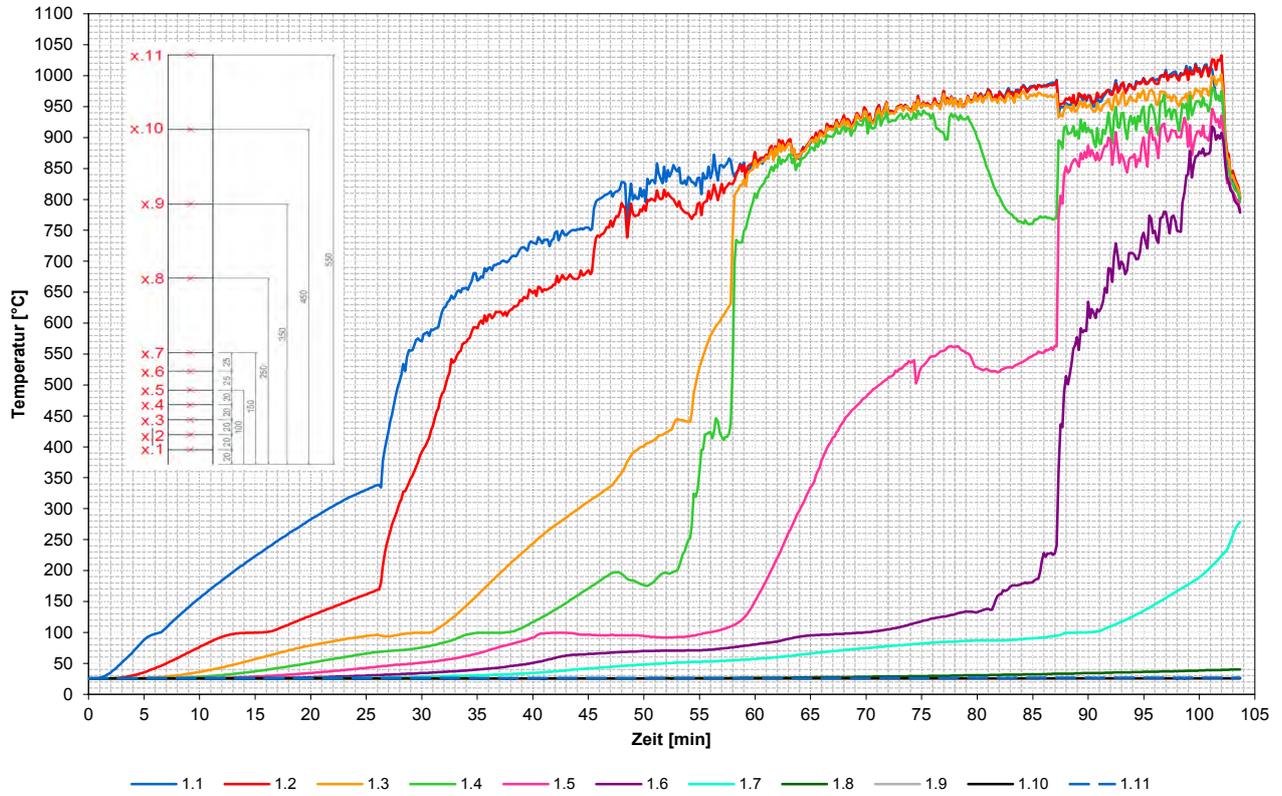


Diagramm A4.4 Messstellen im Probekörper: Messleiter 2

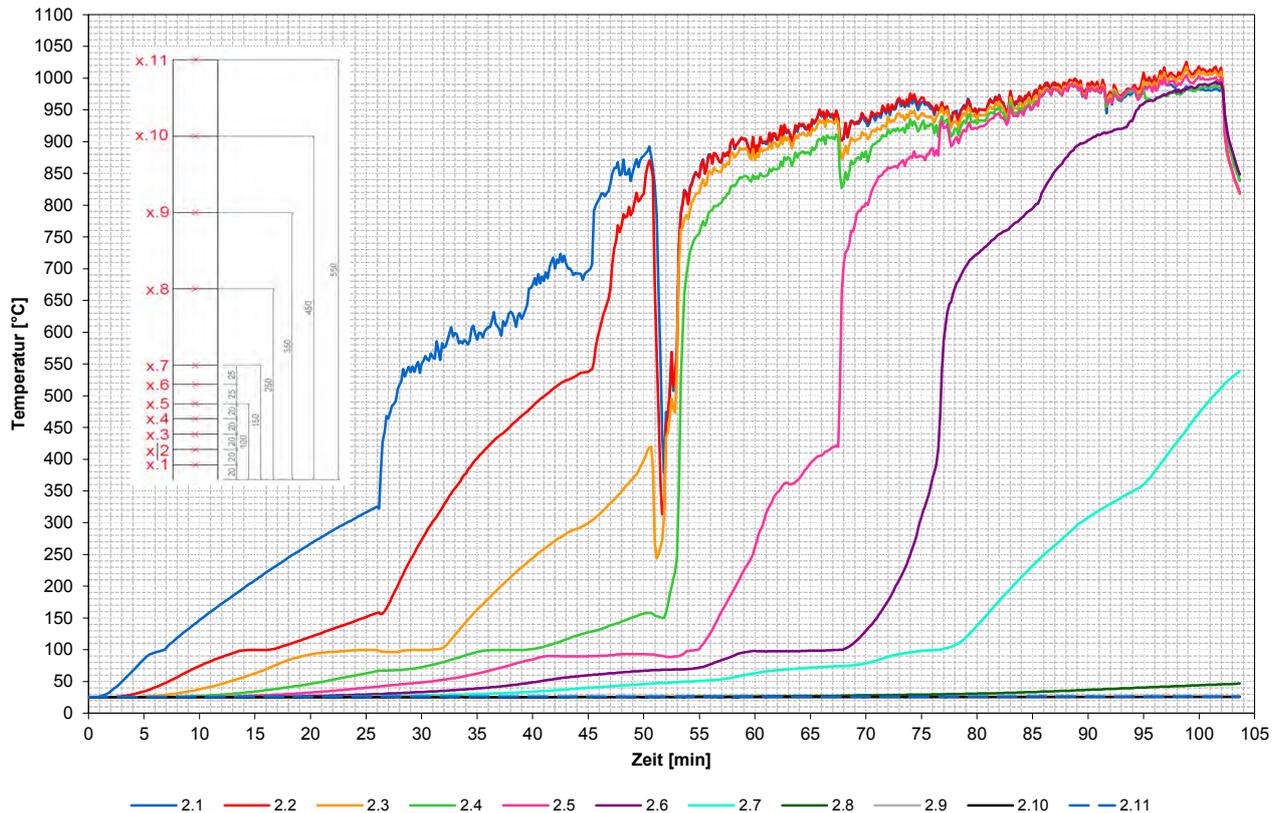


Diagramm A4.5 Messstellen im Probekörper: Messleiter 3

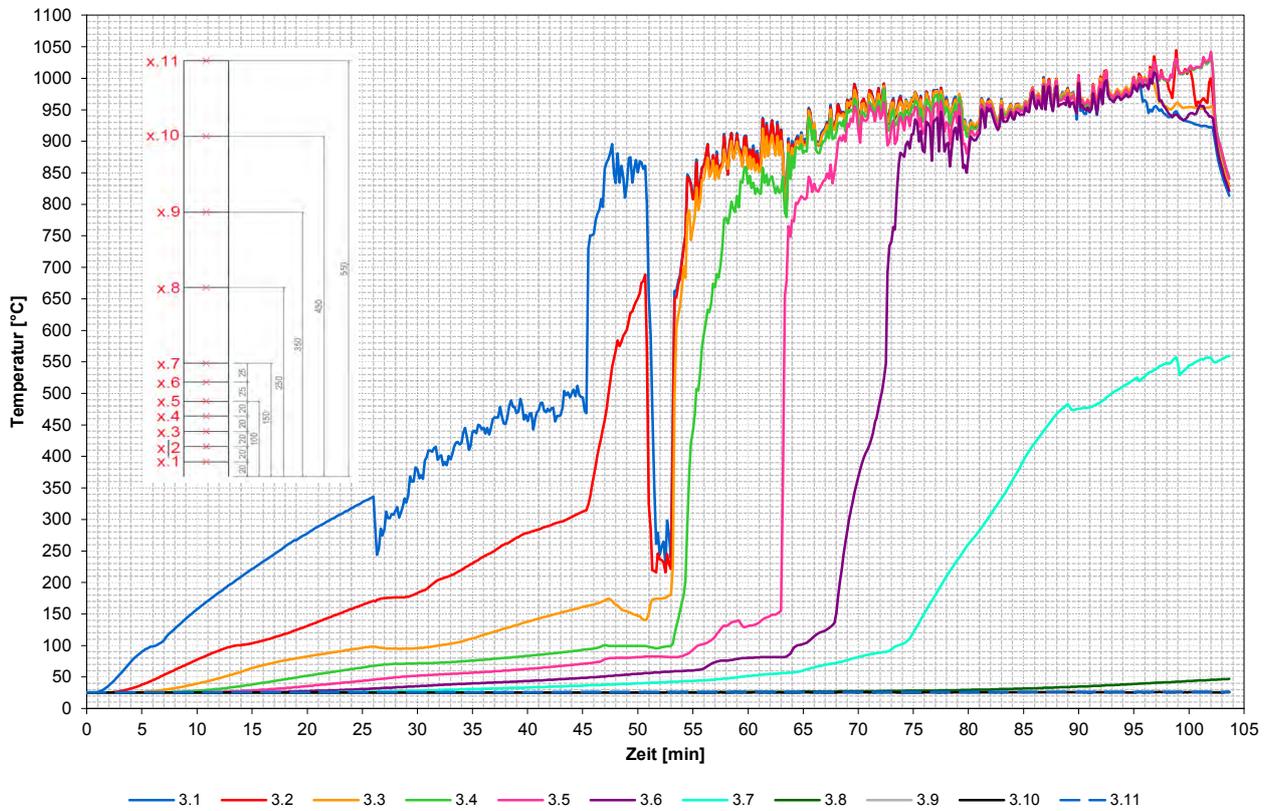


Diagramm A4.6 Messstellen im Probekörper: Messleiter 4

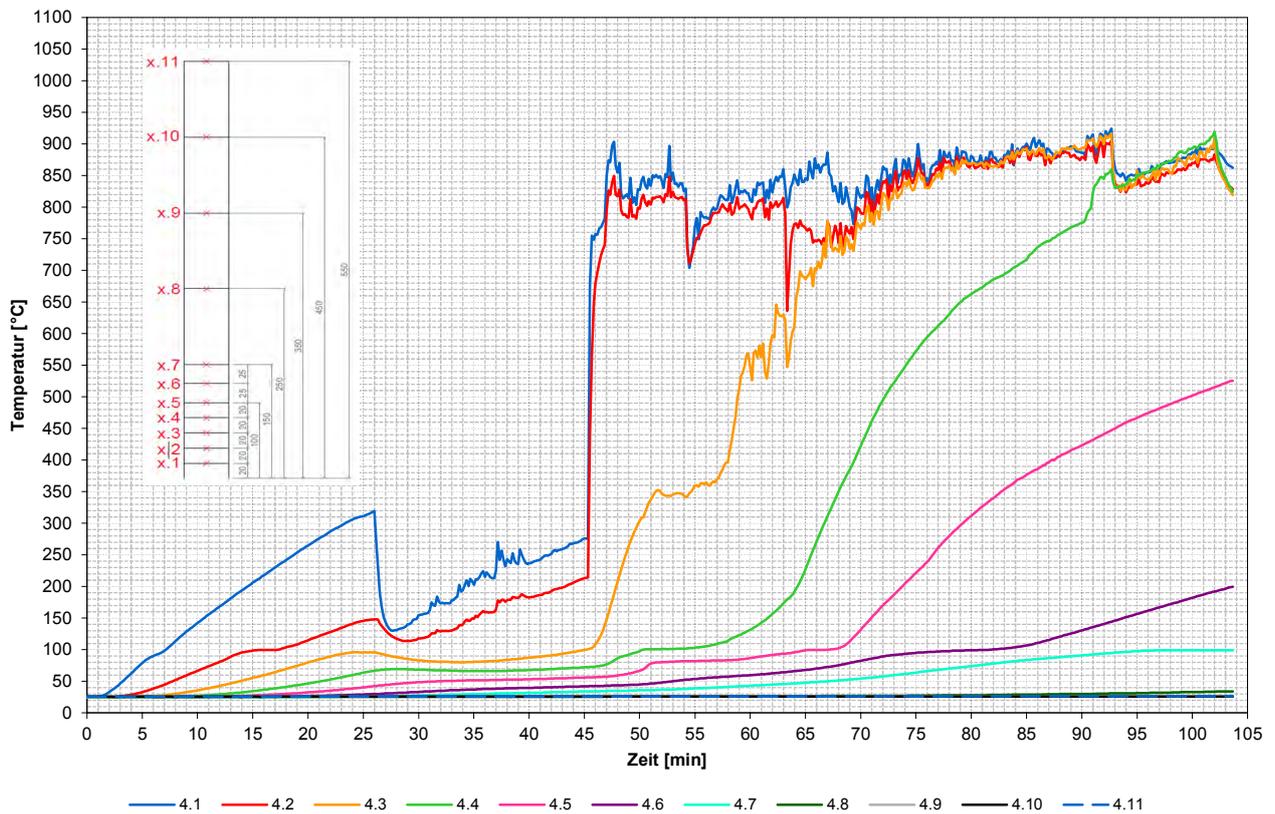
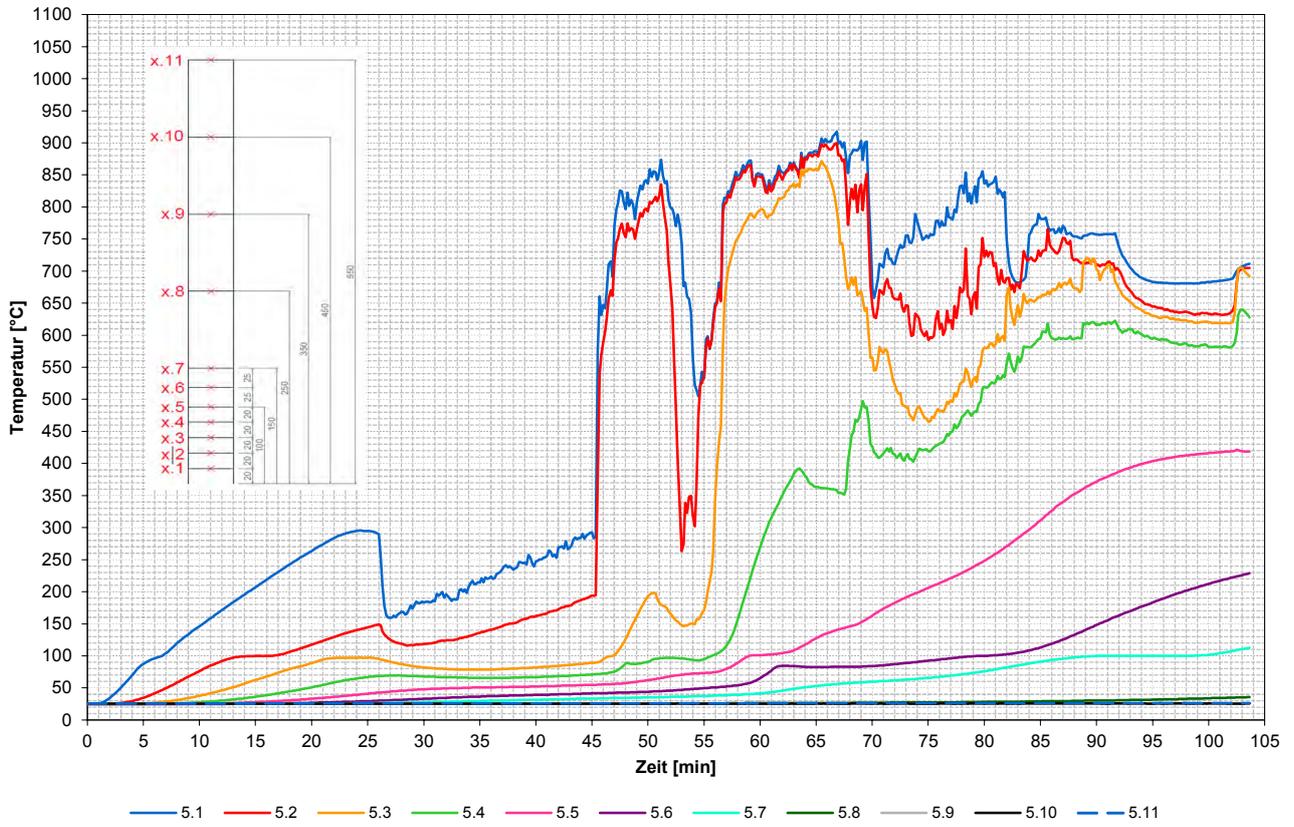


Diagramm A4.7 Messstellen im Probekörper: Messleiter 5



Anlage 5 Fotodokumentation zum Wandaufbau und Einbau



Bild A5.1 Der Stampflehm wurde vor dem Einbau in der Prüfhalle ausgebreitet und vorgetrocknet.



Bild A5.2 Montage der Schalung für die Erstellung der Stampflehmwand $d = 600$ mm.



Bild A5.3 Lagenweises Einbringen des Stampflehms in die vorbereitete Schalung und Darstellung der Wanddicke von 600 mm.



Bild A5.4 Positionierung der Messleiter zur Ermittlung der Temperaturen im Probekörperquerschnitt.



Bild A5.5 Lagenweises Einbringen und Verdichten des Stampflehms in die vorbereitete Schalung.

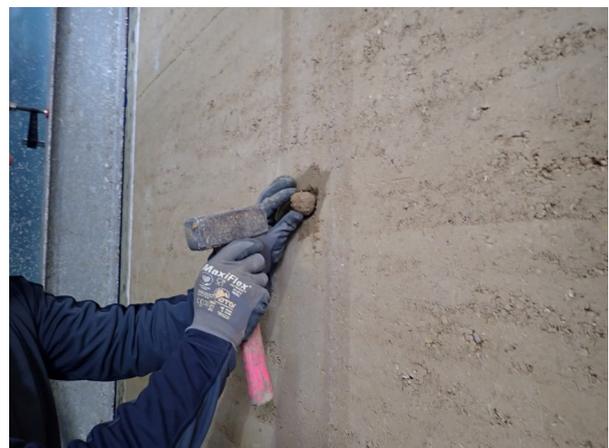


Bild A5.6 Verschluss der Öffnungen der Schalkonstruktions-Haltestangen.



Bild A5.7 Ansicht der feuerabgewandten Seite der Stampflehmwandkonstruktion $d = 600$ mm.

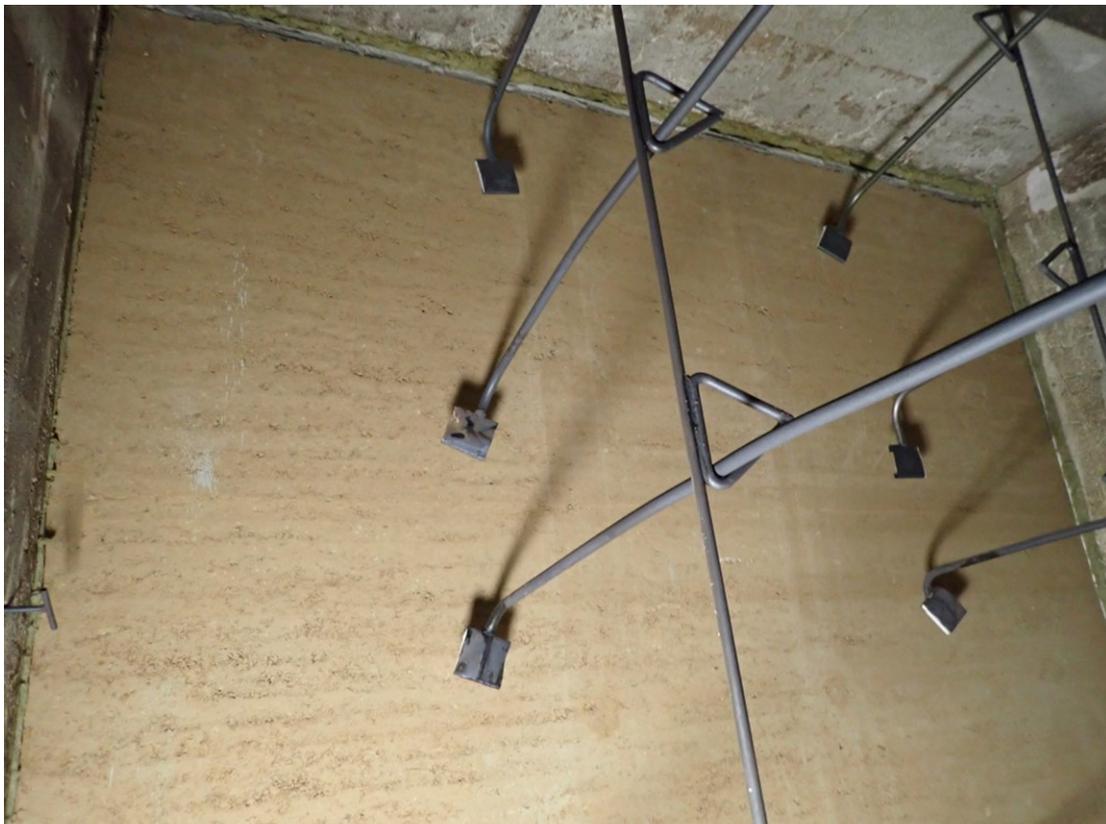


Bild A5.8 Ansicht der feuerzugewandten Seite der Stampflehmwandkonstruktion $d = 600$ mm.

Anlage 6 Fotodokumentation während der Feuerwiderstandsprüfung und der Stoßbeanspruchungen



Bild A6.1 Prüfminute 1: Ansicht der Stampflehmwandkonstruktion $d = 600$ mm.



Bild A6.2 Prüfminute 5: Punktförmige Verfärbung auf der Stampflehmwandoberfläche.



Bild A6.3 Prüfminute 21: Vertikalriss im Stampflehm erkennbar.



Bild A6.4 Prüfminute 27: Im unteren Bereich staucht die Stampflehmwandoberfläche zusammen.

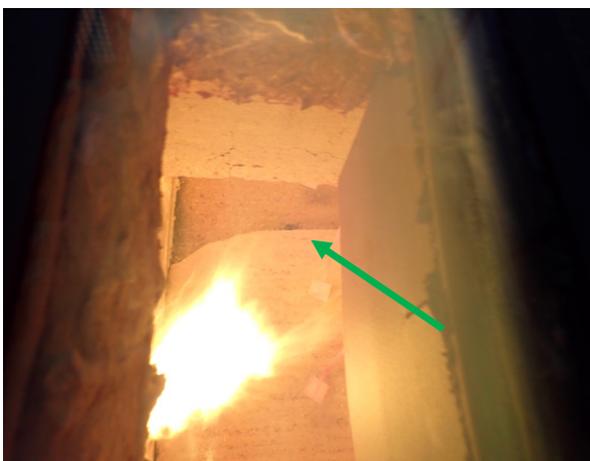


Bild A6.5 Prüfminute 30: Die darüberliegende Stampflehmscholle rutscht nach und steht vor dem Hauptprobekörper.



Bild A6.6 Prüfminute 31: Ansicht der vorstehenden Stampflehmscholle.



Bild A6.7 Prüfminute 34: Vertikalriss in der vorstehenden Stampflehm-scholle erkennbar.



Bild A6.8 Prüfminute 47: die vorstehende Stampflehm-scholle bricht in sich zusammen.

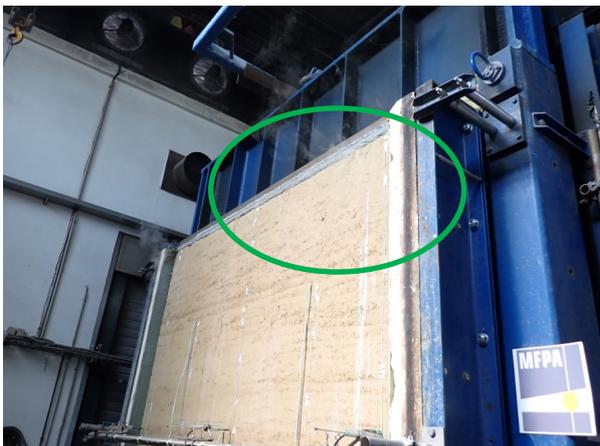


Bild A6.9 Prüfminute 53: Leichter Rauchaustritt am oberen Abschluss zwischen der Stampflehmoberkante und dem Mörtelbett.

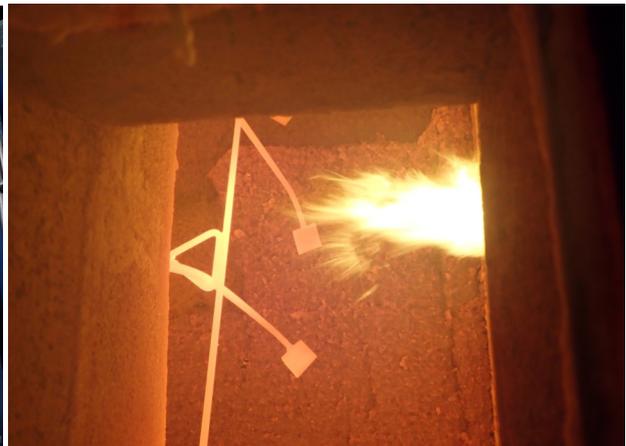


Bild A6.10 Prüfminute 54: Ansicht der zerklüfteten Oberfläche der Stampflehmwand.



Bild A6.11 Prüfminute 60: Weitere Bestandteile der Stampflehmwand fallen vom Probekörper ab.



Bild A6.12 Prüfminute 61: Ansicht des Probekörpers.



Bild A6.13 Prüfminute 68: Weitere Bestandteile der Stampflehmwand fallen vom Probekörper ab.



Bild A6.14 Prüfminute 69: Darstellung des benannten Vertikalrisses in der Stampflehmoberfläche.



Bild A6.15 Prüfminute 74: Ansicht der zerklüfteten Oberfläche der Stampflehmwand.



Bild A6.16 Prüfminute 79: Weitere Bestandteile der Stampflehmwand fallen vom Probekörper ab.



Bild A6.17 Prüfminute 86: Ansicht der zerklüfteten Oberfläche der Stampflehmwand.



Bild A6.18 Prüfminute 90: Ansicht des Probekörpers.



Bild A6.19 Prüfminute 92: Ansicht des Probekörpers unmittelbar nach der ersten Stoßbeanspruchung auf der feuerabgewandten Seite.



Bild A6.20 Prüfminute 92: Ansicht des Probekörpers unmittelbar nach der ersten Stoßbeanspruchung auf der feuerzugewandten Seite.

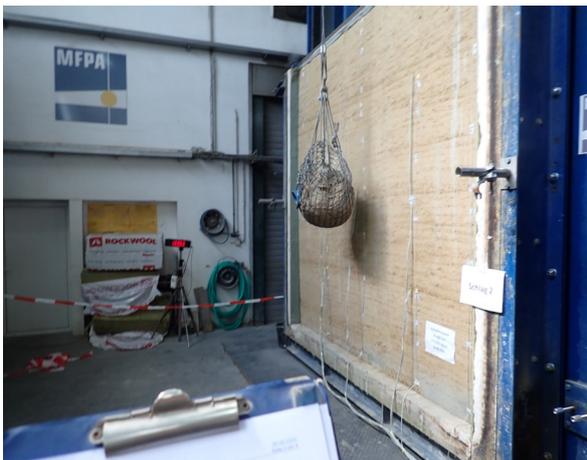


Bild A6.21 Prüfminute 94: Ansicht des Probekörpers unmittelbar nach der zweiten Stoßbeanspruchung auf der feuerabgewandten Seite.



Bild A6.22 Prüfminute 94: Ansicht des Probekörpers unmittelbar nach der zweiten Stoßbeanspruchung auf der feuerzugewandten Seite.



Bild A6.23 Prüfminute 96: Ansicht des Probekörpers unmittelbar nach der dritten Stoßbeanspruchung auf der feuerabgewandten Seite.



Bild A6.24 Prüfminute 96: Ansicht des Probekörpers unmittelbar nach der dritten Stoßbeanspruchung auf der feuerzugewandten Seite.



Bild A6.25 Ansicht der Stampflehmwandkonstruktion nach Beendigung der Feuerwiderstandsprüfung.



Bild A6.26 Detail Rissbreite Vertikalriss auf der feuerabgewandten Seite.

Anlage A7:

Abschlussbericht

DBU-Projekt AZ 35442/02

Gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU)

Arbeitspaket 6: Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für die Umsetzbarkeit ökologischer Konstruktionen bei Großprojekten für das Material Lehm

Gutachterliche Stellungnahme zur Zustimmung im Einzelfall – Tragende Stampflehmwände mit Brandschutzanforderungen im Innenbereich – Feuerwiderstand einer tragenden Lehmbauwand

Freilichtmuseum Detmold – Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude

Jäger Ingenieure GmbH, Radebeul

Im Auftrag von: LWL – Bau- und Liegenschaftsbetrieb, Münster

Autoren: T. Burkert und W. Jäger

31.03.2023

Gutachterliche Stellungnahme

Zustimmung im Einzelfall für

Tragende Stampflehmwände mit Brandschutzanforderungen im Innenbereich - Feuerwiderstand einer tragenden Lehmbauwand

BV: Freilichtmuseum Detmold * Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude
D – 32760 Detmold, Paderborner Straße

Zuständige Bauaufsichtsbehörde

Nordrhein- Westfalen:

Oberste Bauaufsicht Düsseldorf
Referat 614: Bautechnik/ Bauphysik
Ansprechpartner: Herr ORR Robert Schuchhardt
Bezirksregierung Düsseldorf
Cecilienallee 2
40474 Düsseldorf
Tel.: +49 211 86 18 57 20
E-Mail: robert.schuchhardt@mhkgb.nrw.de

Landkreis: Bauaufsicht Detmold
Stadt Detmold – Fachbereich Stadtentwicklung
Ansprechpartner: Frau Annegret Roye
Rosental 21
32756 Detmold
Tel.: +49 5231 977 430
Fax: +49 5231 977 8430
E-Mail: a.roye@detmold.de

Antragsteller

Landschaftsverband Westfalen-Lippe
Bau- u. Liegenschaftsbetrieb
Warendorfer Straße 24
48145 Münster
Ansprechpartner: Herr Ulrich Beyer
Tel.: +49 251 591 35 83
Fax: +49 251 591 33 00
E-Mail: Ulrich.Beyer@lwl.org

Bauvorhaben und Bauherr

Bauvorhaben: Freilichtmuseum Detmold
Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude
D-32760 Detmold, Paderborner Straße

Bauherr: Landschaftsverband Westfalen-Lippe
Bau- u. Liegenschaftsbetrieb
vertreten durch:
Herrn Ulrich Beyer
Warendorfer Straße 24, 48145 Münster

Architekt

ACMS Architekten GmbH
Architektur-Contor Müller Schlüter
Friedrich – Ebert – Str. 55
42103 Wuppertal
Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Architekt BDA Michael Müller
M.Sc. Architekt Simon Waigand
M.Sc. Architekt Niklas Wolters
Tel.: +49 202 445 71 00
Fax: +49 202 445 71 58
E-Mail: info@acms-architekten.de

Aufsteller und Prüfer der Standsicherheitsnachweise

Aufsteller - Standsicherheitsnachweise:
Kempfen Krause Beratende Ingenieure GmbH
Konrad-Adenauer-Ufer 41
50668 Köln
Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Holger Seitz
Dipl.-Ing. Oliver Rosenkranz
Tel.: +49 221 933 119 30
Fax: +49 221 933 119 28
E-Mail: Oliver.Rosenkranz@kempfenkrause.de

Aufsteller Brandschutzkonzept:
Thormählen + Peuckert – Beratende Ingenieure PartG mbB
Büro Paderborn – Technologiepark 31
33100 Paderborn
Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Josef Gabriel
Dipl.-Ing. Sascha Lauterbach
Tel.: +49 5251 1752-0
Fax: +49 5251 1752-10
E-Mail: paderborn@tp-ing.de

Bearbeitung aktuell:

Engels Beratende Ingenieure PartG mbB
Lemgoer Straße 20
32756 Detmold
Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Kai Eue
Tel.: +49 5231 30 99 22
Fax: +49 5231 30 99 20
E-Mail: eue@engels-detmold.de

Externer Gutachter ZiE Brand:

Jäger Ingenieure GmbH
Büro für Tragwerksplanung
Wichernstraße 12
01445 Radebeul
Ansprechpartner: Prof. Dr.-Ing. Wolfram Jäger
Prof. Dr.-Ing. Toralf Burkert
Dr.-Ing. Maik Erler
Tel.: +49 351 83 2 96-0
Fax: +49 351 83 2 96-50
E-Mail: ji@jaeger-ingenieure.de

Prüfingenieur - Standsicherheit:

Engels Ingenieure Detmold
Dipl.-Ing. Roland Eisler
Lemgoer Straße 20
32756 Detmold
Tel.: +49 5231 30 99 0
Fax: +49 5231 30 99 20
E-Mail: info@engels-detmold.de

Prüfung - Brandschutz:

Bauaufsicht Detmold in Verbindung mit der Feuerwehr Detmold
Stadt Detmold – Fachbereich Stadtentwicklung
Ansprechpartner: Frau Annegret Roye
Rosental 21
32756 Detmold
Tel.: +49 5231 977 430
Fax: +49 5231 977 8430
E-Mail: a.roye@detmold.de

Versuchsdurchführende Einrichtung:

MFPA Leipzig GmbH

Außenstelle: MFPA Leipzig GmbH - Brandprüfstelle

MFPA - Allee 1

04509 Laue bei Delitzsch

Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Michael Juknat (Leiter der Brandprüfstelle)

Dipl.-Ing. (FH) Eik Dorn

Tel.: +341 65 82 146

Fax.: +341 65 82 197

E-Mail: juknat@mfpa-leipzig.de

Hersteller Stampflehmwände:

Bernhard Fechler Lehmnbau

Bremker Strasse 100

32758 Detmold

Ansprechpartner: Bernhard Fechler

Tel: +49 5231 61 56 78

Mobil: +49 176 456 983 54

E-Mail: bfechler@gmx.de

Inhaltsverzeichnis

1 Kurzbeschreibung zum Bauwerk	6
2 Erläuterungen des Antraggegenstandes	10
2.1 Beschreibung des Antraggegenstandes.....	10
2.1.1 Anwendung von Stampflehmwänden als tragende Innenwände mit Brandschutzanforderungen.....	10
2.2 Beantragungsrelevantes technisches Regelwerk.....	10
3 Unterlagen zur Erläuterung und zur Verwendbarkeit	13
3.1 Erläuterungen zur Einbausituation.....	13
3.2 Eigenschaften der Wandbaustoffe zur Erreichung der geforderten Schutzziele.....	13
3.2.1 Stampflehm.....	13
4 Experimentelle Untersuchungen	16
4.1 Stampflehmwand unter Brandbeanspruchung.....	16
4.1.1 Versuchsaufbau.....	16
4.1.2 Belastung der Versuchswände.....	23
4.1.3 Belastungsrahmen.....	25
4.1.4 Herstellung der Prüfwände.....	27
4.1.5 Durchführung der Brandversuche.....	28
4.2 Ergebnisse der Versuche.....	29
5 Zusammenfassende Betrachtungen zu den beiden Versuchen	30
5.1 Fazit.....	39
6 Literatur	40
7 Anlagen	43
7.1 Aktuelle Planunterlagen zum Eingangs- und Ausstellungsgebäude, ACMS Architekten GmbH.....	43
7.2 Fachtechnische Stellungnahme zur Ausführung von tragenden Stampflehmwänden beim Neubau des Eingangs- und Ausstellungsgebäudes von Kempen Krause Beratende Ingenieure GmbH, 07.2021.....	43
7.3 Herleitung Belastung für Brandversuch Lehmwand D = 22 cm, Jäger Ingenieure GmbH.....	43

1 Kurzbeschreibung zum Bauwerk

Beim Neubau des Freilichtmuseums in Detmold sollen im Inneren des Eingangs- und Ausstellungsgebäudes tragende und aussteifende Lehmwände zur Ausführung kommen, die darüber hinaus gemäß vorliegendem Brandschutzgutachten nach [1] in feuerhemmender Bauweise erstellt werden müssen (siehe Bild 1 und 2).

Eine der Wände war zudem als feuerhemmende, raumabschließende Trennwand vorgesehen (sie ist allerdings keine tragende Wand; siehe Plan B2-C nach [1] in Achse 3.8). Aufgrund dessen, dass diese nichttragende Trennwand zusätzlich drei Türöffnungen mit Brandschutzanforderungen besitzt, hat man sich seitens des Architekten und Bauherrn entschieden, diese Wand aus Stahlbeton herzustellen und nicht aus Stampflehm (siehe Bild 2). Die tragenden Lehmwände dienen als Auflager für das Dachtragwerk des Ausstellungshauses. Hierfür werden die oberen Wandabschlüsse als Stahlbetonrähme ausgebildet. Lasten aus den angrenzenden Dachträgern sollen planmäßig zentrisch in die Rähme eingeleitet werden. Von Oberkante der Rohbaugründung bis Unterkante der Rähme ergeben sich Wandhöhen von bis zu ca. 7,65 m. Die Gesamtwandhöhe bis zur Traufe beträgt in etwa 9,00 m. Die Ausführung soll in Stampflehm-Bauweise vor Ort erfolgen, wobei im oberen Bereich der Wände auch Stampflehm-Fertigteile zum Einsatz kommen sollen (siehe Bild 6).



Bild 1 Ansicht des Gebäudekomplexes mit mittiger Treppenanlage und dem links gelegenen Ausstellungshaus

Gemäß dem vorliegenden Brandschutzkonzept nach [1] ist das Ausstellungshaus, was im Wesentlichen zur Veranlassung für die Beantragung der Zustimmung im Einzelfall führte, baurechtlich aufgrund der mittleren Höhe der Fußbodenoberkante des EG von weniger als 7,00 m über der Geländeoberfläche in die Gebäudeklasse 3 im Sinne von §2 (3) BauO NRW [3] einzustufen.

Das Ausstellungshaus ist durch eine innere Brandwand (siehe Bild 3 lila Linie im Bereich des grün hinterlegten Treppenraumes) von den beiden übrigen Gebäuden Eingangshaus und Servicehaus abgeschottet. Das Gebäudeensemble wird dadurch in zwei Brandabschnitte unterteilt. Auch der Gesamtkomplex ist in die Gebäudeklasse 3 nach BauO NRW einzuordnen. Aufgrund der Nutzung von Versammlungsräumen im Gebäudebereich des Eingangs- und Servicehauses wird der gesamte Gebäudekomplex zusätzlich als Sonderbau - Versammlungsstätte – nach [4] eingestuft. Im Ausstellungshaus befinden sich allerdings keine Versammlungsräume.

Die mittig im Ausstellungshaus angeordneten tragenden Wände müssen nach BauO NRW feuerhemmend F30 ausgeführt werden (siehe auch Bild 3 und Bild 7 mit Ausschnitten aus dem BSK nach [1]).

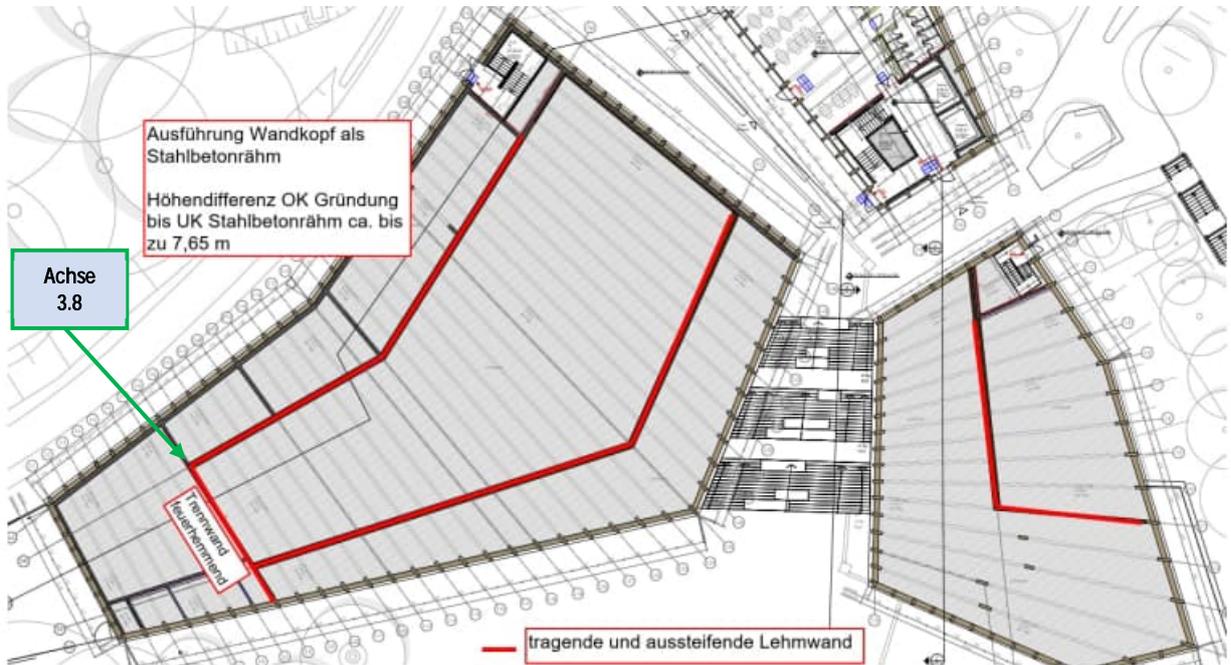


Bild 2 Grundriss Eingangs- und Empfangsgebäude mit tragenden und aussteifenden Lehmwänden (rot) nach [2]



Bild 3 Grundriss Eingangs-, Service- und Ausstellungshaus im EG mit brandschutztechnischen Anforderungen an die Lehmwände, speziell die Trennwand in Achse 3.8 einschließlich der Anforderungen an die darin befindlichen Türen nach [1]

Für den Einsatz von Lehmwänden liegen hinsichtlich des verwendeten Materials, den geometrischen Randbedingungen sowie den brandschutztechnischen Eigenschaften aktuell keine ausreichenden normativen Regelungen vor. Diesbezüglich ist für die geplante Ausführungsweise der tragenden Stampflehmwand eine Zustimmung im Einzelfall zu erwirken.

Die aktuelle Planung hinsichtlich der tragenden Stampflehmwände mit Brandschutzanforderungen ist in den nachfolgenden Bildern 4 bis 6 nach [7] dargestellt. Im Grundriss und Schnitt sind die Stampflehmwände braun dargestellt, in den beiden Wandabwicklungen in Bild 6 jeweils gelb und grün. Darüber hinaus ist in der Ansicht 4 der oberen Wandabwicklung in Bild 6 auch die aktuelle Ausführung der Trennwand in Achse 3.8 in Stahlbetonbauweise dargestellt.

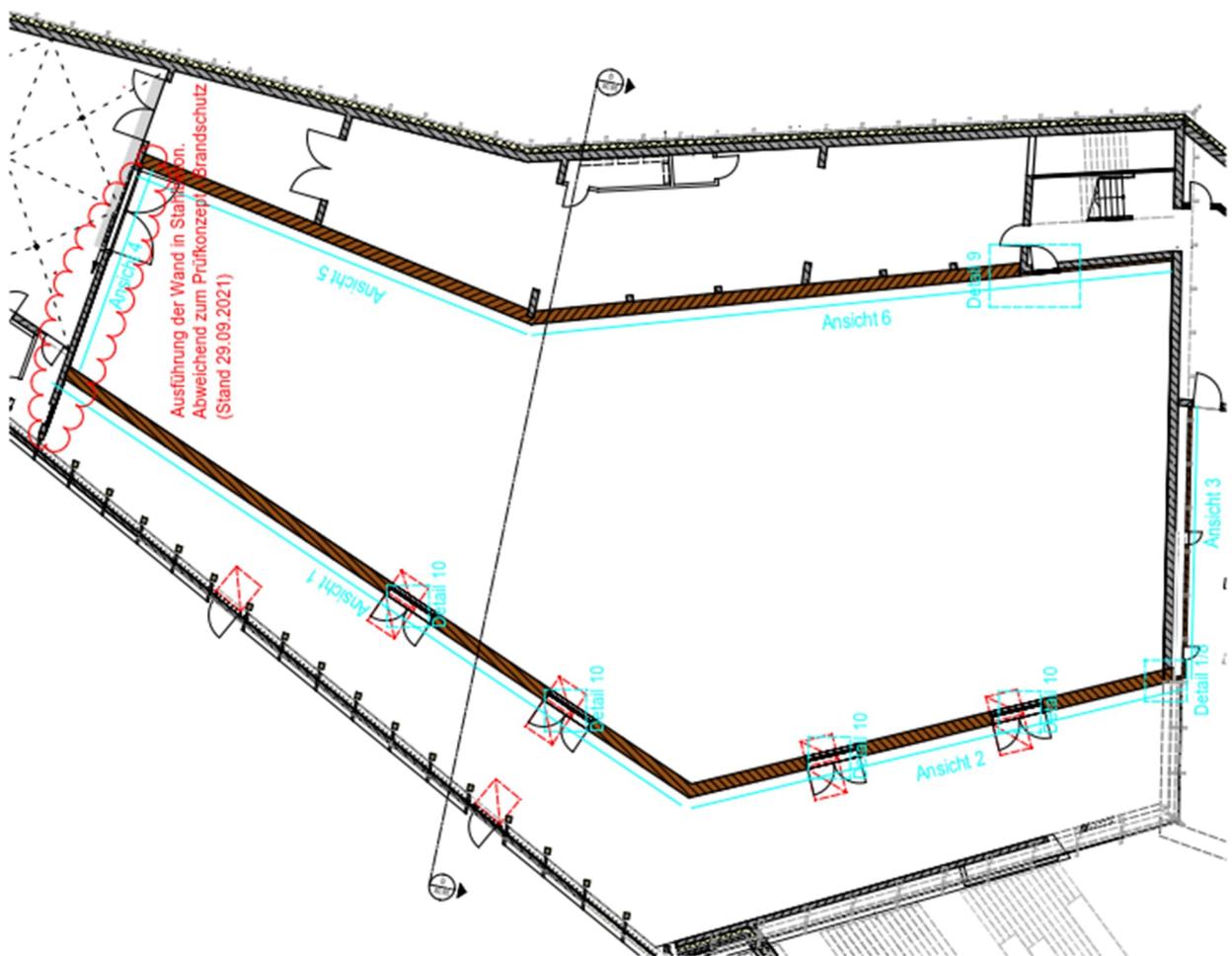
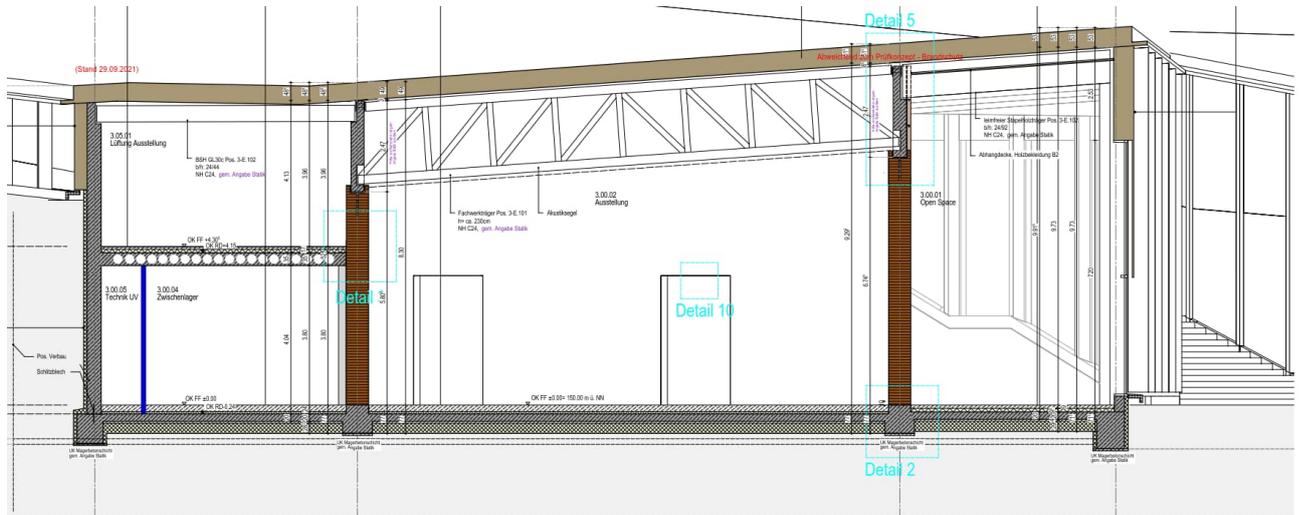
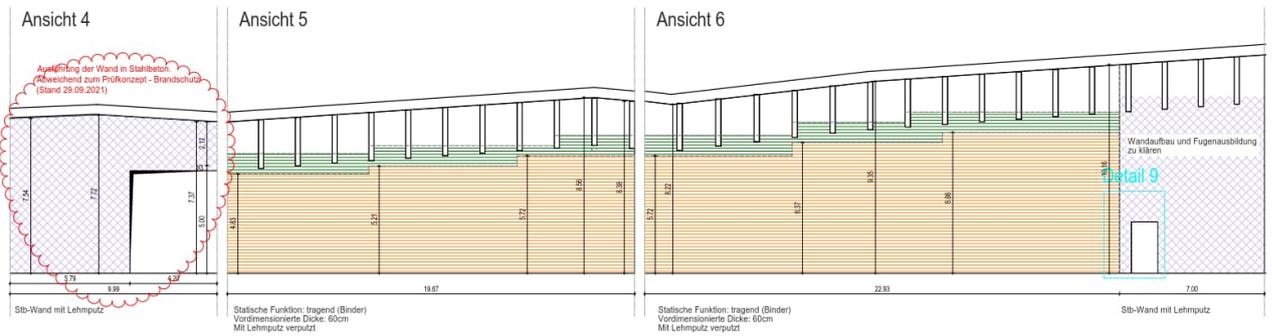


Bild 4 Aktuelle Planung Grundriss EG des Ausstellungsgebäudes mit Darstellung der geänderten Trennwand in Stahlbetonbauweise (linker Bereich) und den in braun dargestellten Wänden in Stampflehmbauweise (Planauszug nach [7] von ACMS Architekten GmbH)



Schnitt D-D, M: 1:50

Bild 5 Gebäudequerschnitt durch das Ausstellungsgebäude mit den beiden tragenden Lehmwänden mit Brandschutzanforderungen F30 in braun dargestellt (nach [7])



Wandwicklung Ausstellung, M: 1:100



Bild 6 Wandabwicklungen der beiden tragenden Lehmwände aus Bild 4 (nach [7])

9.2 Tragende und aussteifende Wände und Stützen

Aufgrund der baurechtlichen Einstufung des Gebäudes bestehen die in nachfolgender Tabelle aufgeführten Anforderungen:

Gebäudeteil	Anforderung	Grundlage
Ausstellungshaus	feuerhemmend	§ 27 BauO NRW 2018
Eingangshaus	feuerhemmend	§ 27 BauO NRW 2018 § 3 (1) SBauVO
Servicehaus	feuerhemmend	§ 27 BauO NRW 2018 § 3 (1) SBauVO

Bild 7 Auszug aus dem BSK des Büros Thormählen + Peuckert nach [1] zu Anforderungen an tragende Wände, Trennwände und Abschlüsse von Öffnungen

2 Erläuterungen des Antraggegenstandes

2.1 Beschreibung des Antraggegenstandes

2.1.1 Anwendung von Stampflehmwänden als tragende Innenwände mit Brandschutzanforderungen

Tragendes Lehmsteinmauerwerk in der Gebäudeklasse 3: Abweichung von einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung

Das verwendete tragende Lehmmauerwerk im Inneren des Gebäudes weicht von den geltenden Lehmbauregeln (siehe [6]) in der Art ab, dass:

- die geplante Gebäudeklasse 3 außerhalb der zulässige Gebäudeklasse 2 liegt (Anlage 2.7/15 der Liste der eingeführten technischen Baubestimmungen [8]; vgl. nachfolgende Bilder 8 und 9).

2.7.11	Richtlinie Anlage 2.7/15	Lehmbau Regeln	Februar 2008	****)
--------	--------------------------	----------------	--------------	-------

Bild 8 Auszug aus der Liste der Technischen Baubestimmungen von NRW nach [8]

2.2 Beantragungsrelevantes technisches Regelwerk

Für die Herstellung von Lehmwänden gilt die technische Regel lfd. Nr. A 1.2.8.8 „Lehmbau Regeln, Februar 2008“ [6] der Anlage „Technische Baubestimmungen“ zur VV TB NRW [5]. Daraus geht hervor, dass das derzeit
 31.03.2023

gültige Regelwerk nicht für die Gebäudeklasse 3, in die das vorliegende Gebäude einzuordnen ist, angewendet werden kann (siehe Bild 9).

A 1.2.8.8	Lehmbauten für Wohngebäude der Gebäudeklasse 1 und 2 mit höchstens zwei Vollgeschossen	Lehmbau Regeln, Februar 2008	
-----------	----------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------	--

Bild 9 Auszug aus der Anlage der Technischen Baubestimmungen zur VV TB NRW [5] für die Herstellung von Lehmwänden

Bei dem vorliegenden Neubau handelt es sich um ein Gebäude in Holz-Glas-Bauweise mit massiven Innenwänden, dessen tragende Konstruktion u.a. aus Stampflehm (tragende Wände) und Holz (Decken) besteht. Tragende Innenwände werden in Lehmbauweise ausgeführt. An bestimmte dieser tragenden Wände werden Anforderungen, die aus dem baulichen Brandschutz resultieren, gestellt. Diese Wände haben gemäß Architektenplan nach [7] eine vordimensionierte Dicke von 60 cm.

Gemäß der aktuellen Lehmbauregeln [6], Abschnitt 5.5.2 Brandverhalten von Lehmbauteilen, Tabelle T 5-7 können die folgenden Feuerwiderstände für Bauteile aus Lehmbaustoffen angesetzt werden (siehe hierzu auch Bild 10):

- Darin werden massive gestampfte Lehmwände mit einer Dicke von 24 cm als feuerbeständig (F90 A) eingestuft.

Allerdings wird hier auf DIN 18954: Ausführung von Lehmbauten (1956) nach [9] verwiesen. Die „alten“ Lehmbaunormen aus den 1950er Jahren lehnten sich nach [10] noch an die damalige Mauerwerksnorm DIN 1053 vom Dezember 1952 an, wobei man hinsichtlich der Stabilität der Bauwerke und Bauteile von ein- und zweigeschossigen Bauten auf einen besonderen Nachweis verzichten kann, wenn von den in Abschnitt 2.2 (gemeint ist hier die DIN 1053 von 12/1952 nach [11]) geforderten aussteifenden Wänden eine ausreichende Anzahl von Außenwand zu Außenwand oder Außenwand zu belasteter Innenwand durchläuft. Ein Auszug mit dem Wortlaut des Abschnitts 2.2 ist in Bild 11 dargestellt.

In Bezug auf die in Bild 11 genannten aussteifenden Wände, deren Geometrien und Abstände ist zu sagen, dass im Falle der im Grundriss in Bild 4 und der Wandabwicklung in Bild 6 unten dargestellten tragenden Wand aus Stampflehm beim antragsgegenständlichen Gebäude überhaupt keine aussteifenden Wände vorgesehen sind. Darüber hinaus handelt es sich bei den vorgesehenen Wandhöhen im Ausstellungsgebäude mit bis zu 8,22 m hohen Stampflehmwänden um relativ hohe Wände, die offensichtlich nicht mit den damals normativ festgelegten Raumhöhen in Einklang zu bringen sind.

Somit sind zur Beurteilung der Bauart „Lehmwand“ hinsichtlich des Feuerwiderstandes Prüfungen der Wand vorzunehmen.

T 5-7 Feuerwiderstandsklasse von Wänden aus Lehmbaustoffen	
Bauteil	Klassifizierung
Massive Wände Massive gemauerte oder gestampfte Lehmwände (der Baustoffklasse A) einer Dicke von 24 cm ¹⁾	F 90 A
Fachwerkwände mit ausgefüllten Gefachen Bedingungen: Holzquerschnitte mind. 100x100 mm bei 1seitiger, mind. 120x120 mm bei 2seitiger Brandbeanspruchung, Ausfüllung mit Lehm-schlag (Strohlehmausfachung), mindes-tens einseitige Bekleidung, z. B. mit 15 mm Putz ²⁾	F 30 B
¹⁾ Nach DIN V 18954: 1956 ²⁾ Vgl. DIN 4102-4 4.11: 1994-03, Abschnitt 4.11, Bedingungen im Einzelnen siehe dort.	

Bild 10 Tabelle T 5-7 aus den Lehmbauregeln [6]

2.2 Aussteifung belasteter Wände

2.21 Belastete Wände müssen durch Querwände ausreichend ausgesteift sein. Sind die aussteifenden Querwände durch Öffnungen unterbrochen, so muß der Abstand der ersten Öffnung von der ausgesteiften Wand $\geq 1/5$ der Geschoßhöhe sein, mindestens jedoch 50 cm betragen. Dicken und Mindestabstände der aussteifenden Querwände müssen Tafel 2 entsprechen.

Tafel 2 Aussteifende Querwände

Spalte	a	b	c	d	e
Zeile	Wanddicken und Mittenabstände				
	Dicke der aus-zusteifenden belasteten Wand in cm	Geschoß-höhe in m	Aussteifende Querwand		
			im 1. bis 4. Voll-geschoß von oben Dicke in cm	im 5. u. 6. Voll-geschoß von oben Dicke in cm	Mitten-abstand in m
1	$\geq 11,5 < 17,5$	$\leq 3,25$	$\geq 11,5$	$\geq 17,5$	$\leq 4,50$
2	$\geq 17,5 < 24$				$\leq 6,00$
3	$\geq 24 < 30$	$\leq 3,50$			$\leq 8,00$
4	≥ 30	$\leq 5,00$			

Die aussteifenden Querwände müssen mit den auszustei-fenden belasteten Wänden gleichzeitig hochgeführt und mit ihnen im Verband gemauert werden. Ist das gleichzeitige Hochführen der belasteten und der aussteifenden Wände baulich besonders schwierig, so kann Loch- oder stehende Verzahnung in folgenden Fällen angewendet werden:

Bild 11 Auszug aus DIN 1053 (12/1952), Abschnitt 2.2 Aussteifung belasteter Wände

3 Unterlagen zur Erläuterung und zur Verwendbarkeit

3.1 Erläuterungen zur Einbausituation

Bei den gegenständlichen Wänden im Ausstellungsbereich des Freilichtmuseums handelt es sich entsprechend Brandschutzkonzept nach [1] um 60...65 cm dicke, tragende Stampflehmwände (siehe Bild 3; diese sind gemäß Brandschutzkonzept nach [1] nicht raumabschließend) mit der Anforderung an den Feuerwiderstand F 30 (feuerhemmend).

Zur Anwendung sollen folgende Baustoffe kommen:

- Stampflehm der Fa. Conluto
Vielfalt aus Lehm
Detmolder Straße 61-65
32825 Blomberg

3.2 Eigenschaften der Wandbaustoffe zur Erreichung der geforderten Schutzziele

Bei der vorgesehenen Anwendung als Wand mit Anforderungen an den Feuerwiderstand ist die Anwendungs-klasse II nach Tabelle T 3-1 der Lehm-bau-Regeln [6] zutreffend.

T 3-1 Anwendungsklassen von Lehmsteinen	
Anwen-dungs-klasse	Anwendungsbereich
I	Verputztes, der Witterung ausgesetztes Außenmauerwerk
II	Verkleidetes, witterungsgeschütztes Außenmauerwerk, Innenmauerwerk
III	Trockene Anwendung (Deckenauflagen, Stapelwände)

Bild 12 Tabelle T 3-1 aus den Lehmbauregeln [6]

„Lehmsteine der Anwendungsklasse II müssen eine ausreichende Festigkeit haben und dürfen bei der Feuchteaufnahme beim Vermauern und Verputzen bei der vorgesehenen Anwendung nicht zu sehr quellen. Bei ausreichender Druckfestigkeit können sie für tragendes Mauerwerk verwendet werden. Steine der Klasse II sollen einen herstellungsbedingten Lochanteil von nicht mehr als 15 % aufweisen.“ [6]

3.2.1 Stampflehm

Nachfolgend werden Eigenschaften des von Fa. Conluto vertriebenen Stampflehms tabellarisch zusammengefasst dargestellt.

Prüfkörper		Würfel	Zylinder	Wand (Riley)
Abmessungen	mm	200 x 200 x 200	150 x 300	1200 x 300 x 1200
Kennwert	Einheit			
Trockenrohdichte	kg/m ³	2.170	2.230	2.250
Dichte bei Ausgleichsfeuchte	kg/m ³	2.220 rd. 1%	2.250 rd 1%	2.279 rd. 1,3 %
Druckfestigkeit	N/mm ²	3,96	2,69	2,22
Elastizitätsmodul	N/mm ²	k. A.	3.184	2.448
Poisson - Zahl	-	0,3 bis 0,45		

Bild 13 Materialkennwerte Stampflehm Fa. Conluto, Blomberg von 2010 nach [12]

Proben-Nr.	Rohdichte	Druckfestigkeit	Prüfdatum	Prüfalter	Prüfkörper	Bemerkung
	[kg/dm ³]	[N/mm ²]		[d]		
1.1	2,161	3,21	15.07.2021	59	200er Würfel	Serie 01-21
1.2	2,190	3,88				
1.3	2,186	4,15				
MW	2,179	3,75				
2.1	2,170	3,94	15.07.2021	59	200er Würfel	Serie 02-21
2.2	2,155	4,16				
2.3	2,158	5,15				
MW	2,161	4,42				
3.1	2,195	3,58	15.07.2021	59	200er Würfel	Serie 03-21
3.2	2,139	3,89				
3.3	2,158	3,56				
MW	2,164	3,68				
1.1	2,191	3,10	07.09.2021	56	200er Würfel	Serie 04-21
1.2	2,218	3,13				
1.3	2,177	3,15				
MW	2,195	3,12				
2.1	2,188	3,10	07.09.2021	56	200er Würfel	Serie 05-21
2.2	2,191	3,11				
2.3	2,198	3,17				
MW	2,192	3,12				
3.1	2,123	3,09	07.09.2021	56	200er Würfel	Serie 06-21
3.2	2,150	3,15				
3.3	2,129	3,08				
MW	2,134	3,11				
4.1	2,135	3,07	07.09.2021	56	200er Würfel	Serie 07-21
4.2	2,150	3,10				
4.3	2,131	3,10				
MW	2,139	3,09				

Bild 14 Druckfestigkeit & Rohdichte Stampflehm von Fa. Conluto, Blomberg von 2021 nach [13]

Gemäß Tabelle T 4-1 Anforderungen an tragende Wände aus Lehmbaustoffen nach [6] erfüllen die zuvor dargestellten Druckfestigkeiten nach [13] formal die Anforderungen für Stampflehm an eine Druckfestigkeit [N/mm²]/ Steinfestigkeitsklasse 3, jedoch gelten die Werte auch hier nur für maximale Geschosshöhen von ≤ 3,25 m.

T 4-1 Anforderungen an tragende Wände ¹⁾ aus Lehmbaustoffen											
1		Mauerwerk aus Lehmsteinen in MG II			Mauerwerk aus Lehmsteinen ²⁾ mit Lehmörtel ³⁾			Stampflehm			Wellerlehm
2	Nachweise										
3	Bei 1-2 Vollgeschossen ⁴⁾	Steinfestigkeitsklasse			Steinfestigkeitsklasse			Druckfestigkeit und Schwindmaß			Druckfestigkeit
4	Steinfestigkeitsklasse bzw. Druckfestigkeit [N/mm ²]	2	3	4	2	3	4	2	3	4	1
5	Zulässige Druckspannungen [N/mm ²] ⁵⁾	0,3	0,4	0,5	0,3	0,4 ⁶⁾	0,5 ⁶⁾	0,3	0,4	0,5	0,2
6	Schwindmaß [%]	–			–			≤ 2			
7	Mindestwanddicke für Außenwände [cm] ⁷⁾	36,5			36,5			32,5			40
8	Mindestwanddicke für Innenwände [cm] ⁸⁾	24			24			24			40
9	Mindestquerschnitt von Pfeilerartigen Wänden [cm ²]	1300			1300			1600			3200

Fußnoten zu Tabelle T 4-1

¹⁾ zulässige Geschosshöhe ≤ 3,25 m

²⁾ auch sonstigen künstlichen Steinen oder Natursteinen aller Art

³⁾ auch Mörtel MG I

⁴⁾ Geschosshöhe ≤ 3,25 m, bei einem Vollgeschoss max. Wandhöhe einschließlich Kniestock 4 m über OK Sockel

⁵⁾ Bei Pfeilerartigen Wänden ist die zulässige Spannung bis zum 1,5-fachen des Mindestquerschnittes mit dem Faktor 0,8 abzumindern.

⁶⁾ zulässig bei Nachweis der Mörteldruckfestigkeit in Höhe der jeweiligen Steinfestigkeit

⁷⁾ Eine Mindestwanddicke von 24 cm ist zulässig bei eingeschossigen Bauten, die nicht zum dauerhaften Aufenthalt von Personen dienen und deren Geschosshöhe ≤ 2,5 m beträgt. Die Einhaltung der zulässigen Druckspannung sowie die Gewährleistung der räumlichen Stabilität ist nachzuweisen.

⁸⁾ Bedingungen: Geschosshöhe ≤ 2,75 m, Verkehrslast einschließlich Trennwandzuschlag ≤ 2,75 kN/m², nur zulässig als Zwischenaufleger durchlaufender Decken mit Stützweiten ≤ 4,5 m bzw. bei Anordnung einer Zentrierleiste auf einem Ringbalken 6,0 m. Eine Abweichung von diesen Bedingungen erfordert die gleichen Dicken wie bei Außenwänden.

In dem parallel angesetzten Prüfprogramm an der Jade Universität Oldenburg, Institut für Materialprüfung und Bauwerkserhaltung GmbH (IfMB), Prof. Dr.-Ing. Heinrich Wigger, wurden weitere Materialkennwerte, wie z.B. Rohdichte, Druckfestigkeit, Schwinden, Elastizitätsmodul, Scherkraft und Kriechen an Klein- und zum Teil auch an Großprüfkörpern aus Stampflehm mit unterschiedlichen Feuchtegehalten ermittelt [23], [24] (siehe Anlagen zur ZIE).

In nachfolgendem Bild 16 sind die ermittelten Druckfestigkeiten an Prüfkörpern aus Stampflehm in dem parallel zu den Brandversuchen gelaufenen Untersuchungsprogramm zur „Ermittlung mechanischer und physikalischer Eigenschaften des Stampflehms“ am IfMB in Oldenburg nach [24] zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 7: Anzahl, Abmessungen, Rohdichte und Druckfestigkeit sowie Variationskoeffizient des Stampflehms in Abhängigkeit der Schlankheit λ

Anzahl	Breite	Länge	Höhe	Schlankheit	Rohdichte	Druckfestigkeit*	Variationskoeffizient
n	b	l	h	λ	ρ	f	V
-	cm	cm	cm	-	kN/m ³	N/mm ²	%
12	20	20	20	1,0	2.166	3,47	16
10		15**	30	2,0	2.186	2,49	8
2	40	100	100	2,5	2.095	1,76	12
3	10	100	100	10,0	2.000	1,57	36
3	15	141	200	13,3	2.189	1,18	24

* Mittelwerte ** Durchmesser

Bild 16 Zusammenfassende Tabelle mit den ermittelten Druckfestigkeiten von Stampflehm – Klein- und Großprüfkörpern nach [24]

4 Experimentelle Untersuchungen

4.1 Stampflehmwand unter Brandbeanspruchung

4.1.1 Versuchsaufbau

Für die ZIE wurde in Zusammenarbeit mit den verantwortlichen Ingenieuren der versuchsdurchführenden Einrichtung der MFPA Leipzig GmbH in Laue (bei Delitzsch), Herrn Jucknat und Herrn Dorn, der Versuchsaufbau für die tragende Stampflehmwand unter Brandbeanspruchung geplant und anschließend mit der Obersten Bauaufsicht in Düsseldorf, Herrn Schuchhardt und Herrn Bröhl, gemäß E-Mail-Schriftverkehr vom 13.10.2021 [21] und 29.10.2021 [22] abgestimmt.

Im Zuge dieser Abstimmung wurden folgende Brandprüfungen festgelegt:

- Wand 1 : Prüfung einer maßstabsgerechten Stampflehmwand nach DIN EN 1363-1:2012-10 in Verbindung mit DIN EN 1365-1:2013-08 mit 22 cm Wanddicke und entsprechend reduzierter Belastung,
- Wand 2: Prüfung einer Wand mit der realen Wanddicke von 60 cm und Gesamtabmessungen 3,0 m x 3,0 m x 0,6 m mit realen Belastungen nach DIN EN 1363-1:2012-10 in Verbindung mit DIN EN 1365-1:2013-08.

Der Aufbau der raumabschließenden Wand ist symmetrisch, sodass die Prüfung an einem Wandaufbau erfolgen konnte. Der Aufbau der beiden Prüfkörper wurde so konzipiert, dass sie der zu erwartenden Einbausituation im Freilichtmuseum entsprechen.

Die beiden geprüften Stampflehmwände wurden sowohl auf der zu prüfenden als auch der brandabgewandten Seite nicht verputzt. Die Standzeit nach Fertigung der Wand bis Prüfbeginn ist abhängig von den verwendeten Baustoffen und der Wanddicke. Da Lehm lediglich trocknet und nicht hydraulisch abbindet, ist die Dicke der Wand ausschlaggebend für die Trocknungs- bzw. Standzeit. Je nach Wanddicke (22 oder 60 cm) waren die Trocknungszeiten unterschiedlich. Für den Prüfungsbeginn war das Erreichen der Ausgleichsfeuchte der Prüfkörper Voraussetzung.

Nach DIN EN 1365-1 [15] (durch DIN EN 1363-1 [14] in Bezug genommen) muss die zu prüfende Wand mindestens 3 m in der Länge und mindestens 3 m in der Höhe betragen, wenn die Wand in der Anwendung höher als 3 m ist. Ein freier Rand ist einseitig mit einem Spalt 25-50 mm zwischen Prüfraumen und Mauerwerk auszubilden und mit einer nicht brennbaren Dämmwolle zu verfüllen (siehe Bild 17 – Nr. 12 am linken und rechten Rahmenrand und Bild 21). Dies wurde in beiden Versuchen so ausgeführt.

Die Prüflast wird über Pressen, die entweder an der Ober- oder Unterseite des Prüfraumens angebracht sind, auf die Probewand aufgebracht. Als Prüflast wird hier im speziellen Fall das Eigengewicht der Dachkonstruktion (Dachtragwerk + Dachdeckung) einschließlich Stahlbetonringbalken sowie dessen Verkleidung (Stampflehm-Fertigteile) sowie die Lastanteile aus äußerer Einwirkung (Schnee und Wind, Mannlast) im Bereich der Wandoberkante eingebracht.

Gemäß DIN EN 1365-1 ist die Lasteinleitung am Wandkopf mit Belastung von oben (siehe Bild 17 links) oder unten (siehe Bild 17 rechts) möglich. Bei der in der MFPA Leipzig, Brandprüfstelle Laue, vorhandenen Prüfeinrichtung wird die Lasteinleitung am Kopf mit Belastung von unten realisiert (wird über Pressen von unten eingeleitet, vgl. hierzu Bild 17 rechts).

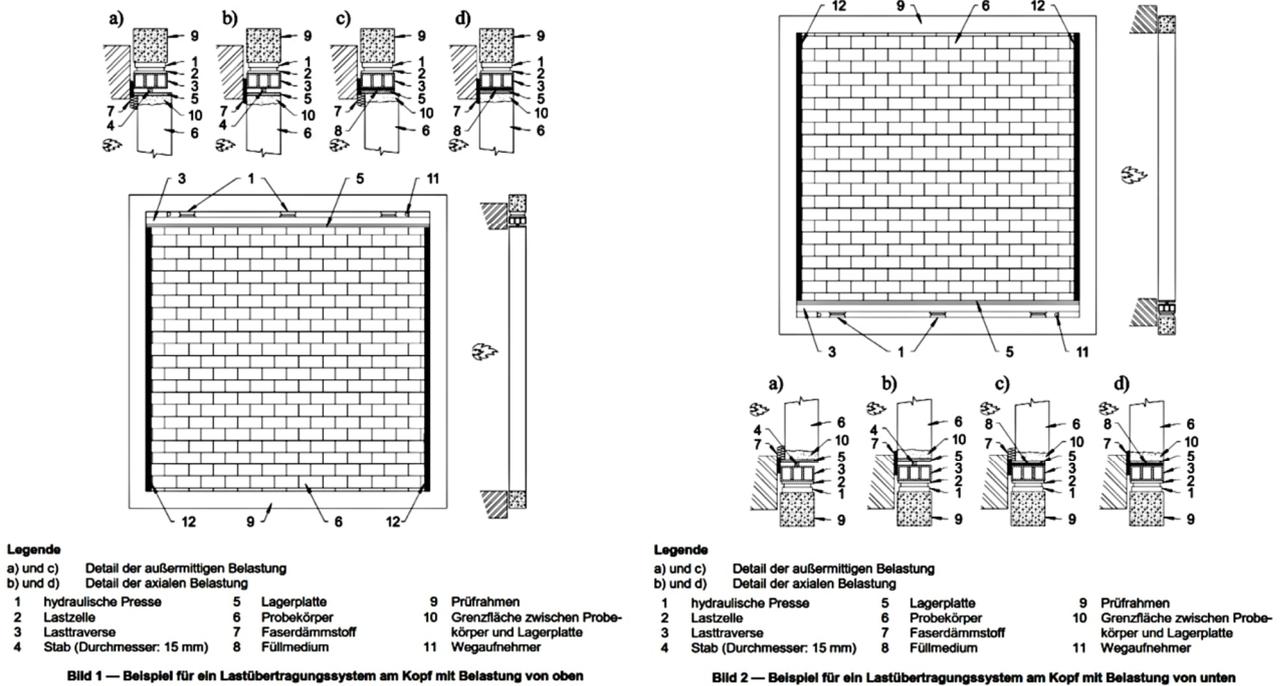


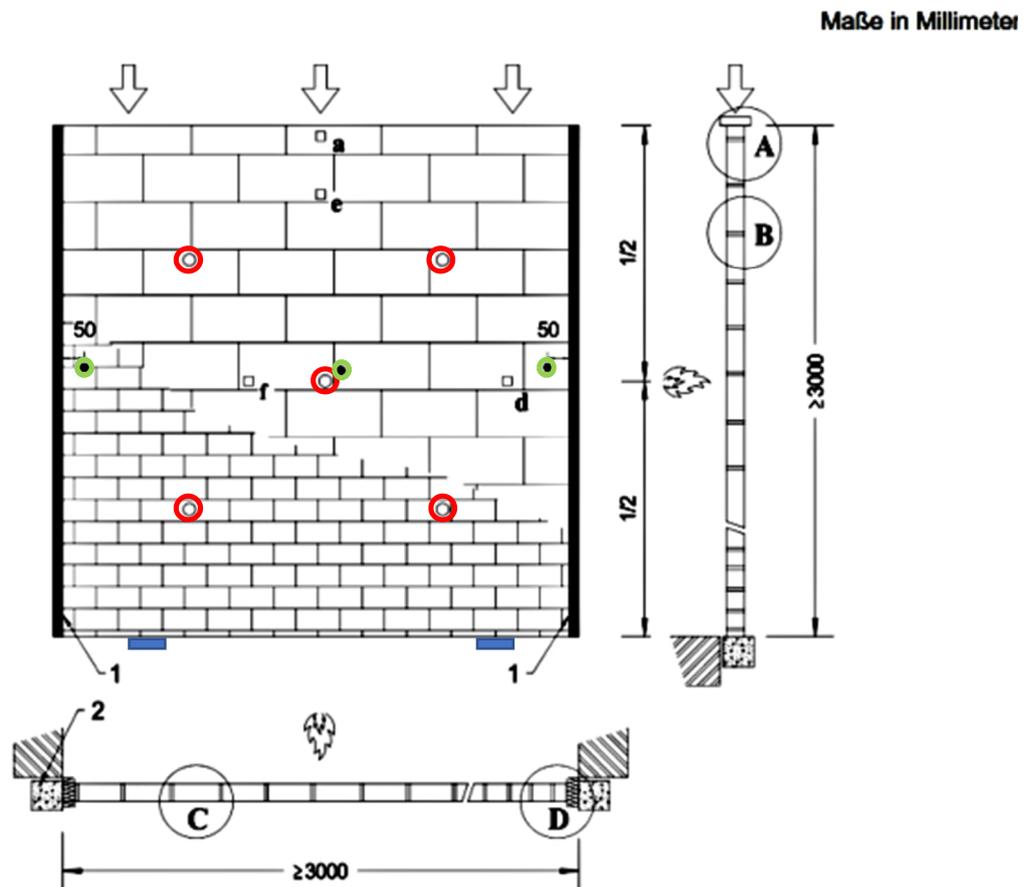
Bild 17 Lastübertragungssystem am Kopf mit Belastung von oben (links) und unten (rechts) nach [15]

Während der Brandversuche wurden auf der beflamnten und der unbeflamnten Seite Thermolemente zur Bestimmung der mittleren Temperatur und den maximalen Temperaturanstieg während der Brandbeanspruchung nach DIN EN 1363-1, Abschnitt 4.5.1 vorgesehen. Zur Ermittlung der Oberflächentemperatur auf der brandabgewandten Seite wurden insgesamt 11 Oberflächenmessstellen appliziert. Ihre Lage ist in Bild 20 dargestellt.

Darüber hinaus wurden tiefenabhängige Temperaturmessungen zur Ermittlung der Temperaturverteilung über den Querschnitt mittels Messleitern durchgeführt. Entsprechend der Prüfkörpergeometrie wurden bei der Wand 1 (D = 22 cm) insgesamt 8 Thermolemente über den Querschnitt verteilt und bei der Wand 2 (D = 60 cm) entsprechend 11 Thermolemente (für Wand 2 Ausführung siehe Bild 19 und Lage gemäß Bild 18 „rote Kreise“).

Neben den Temperaturmessungen wurden ebenfalls Verformungsmessungen durchgeführt. Es wurde davon ausgegangen, dass es aufgrund der einseitigen Brandbeanspruchung zu Durchbiegungen kommt. Dies wurde u.U. durch die Wandhöhe noch begünstigt. Dadurch kann es zu zusätzlichen Exzentrizitäten kommen. Daher sind in der mittleren Wandhöhe Messungen der horizontalen Durchbiegung in Wandmitte und jeweils 50 mm vom Wandrahmen geplant worden (vgl. Bild 18 „grüne Kreise“). Darüber hinaus wurde auch die Stauchung der Wand gemessen (Bild 18 „blaue Streifen“).

Am Wandkopf wurde bei beiden Versuchen mittels Druckmessgerät die kontinuierliche Lasteinleitung während des Brandversuches überwacht.



Legende

- Lage der Thermoelemente für den mittleren Temperaturanstieg
- Lage der Thermoelemente für den maximalen Temperaturanstieg
 (die Buchstaben beziehen sich auf die in 9.1.2.3 mit Buchstaben bezeichneten Thermoelemente)
- Lage der Durchbiegungs-Messpunkte
- 1 freier Rand
- 2 Prüfraumen

Bild 18 Lage der Thermoelemente und Messfühler im Prüfszenario nach DIN EN 1365-1 [15] und in den durchgeführten beiden Brandversuchen („rote Kreise“ – Messleitern für Querschnittstemperatur, „grüne Kreise“ – Messpunkte Durchbiegung, „blaue Streifen“ – Messpunkte Stauchung)

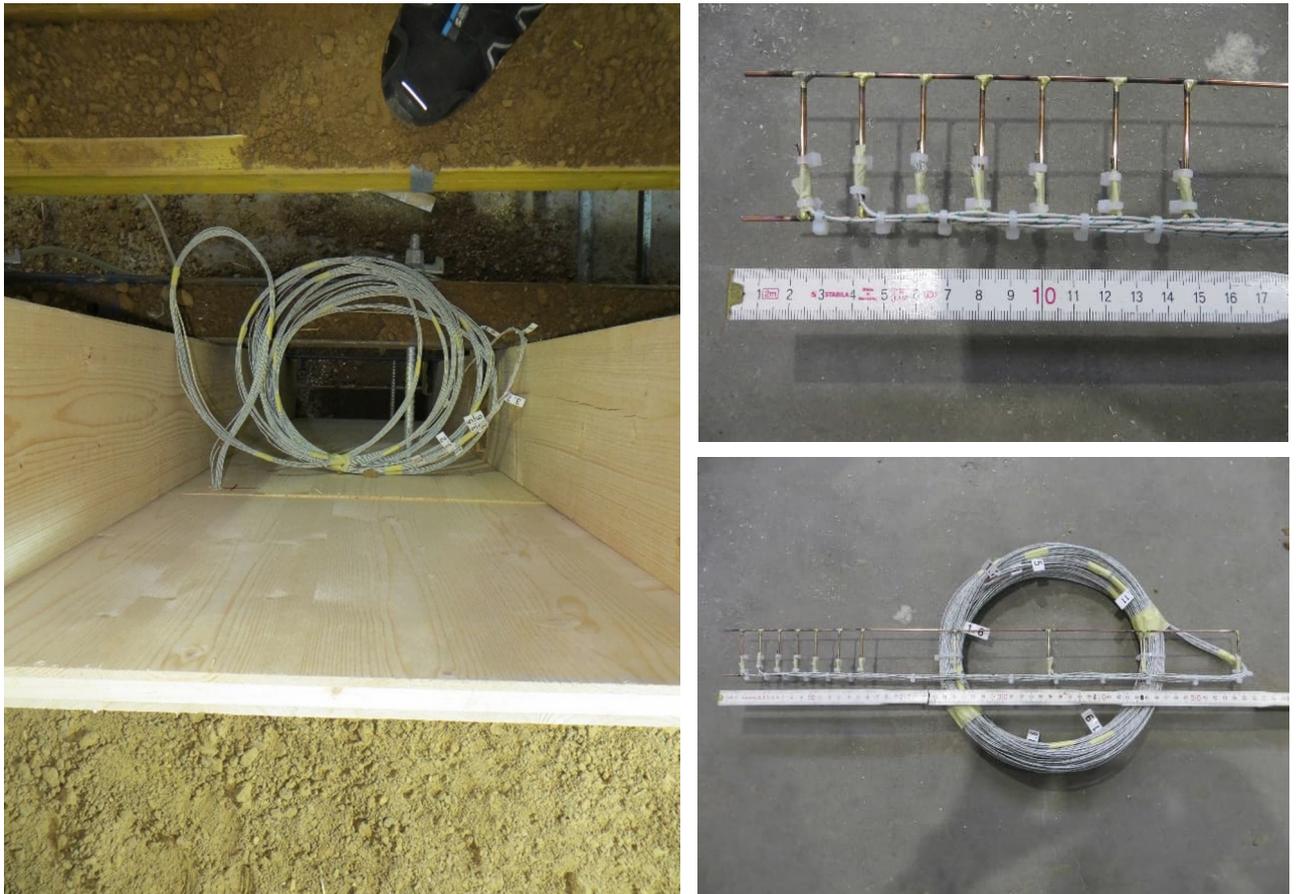


Bild 19 Eine von insgesamt 5 Messleitern zur Messung der Temperatur über den Wandquerschnitt, hier speziell für die 60 cm dicke Wand mit 11 Thermoelementen über den Wandquerschnitt

Die Prüfwände wurden bei beiden Versuchen gemäß Einheits-Temperaturzeitkurve beansprucht. Nach den ersten 10 min der Prüfung darf zu keinem Zeitpunkt die von einem Thermoelement im Ofen aufgezeichnete Temperatur von der entsprechenden Temperatur der Einheits-Temperaturzeitkurve um mehr als 100 K abweichen.

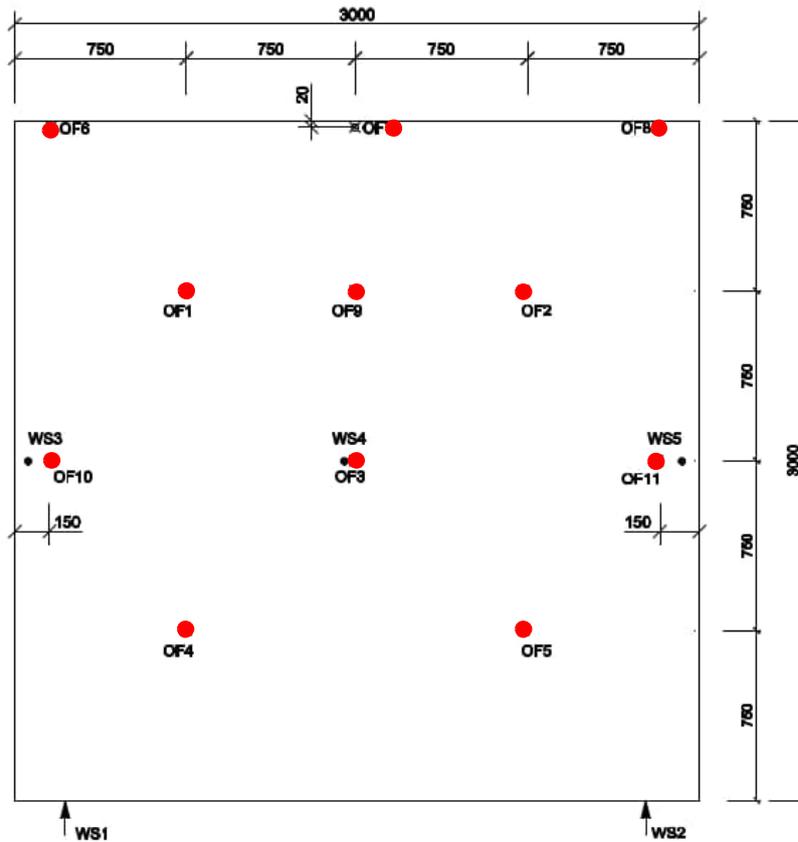


Bild 20 Identische Lage der Temperaturfühler zur Ermittlung der Oberflächentemperatur OF1 – OF11 („rote Punkte“) auf der brandabgewandten Seite bei beiden beflamten Stampflehmwänden in Laue

Für den vorliegenden Fall der Stampflehmwände des Ausstellungsgebäudes im Freilichtmuseum in Detmold wurden im Zuge dieser ZiE insgesamt zwei Brandversuche geplant. Da gegenwärtig in Deutschland kein 1:1-Brandversuch mit den realen Abmessungen der geplanten Wandhöhe von bis zu 8,20 m möglich ist, wurde bei der Versuchsplanung und -durchführung dahingehend orientiert, dass in einem 1. Brandversuch eine maßstabsgerechte Wand mit einem 3 m x 3 m - Versuchsrahmen mit entsprechend abgeminderter Belastung in der Brandkammer geprüft wird und in einem 2. Brandversuch der reale Wärme- und Temperaturdurchgang durch die geplante 60 cm dicke Wand aus Stampflehm bei einer Brandbeanspruchung gemäß Einheits-Temperaturkurve bestimmt werden soll.

Aufgrund der maximalen Höhe der Stampflehmwand im Bauwerk von $H = 8,22 \text{ m}$ (siehe Bild 6 rechts unten) sollte der 1. Brandversuch über die Schlankheit der Wand maßstabsgerecht verkleinert werden.

Schlankheit der Wand: $\lambda = h_k / d = 8,22 \text{ m} / 0,60 \text{ m} = 13,70$ mit $d = 60 \text{ cm}$ gemäß [7]

Dicke der Wand im Versuch: $d = h_k / \lambda = 3,00 \text{ m} / 13,70 = \underline{22 \text{ cm}}$

Somit ergab sich für den 1. Brandversuch (siehe Skizze in Bild 23):

- eine Wanddicke von $D = 22 \text{ cm}$,
- eine Wandbreite von $B = 3,00 \text{ m}$ und
- eine Wandhöhe von $H = 3,00 \text{ m}$.

Für den 2. Brandversuch ergab sich:

- eine Wanddicke von $D = 60 \text{ cm}$,
- eine Wandbreite/ -höhe von $B/ H = 3,00 \text{ m}/ 3,00 \text{ m}$.

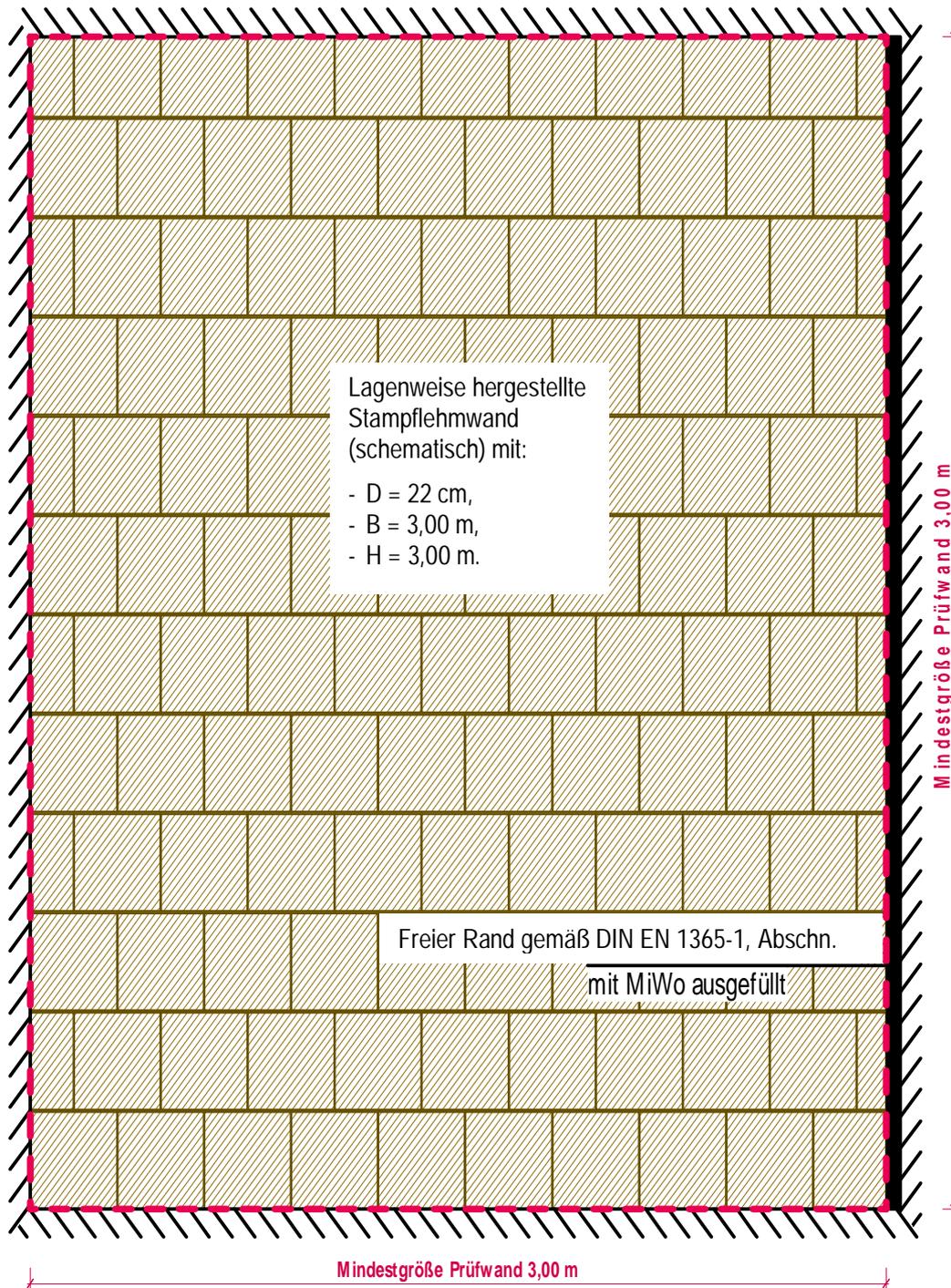


Bild 21 Versuchsaufbau 1. Brandversuch nach DIN EN 1365-1 in Laue (MFPA Leipzig) an einer tragenden Wand der Dicke 22 cm/ Höhe 3,00 m/ Breite 3,00 m aus Stampflehm mit einer Schlankheit $\lambda = 13,7$

4.1.2 Belastung der Versuchswände

Die Belastung sollte im Verhältnis der Wanddicke und -höhe zwischen Realität und maßstäblicher Verkleinerung (über die Schlankheit) ebenfalls verringert werden. Somit wären ca. 37% der tatsächlich abzutragenden Lasten aus Eigengewicht und Dachkonstruktion (Dachtragwerk und Dachdeckung) sowie äußeren Einwirkungen während des Brandversuchs als vertikale Belastung am Rahmenkopf einzuleiten.

Hinsichtlich der Festlegung der Belastung für die beiden durchzuführenden Brandversuche wurden die Bemessungsschnittgrößen für den Wandnachweis aus der Einwirkungskombination EWK 3 der „Fachtechnischen Stellungnahme“ vom Büro Kempfen Krause Beratende Ingenieure GmbH, Köln, vom Juli 2021 genommen [2].

Als maßgebende Belastung am Wandkopf ergeben sich nach [2]:

$N_{Ed} = 742,0 \text{ kN}$ bezogen auf eine Wandlänge von 6,40 m

$M_{y,Ed} = 103,3 \text{ kNm}$ (Moment aus außermittiger Lagerung des Dachtragwerkes und aus Deckenverdrehung)

$e_0 = M/N = 103,3 \text{ kNm} / 742,0 \text{ kN} = 0,14 \text{ m} = 14 \text{ cm}$ Ausmitte

Umrechnung auf charakteristischen Wert bezogen auf 1 m Länge:

$N_c = N_{Ed} / (l * 1,4) = 742 \text{ kN} / (6,40 \text{ m} * 1,4) = 82,8 \text{ kN/m}$

Gemäß E-Mail-Schriftverkehr zwischen dem Büro Kempfen Krause Beratende Ingenieure GmbH, Köln, und der Jäger Ingenieure GmbH vom 16.05.2022 und 23.05.2022 wurden die Vertikallasten noch einmal angepasst [25].

Als Summe der Vertikallasten aus ständigen Lasten, Nutzlast und Schnee ging daraus hervor:

$N_c = 88 \text{ kN/m}$

Zusätzlich zu den ständigen Lasten erhält die Lehmwand noch eine Vertikalkomponente aus der Scheibenwirkung der Wand (Einleitung von Windkräften im Bereich Wandkopf):

der Design-Wert beträgt: $H_d = 70 \text{ kN/m}$

charakteristischer Wert: $N_{1A} = (70 \text{ kN/m}) / 1,4 = 50 \text{ kN/m}$

daraus ergibt sich folgende Gesamtvertikalkomponente:

$N_{cges} = N_c + N_{A1} = 88 \text{ kN/m} + 50 \text{ kN/m} = 138 \text{ kN/m}$

Festlegung für den 1. Brandversuch ($D = 22 \text{ cm}$)

Die maßstabsgerechte Umrechnung auf den 1. Brandversuch mit der 22 cm dicken Stampflehmwand ergibt folgende Vertikalkomponente:

$N_{cges} = 138 \text{ kN/m} * 0,37 = 51,06 \text{ kN/m}$

Für die gesamte Rahmenlänge von 3 m: $N_{ges} = 51,06 \text{ kN/m} * 3 \text{ m} = 153,18 \text{ kN}$

Die genaue Herleitung der Versuchslast für den 1. Brandversuch mit der 22 cm dicken Stampflehmwand einschließlich der E-Mails nach [25] ist in Anlage 3 einzusehen.

In Absprache mit der Brandprüfstelle der MFPA Leipzig, Herrn Juknat und Herrn Dorn, Herrn Prof. Wigger (IfMB) und der Jäger Ingenieure GmbH wurde sich entschieden, den Brandversuch nach DIN EN 1365-1 [15] zentrisch belastet durchzuführen. Ein außermittiger Lasteintrag ist nach o.g. Norm nicht möglich. Begründung für die Entscheidung siehe Anlage 3.

Festlegung für den 2. Brandversuch (D = 60 cm)

$N_{\text{Ges}} = 138 \text{ kN/m}$

Für die gesamte Rahmenlänge von 3 m: $N_{\text{Ges}} = 138 \text{ kN/m} \cdot 3 \text{ m} = 414 \text{ kN}$

Aufgrund der sehr ungewöhnlichen Dicke der realen Stampflehmwand von $D = 60 \text{ cm}$ für eine Brandprüfung musste in der MFPA ein Sonderrahmen (Doppelrahmen; siehe Bild 23) für den 2. Brandversuch hergestellt werden. Die Lasteinleitung konnte jedoch nur über den inneren, dem Brandraum zugewandten Stahlrahmen erfolgen. Dadurch wurde versuchsbedingt eine Ausmitte der Lasteinleitung von 12 cm erzielt (siehe Bild 22). Diese Ausmitte entspricht in etwa der von Kempen Krause Beratende Ingenieure GmbH, Köln, angegebenen Ausmitte am Wandkopf von $e_0 = 14 \text{ cm}$.

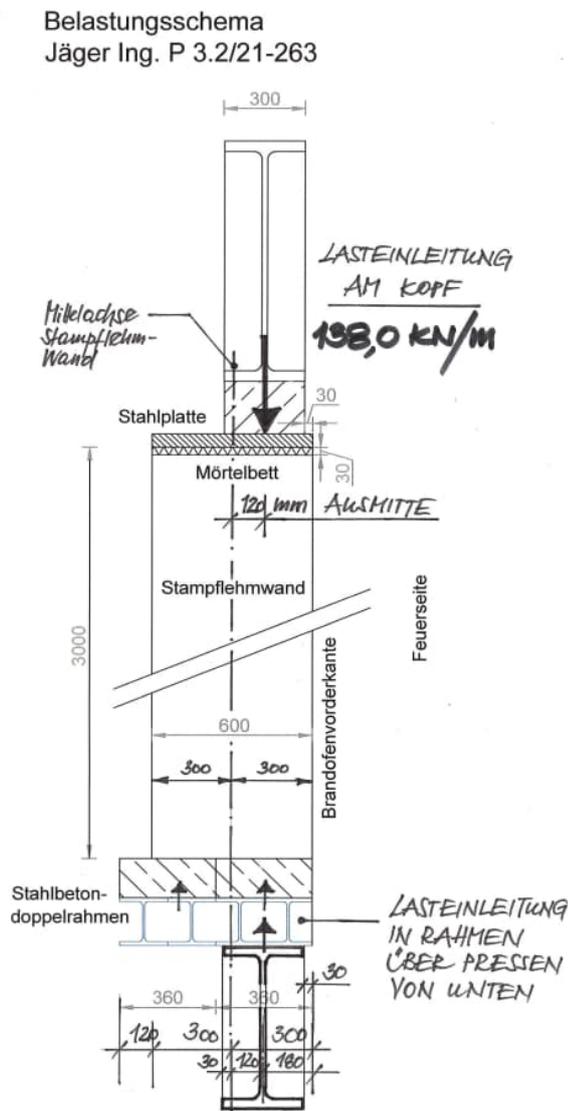


Bild 22 Belastungsschema des 2. Brandversuches mit der realen Wanddicke von $D = 60 \text{ cm}$ nach [27]

An diesem Prüfkörper sollte der reale Wärmedurchgang durch die 60 cm dicke Stampflehmwand gemessen werden. Mit beiden Versuchen sollten die geforderten Prüfkriterien hinsichtlich einer tragenden feuerhemmenden (F30) Innenwand erreicht und nachgewiesen werden.

4.1.3 Belastungsrahmen

Die nachfolgenden Bilder zeigen die in der Brandprüfstelle Laue bei Delitzsch (Außenstelle MFPA Leipzig GmbH) vorhandene Brandkammer mit Belastungs- und Tragrahmen. In den transportablen Tragrahmen wurden die Stampflehmwände vor Ort hergestellt. Im Rahmen ist die Wand anschließend zur Trocknung seitlich gelagert und kurz vor Brandprüfung mittels Portalkran zur Brandprüfkammer transportiert und an den Belastungsrahmen montiert worden.

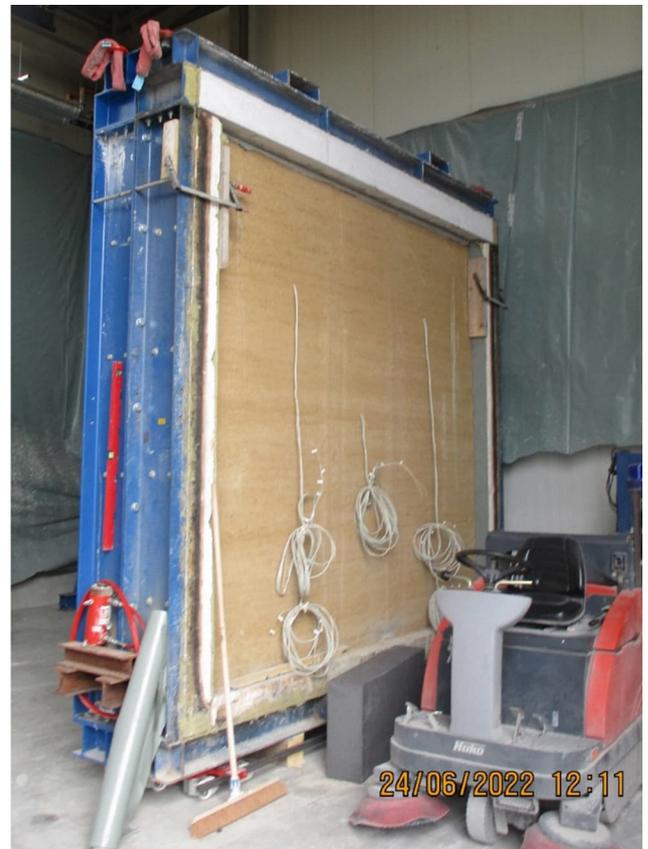


Bild 23 Belastungsrahmen MFPA Leipzig, Brandprüfstelle Laue, mit der Stampflehmwand $D = 22$ cm (links) und der noch nicht eingebaute Tragrahmen als Doppelrahmen für den 2. Brandversuch mit $D = 60$ cm mit (rechts)



Bild 24 Belastungsrahmen der Brandkammer für Prüfung tragender Wände nach DIN EN 1365-1 in der MFPA Leipzig, Brandprüfstelle Laue



Bild 25 Blick in die Brandkammer mit Vorrichtungen zur Befestigung der Thermoelemente für die Bestimmung der mittleren und maximalen Temperaturanstiege in der Brandkammer, MFPA Leipzig, Brandprüfstelle Laue

4.1.4 Herstellung der Prüfwände

Die beiden Stampflehmwände wurden direkt vor Ort in der Brandprüfhalle der Brandprüfstelle in Laue hergestellt. Zur Anwendung kam der in Big Bags angelieferte Stampflehm der Fa. Conluto, Blomberg. Vor Herstellung der Wände musste das Rohmaterial jedoch noch auf dem Hallenfußboden ausgebreitet und getrocknet werden, da er für den ordnungsgemäßen Einbau noch zu feucht war (siehe Bild 26).

Die beiden Stampflehmwände wurden nacheinander hergestellt, wobei aufgrund der Dicke und absehbar längeren Trocknungszeit zuerst die 600 mm dicke Wand hergestellt wurde.

Herstellungsdaten:	13.01.2022	Wand mit D = 600 mm
	19.01.2022	Wand mit D = 220 mm



Bild 26 Zum Trocknen ausgebreiteter Lehm in der Prüfhalle (links oben), Big Bag von Conluto mit Stampflehm der Korngröße 0 – 22 mm (Mitte oben), Bottich mit verarbeitungsfähigem Lehm (rechts oben), Metallstampffuß 8 cm x 8 cm mit deutlich anhaftendem, zu nassem Lehm (links unten) und lagenweises Verdichten der 10... 15 cm dicken „Lockerschichten“ mit dem pneumatischen Stampfer (rechts unten)

Gemäß DIN EN 1363-1: 2020-05 [14] erfolgte die Aufheizung des Brandraumes nach der Einheitstemperaturkurve (ETK). Zu keinem Zeitpunkt der Versuche wurde die Normtemperatur der Einheitstemperaturkurve unter- oder überschritten (siehe Bild 28).

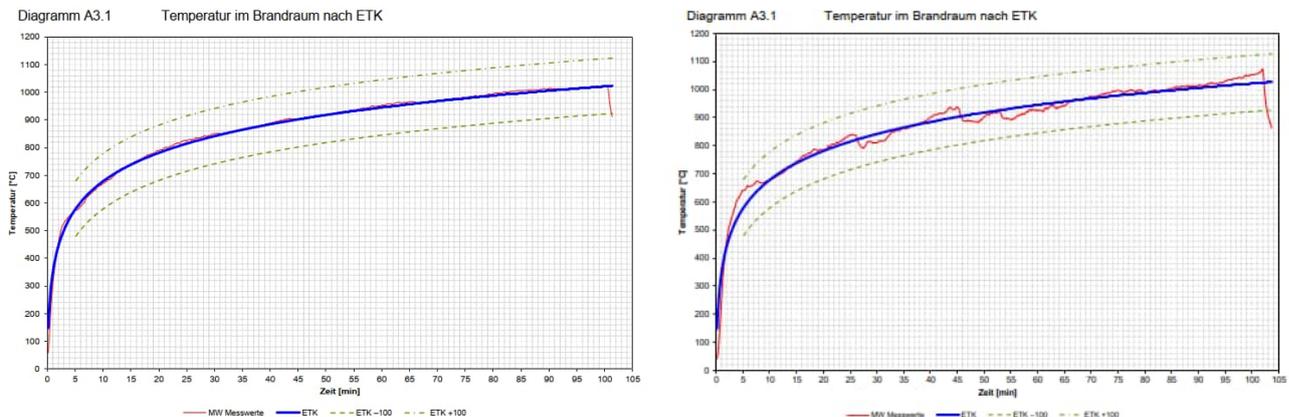


Bild 28 Temperatur im Brandraum nach ETK für die schmale Wand $D = 22$ cm (links) und die 60 cm dicke Wand (rechts)

An beiden Versuchswänden wurden die im Abschnitt 4.1.1 beschriebenen Wandtemperaturen (Ermittlung Temperaturverlauf über den Querschnitt) sowie die Innentemperatur im Brandraum als auch auf der Innen- und Außenoberfläche der Stampflehmwand kontinuierlich gemäß DIN EN 1363-1: 2020-05 gemessen.

Darüber hinaus wurde kontinuierlich der Druck im Brandraum gemäß DIN EN 1363-1: 2020-05 sowie die Verformungen der Wand in Wandmitte und an der unteren Traverse des Prüfkörpers ermittelt. Alle Brandraum- und Oberflächentemperaturen, die Verformungen der Wandkonstruktion sowie der Druck im Brandraum wurden im Zeitintervall von zehn Sekunden gemessen und registriert.

Beide Versuchswände wurden über die avisierte Zeit von 30 min, die für die Einstufung der Wand in feuerhemmend F30 erforderlich wären, hinaus geprüft. Die beiden Versuchswände wurden bis zur vollendeten 90. Minute einseitig mittels ETK brandbeansprucht und danach zusätzlich noch einmal nacheinander 3 Pendelschläge nach DIN EN 1363-2:1999-10 durchgeführt. Beim letzten Pendelschlag wurde die Last bis auf 5% der vor dem Versuch aufgebrachten und während des Versuchs kontinuierlich beibehaltenen Gesamtlast reduziert. Bei beiden geprüften Wänden wurden nach allen 3 Pendelschlägen keine sichtbaren Schädigungen oder Veränderungen aufgrund der Stoßbeanspruchung festgestellt.

Die jeweiligen Brandversuche wurden nach 100 min (Wand 220 mm) bzw. 102 min (Wand 600 mm) beendet. Unmittelbar danach wurden die Stampflehmwände zurückgebaut.

4.2 Ergebnisse der Versuche

Alle gemessenen Werte wurden in den beiden Prüfberichten nach [26] und [27] in übersichtlichen Diagrammen der Anlagen 3 und 4 dargestellt. Die während der Brandprüfungen getätigten Beobachtungen auf der Feuerseite und der brandabgewandten Seite wurden in Tabelle 3 der beiden Prüfberichte dokumentiert.

Die Ergebnisse der beiden Brandversuche sind in Tabelle 4 des jeweiligen Prüfberichtes zusammenfassend dargestellt.

Bei beiden Brandversuchen wurden das gleiche, im Wortlaut des jeweiligen Prüfberichtes nachfolgend genannte identische Prüfergebnis erreicht:

„Die geprüfte Stampflehmwandkonstruktion hat bei einseitiger Brandbeanspruchung die Anforderungen hinsichtlich der Tragfähigkeit, des Raumabschlusses und der Wärmedämmung gemäß DIN EN 13501-2:2016-12 für die Feuerwiderstandsklasse REI 90-M erfüllt. Voraussetzung für die Gültigkeit der vorgenannten Aussagen ist, dass die in diesem Prüfbericht angegebenen Randbedingungen eingehalten werden.“

5 Zusammenfassende Betrachtungen zu den beiden Versuchen

Aufgrund der geplanten Geometrie der tragenden Stampflehmwand im Ausstellungshaus des Freilichtmuseums Detmold mit einer Höhe $H = 7,65$ m sowie einer Dicke $D = 60$ cm und der Anforderung an den Feuerwiderstand F30 (feuerhemmend; gemäß vorliegendem Brandschutzkonzept jedoch nicht raumabschließend) wurden zwei Brandprüfungen an Stampflehmwänden geplant und durchgeführt.

Das war erforderlich, da gegenwärtig in Deutschland keine Brandprüfungen mit den o.g. Dimensionen in einer Brandkammer durchgeführt werden können.

Somit wurde eine Prüfwand maßstabsgerecht in Geometrie und Belastung über die Schlankheit der geplanten Wand verkleinert ($D = 22$ cm, $H/B = 3,00$ m/ 3,00 m) und eine zweite Prüfwand in der Originaldicke mit der realen Belastung ($D = 60$ cm, $H/B = 3,00$ m/ 3,00 m) nach DIN EN 1365-1 in Verbindung mit DIN EN 1363-1 in der Brandkammer geprüft.

Bei der dünnen Stampflehmwand mit einer Dicke von 22 cm lief der Brandversuch nach Auffassung der Unterzeichnenden nach den allgemein bekannten Gesetzmäßigkeiten in der Natur ab. Die Wand ist relativ dünn mit einer relativ großen Schlankheit. In der Brandkammer herrschen schon nach 10 Minuten Temperaturen über 700 °C, die sich dann innerhalb weiterer 80...90 Minuten relativ gleichmäßig auf 1000 °C erhöhen. Wie in Diagramm A3.3 nach [26] ersichtlich ist, herrschen diese Temperaturen unmittelbar vor der gesamten Wandinnenoberfläche relativ gleichmäßig vor (gemessen durch Ofenthermoelemente OT1 bis OT8). Bis etwa 45 Minuten nach Beginn des Brandversuches erhöht sich die Temperatur auf der Außenoberfläche der Lehmwand überhaupt nicht. Sie bleibt relativ konstant etwa $28...29$ °C bzw. bei $\Delta T = 0$ K. Danach steigt sie bis zur 100. Minute auf eine Temperatur von etwa 70 °C an (Temperaturdifferenz von 42K; siehe Diagramm A4.1 nach [26]). Wenn nach 90 min die Ofentemperatur bei etwa 1000 °C liegt, beträgt die mittlere Temperatur der Stampflehmwand in einer Tiefe von 2 cm auf der Brandseite (siehe X.1 an der jeweiligen Messleiter 1 bis 5) etwa 650 °C, in einer Tiefe von 6 cm (siehe X.3) nur noch etwa der Hälfte und beträgt ca. $320...325$ °C, in etwa der Querschnittsmitte bei 10 cm (siehe X.5) nur noch 150 °C und in einer Tiefe von 2 cm auf der brandabgewandten Seite nur noch etwa $80...90$ °C. (vgl. hierzu Bild 29)

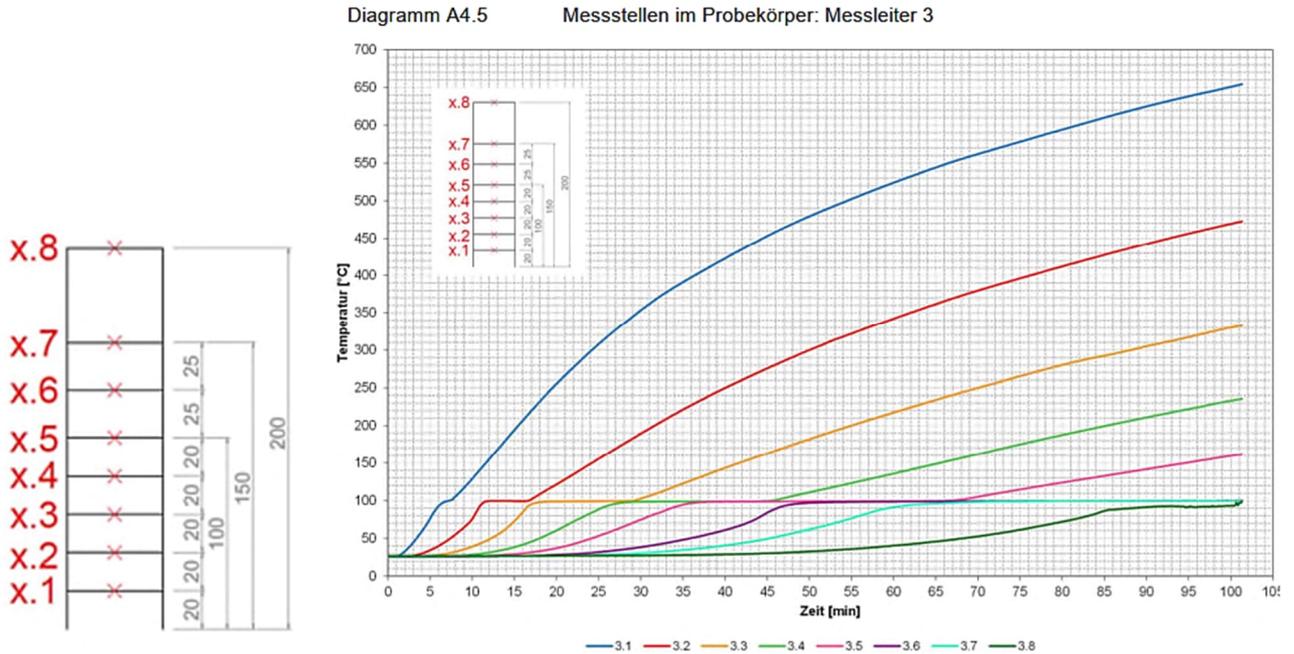


Bild 29 Prinzipskizze Messleiter für die 220er Stampflehmwand (links) und Temperaturdurchgang durch die Stampflehmwand in der Mitte der Wand (Messleiter 3, rechtes Diagramm) nach [26]

Aufgrund der nur sehr dünnen Wanddicke und der hohen Temperatur auf der Brandseite verformt sich die Stampflehmwand in Feldmitte 40 mm (WS4) und an den beiden Wandenden links und rechts 6 mm (WS3) bzw. 9 mm (WS5) in Richtung Brandraum (vgl. Abbildung A2.2 und Diagramm A3.6 nach [26] bzw. Bild 30). Das ist logisch, weil sich die warme Seite ausdehnt und die größte Verformung in der Mitte auftritt. Ebenfalls erscheint es logisch, dass sich in unmittelbarer Randnähe links und rechts am Stahlrahmen auch Verformungen in Richtung Brandraum einstellen können, da die Wand hier als frei beweglich bzw. gelenkig gelagert angesehen werden kann (Fuge mit Mineralwolle ausgestopft). An der Ober- und Unterseite ist sie durch die Lasteinleitung gehalten.

Die Wand an sich wird infolge der Brandeinwirkung auf der Innenseite zweiachsig biegebeansprucht - Plattenbiegung. Dabei ist es so, dass die Verformungsmöglichkeit in vertikaler Richtung durch den Rahmen und die Lasteinleitung sehr stark begrenzt wird, in horizontaler Richtung durch die mineralische Fuge jedoch eine Dehnung möglich ist. Durch die mögliche horizontale Dehnung kann sich die Wand an den beiden vertikalen Rahmenseiten u.U. ein wenig einspannen. Dadurch wird ein Gegendruck durch das Widerlager (vertikaler Rahmenstil) erzeugt und im Weiteren kann es dann zu einer Verdrehung der Wand am Auflager kommen. In horizontaler Richtung können sich die auftretenden Spannungen aus der hohen Temperaturbeanspruchung durch die vertikal entstehenden Risse relativ gut entladen. Das Rissbild mit den beiden Vertikalrissen in den Drittelpunkten spiegelt das auch sehr gut wieder. Darüber hinaus kann es auch in den Eckbereichen des Rahmens durch die beschriebenen Randbedingungen zu gewissen Einspannungen in den Wandecken kommen. Auch diese Diagonalrisse über die Ecken wären also mit der Analogie zur Plattenbiegung erklärbar. Die Diagonalrisse in den Ecken werden natürlich noch verstärkt durch die anschließenden 3 Pendelschlagversuche. Dies zeigen relativ anschaulich die gegenübergestellten Fotos der Prüfwand vor und nach dem Pendelschlagversuch (vgl. Bild 31). Im linken Wandbereich sind noch keine (bzw. nur Haarrisse, die auf dem Foto nicht zu erkennen sind) bzw. noch nicht so stark ausgebildete Diagonalrisse sichtbar (siehe rote Pfeile).

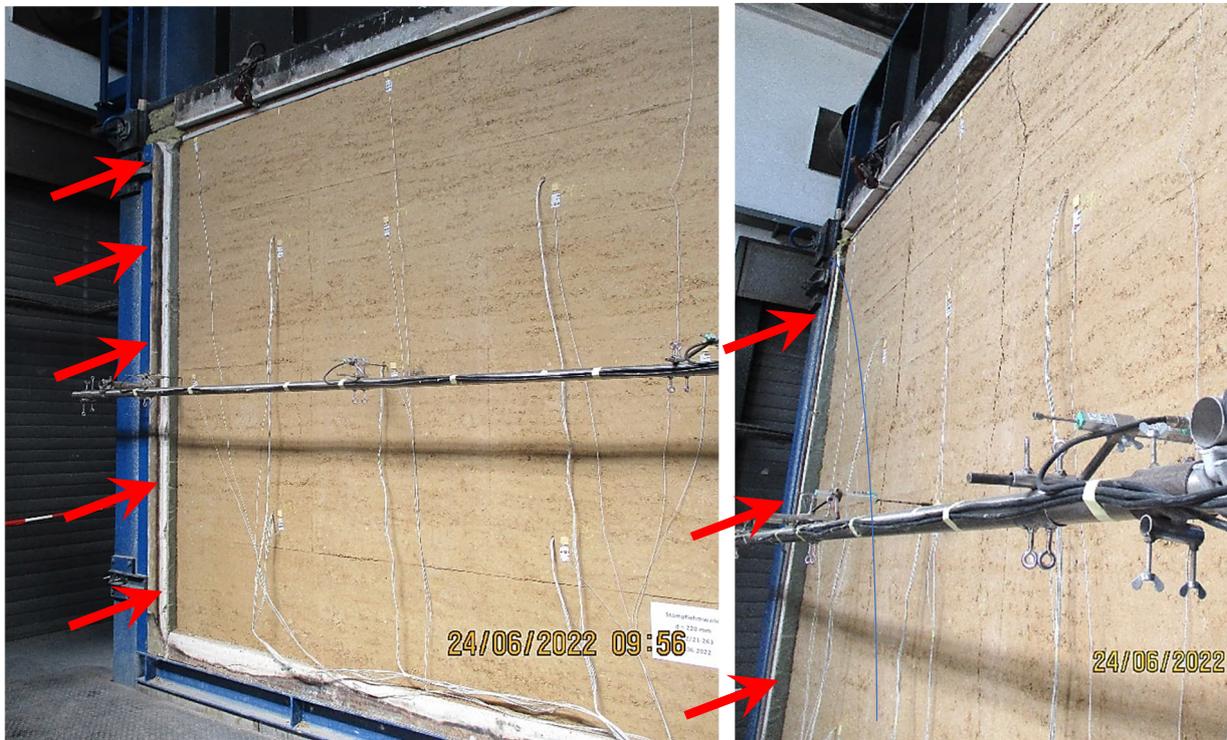


Bild 30 Gerader Einbauzustand der Stampflehmwand zu Beginn des Brandversuches (links) und klare Durchbiegung der Wand in Feldmitte in Richtung Brandkammer (rechts)



Bild 31 Rissbild der 22 cm dicken Stampflehmwand auf der Außenseite nach 90 Minuten Brandbeanspruchung und vor dem 1. Pendelschlag (links) und nach dem 3. Pendelschlagversuch (rechts)

Bei dem anschließenden 1:1 -Versuch, bei dem ein 60 cm dicker Wandausschnitt im 3,00 m x 3,00 m – Rahmen nach DIN EN 1365-1 in Verbindung mit DIN EN 1363-1 geprüft wurde, zeigte sich ein etwas anderer Verlauf während der Brandeinwirkung. Hier traten über den Wandquerschnitt extreme Temperaturdifferenzen auf. Im

Gegensatz zur 22 cm dicken Wand stieg die Temperatur auf der brandabgewandten Seite der Wand während des gesamten Brandversuches im Mittel um 1 K (max. Einzelwert 4 K nach 102 min) an, also fast gar nicht (vgl. Diagramme A4.1 und A4.2 nach [27]). Bei der Dicke der Wand ist das aber normal. Analog zur 22 cm dicken Wand konnte auch bei der 60 cm dicken Wand beobachtet werden, dass sich die wesentlichen Temperatursprünge in den äußeren 15...20 cm auf der brandzugewandten Wandseite abspielen.

Das lässt sich sehr gut an den Diagrammen A4.3 bis A4.7 nach [27] nachweisen. Das Thermoelement X.8 (dunkelgrüne Linie) liegt in einer Tiefe von 25 cm von der Brandseite entfernt und zeigt bei allen 5 Messleitern eine Temperatur von ca. 35...45 °C an. Die Thermoelemente X.9 bis X.11 (bilden die Temperatur in den äußeren 35 cm der brandabgewandten Seite der Brandwand ab) zeigen während des gesamten Versuches etwa 27 °C an (die Umgebungstemperatur betrug beim Versuch 26 °C und stieg um 2 K während des Versuches an).

Aufgrund der Massivität der Wand können sich die brandzugewandten oberflächennahen Bereiche nicht „frei“ bewegen/ ausdehnen, wie es beispielsweise bei der 22 cm dicken Wand war. Der zur brandabgewandten Seite liegende hintere Bereich der Wand bildet zusammen mit dem Stahlrahmen eine Einspannung. Mit zunehmender Branddauer und weiterer behinderter Verformungsmöglichkeit steigen die thermischen Spannungen im oberflächennahen Bereich weiter an. Die Zugkräfte senkrecht zur Wandoberfläche werden im äußeren Bereich immer größer (das Bestreben nach Ausbeulen in den Brandraum hinein wächst), bis die Kohäsion überschritten wird. Dieser Effekt trat in der 26. Minute ein. Im unteren Teil der Wand bricht eine Scholle Lehm (Dicke ca. 5 cm) im Bereich von Messleiter 5 aus der Wandoberfläche aus und kurz darauf rutscht in selber Dicke eine große Wandscholle nach und stellt sich vor die Prüfwand. In der Folgezeit bildet sich in etwa mittig der Scholle ein Vertikalriss (ca. 30. Minute), nach 46 Minuten bricht diese Scholle in sich zusammen. Die Auswirkungen an den 5 Messleitern sind unterschiedlich. Im Bereich der oberen beiden Messstellen 1 und 2 hat das Absprengen der flächigen Scholle nur relativ geringen Einfluss auf den Temperaturgang im Inneren der Wand, da die Scholle noch relativ eng auf der verbleibenden Wandoberfläche anliegt (vgl. Bild 32).

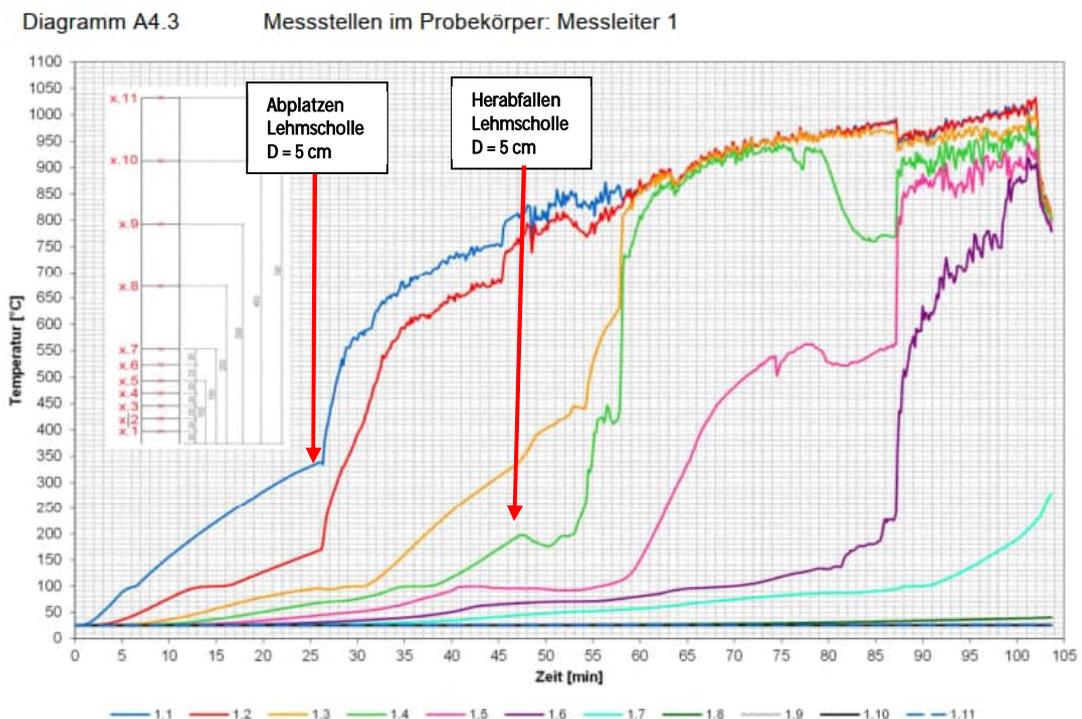


Bild 32 Temperaturdurchgang durch die Stampflehmwand im oberen Drittel – Messleiter 1
31.03.2023

Die Temperaturverläufe an den Messstellen 1.1 und 1.2 laufen relativ synchron der ETK ab. Anders als bei einer „normalen“ Temperaturverteilung über den Wandquerschnitt (siehe z.B. Bild 29) läuft Messstelle 1.2 (Tiefe 4 cm) jedoch auch mit entlang der ETK und nicht mit einer abgeminderten Temperatur von etwa 200...250 K darunter.

Nach dem Abfallen der Scholle (46. Minute) steigen dann die gemessenen Temperaturen der oberflächennahen Messfühler 1.4 und 1.5 gestaffelt im Abstand von etwa 10 min relativ stark an und gleichen sich allmählig der ETK an, weil sie dann natürlich im direkten oberflächennahen Bereich durch eine höhere Temperaturgradienten beansprucht werden.

Im unteren Drittel der Wand steht die Scholle mit etwas Abstand vor der Wand (Luftschicht zwischen Wand und Scholle), sodass sie wie ein Art Hitzeschild wirkt. Darüber hinaus begünstigen herabfallende kleinere Schollen auch diesen Effekt. Das ist sehr gut im nachfolgenden Diagramm zu sehen. Die Temperatur nimmt hier erst einmal ca. 200 K ab, bis dann nach etwa 46 min die Scholle zusammenbricht und die Temperaturen an den Messstellen 4.1 bis 4.3 (äußere 6 cm auf der Brandseite) sprunghaft ansteigen und sich der ETK annähern. Das passiert etwa 20 min später auch bei der Messstelle 4.4, die sich in 8 cm Tiefe befindet (siehe Bild 33).

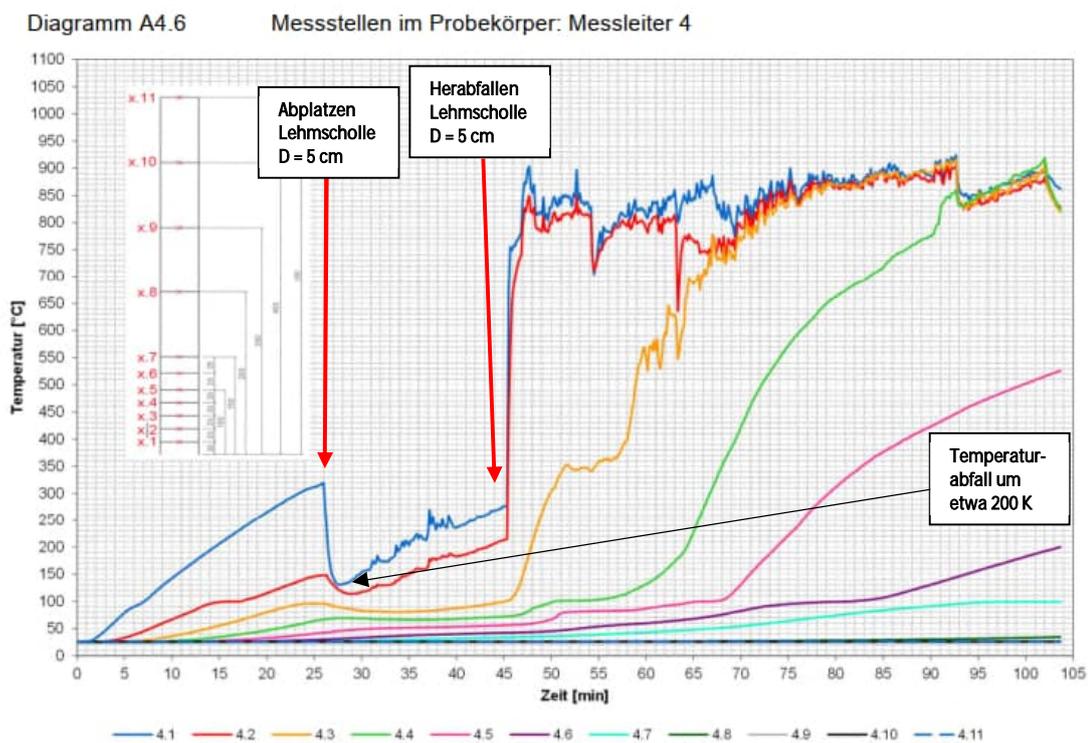


Bild 33 Temperaturdurchgang durch die Stampflehmwand im unteren Drittel – Messleiter 4

Im weiteren Verlauf des Brandversuches fallen von der brandzugewandten Oberfläche weitere kleinere Schollen ab, dies vorwiegend im mittleren und oberen Bereich der Wand. Das ist relativ gut an nachfolgendem Diagramm der Messstelle 3 (vgl. Bild 34) und auch schon an den oberen beiden Messreihen 1 und 2 beispielhaft in Bild 32 zu beobachten. Bis zur Messstelle X.6 (lila Linie, Tiefe 12,5 cm) steigen nach und nach im Versuchsablauf die Temperaturen auf etwa 800...1000 °C an. Im unteren Bereich der Wand (Messstellen 4 und 5) bleiben die Temperaturen der Messstelle X.6 (lila Linie) mit 200...250 °C weit darunter, was sich mit der

„Schutzschildwirkung“ der am Wandfuß liegenden und zuvor herabgefallenen Lehmschollen („Trümmerberg“) erklären lässt.

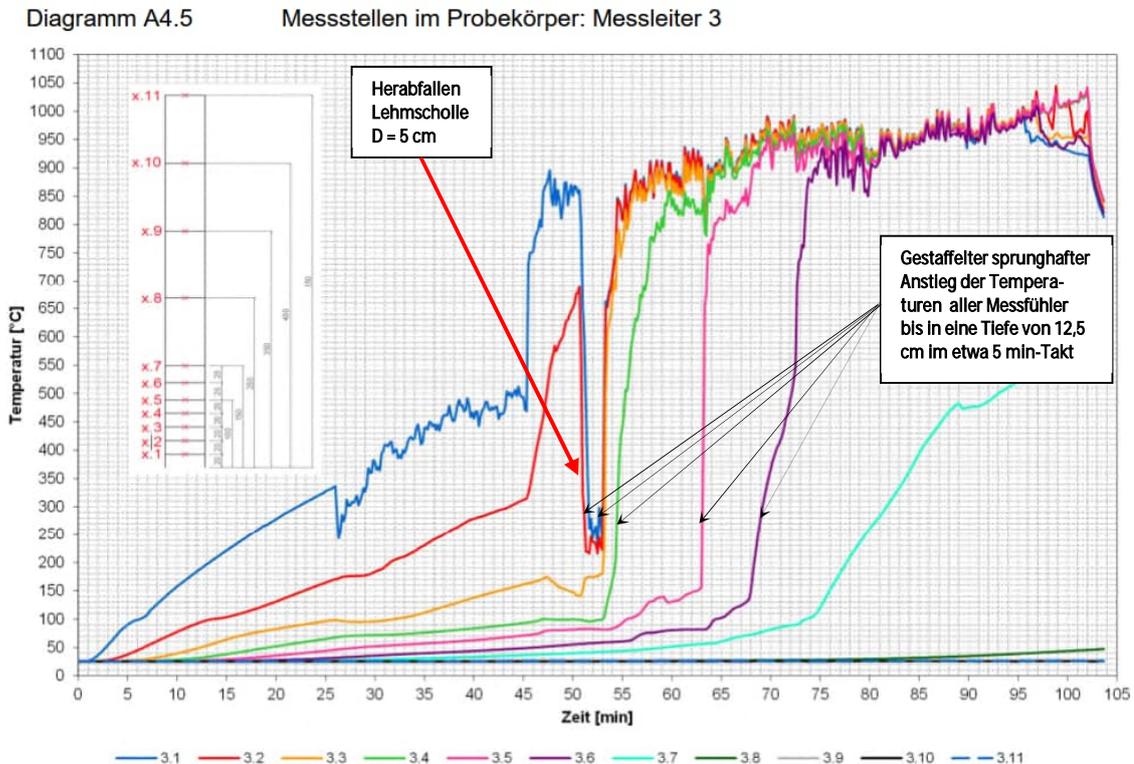


Bild 34 Temperaturdurchgang durch die Stampflehmwand im mittleren Bereich – Messleiter 3

Auch in diesem 2. Brandversuch hat die Stampflehmwand 90 Minuten der Brandeinwirkung standgehalten. Das Brandverhalten der Wand hat sich mit Ausnahme des Abplatzens der großen Scholle nach etwa 26 min im Großen und Ganzen an das von Beton angeglichen, wo auch schollenartig aus der Matrix im Verlauf des Brandversuches Partikel vom Wandquerschnitt abgesprengt werden.

Aufgrund des außergewöhnlichen und sehr seltenen Prüfkörpers (i.d.R. wird nur mit 300 mm dicken Rahmen/Wänden oder geringer geprüft und nicht mit 600 mm dicken Sonderkonstruktionen) sind bestimmte Diagramme nicht eindeutig erklärbar, z.B. die horizontale Verformung in halber Höhe der Wand (Diagramm A3.6 nach [27]). Die statischen Kenngrößen, wie Tragfähigkeitserhalt, Grenzwert der vertikalen Stauchung und Stauchungsgeschwindigkeit wurden allesamt auf der sicheren Seite eingehalten, genau wie bei der 22 cm dicken Wand. Sowohl der Druck im Brandraum als auch das Aufbringen der Belastung werden im Verlaufe des gesamten Versuches immer wieder händisch nachgeregelt. Der Druck im Ofen sollte 20 ± 3 Pa betragen, was ein relativ geringer Wert ist. Durch die immer wieder herabfallenden Schollen kommt es zu minimalen Druckänderungen in der Brandkammer und die anschließende händische Nachregulierung dann zu dem relativ unruhigen Verlauf im Diagramm A3.4, was jedoch nach Aussage der MFPA Leipzig völlig normal ist.

Da die Dicke der herabfallenden Schollen während und auch nach der Brandprüfung (zu hohe Hitze in der Brandkammer) nicht exakt prüfbar ist und nur geschätzt werden kann, soll sich nachfolgend aufgrund von Fotonachweisen diesem Problem noch einmal zugewandt werden. Die nachfolgenden beiden Bilder zeigen den Prüfkörper vor und nach der 100-minütigen Brandbeanspruchung. Zum Vergleich soll die linke obere Ecke des Versuchsrahmens bei Blickrichtung von der brandabgewandten Seite dienen (siehe rote Kreise in Bild 35).



Bild 35 Blick in die Brandkammer vor und nach dem Versuch mit speziellem Blick auf die mit Wärmedämmung ausgefüllte Vertikalfuge am linken Rahmenstiel



Bild 36 Blick auf die obere rechte Rahmenecke von innen her in Bezug auf die Dicke der Abplatzungen

Eine weitere Möglichkeit ergab der Blick in die obere rechte Ecke der Brandkammer (siehe rote Ellipsen in Bild 36). Zur Auswertung der Tiefe der Querschnittsschwächung wurde das Foto nach dem Brandversuch im Bereich der linken oberen Rahmenecke näher betrachtet.

Wenn man sich den Abbrand an der Wärmedämmung ansieht, dann kommt man auf eine maximale Abbrandtiefe von ca. 10 cm (vgl. Bild 37). Daraus kann man schlussfolgern, dass sich das Ausmaß des Abschollens von Lehmpartikeln auf der sicheren Seite bis in eine maximale Tiefe von 10...12,5 cm erstreckte. Das zeigen im Übrigen auch die Kurven der Temperaturmessungen über den Querschnitt (vgl. hierzu Diagramme A4.3 bis A4.7 nach [27]). Im Versuch betrug die Querschnittsschwächung somit ca. 17...20 %.

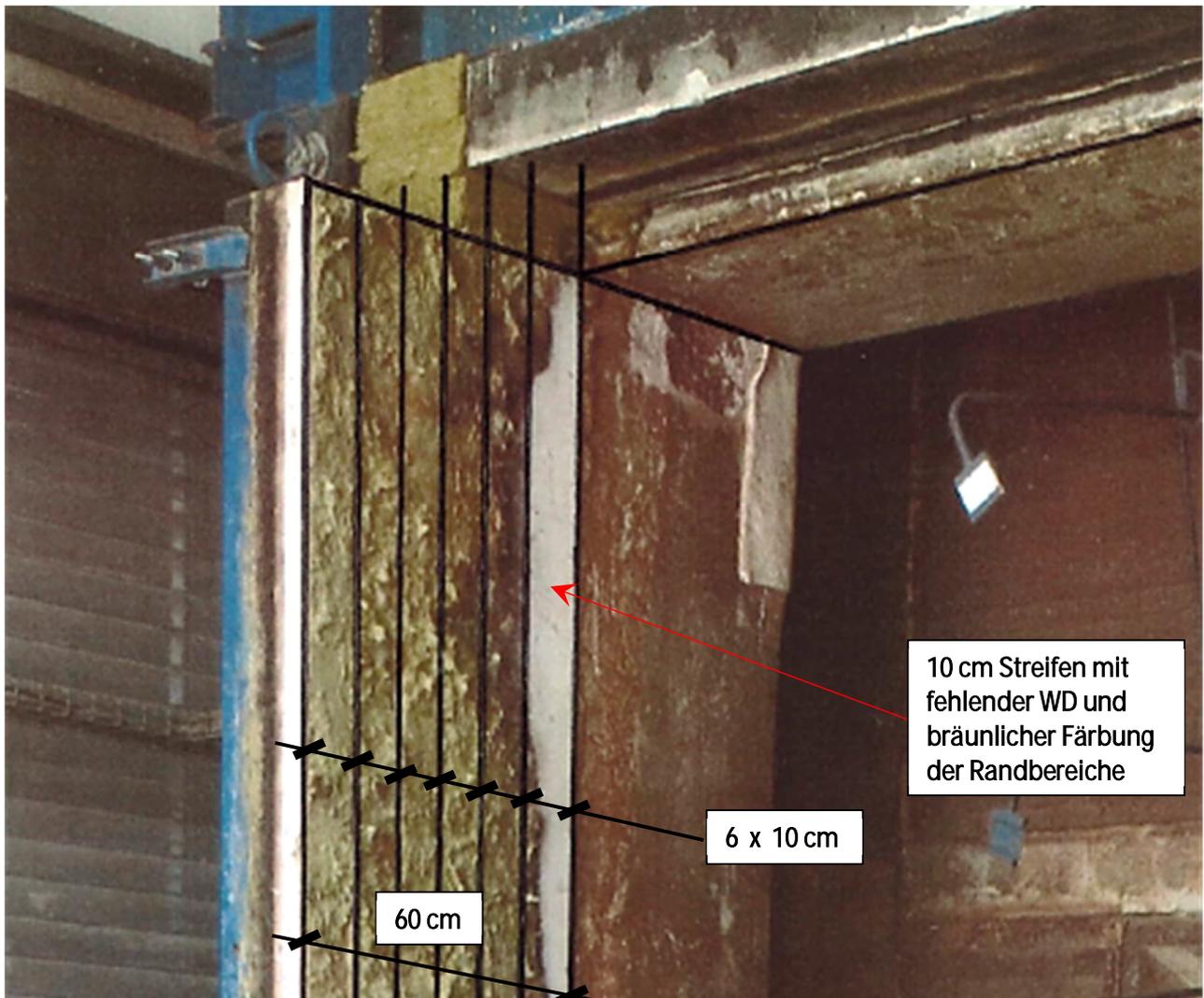


Bild 37 Abbrandtiefe bei der WD der 60 cm dicken Stampflehmwand zur Abschätzung des Restquerschnittes nach dem Abschollen auf der Brandseite der Wand

Bei der Übertragung auf die antragsgegenständliche Wand muss letztlich nur der Zeitpunkt nach 30 min betrachtet werden, und nicht nach 90 min. Auf der sicheren Seite kann man hier von einem Abschollen von 5 cm ausgehen, da sich nach 26 min die große Scholle über nahezu die gesamte Stampflehmfläche von 3,00 m x 3,00 m gelöst hat. Eine 5 cm dicke Querschnittsschwächung bezogen auf die 60 cm dicke Stampflehmwand ergibt dann eine prozentuale Schwächung von 8,3 %.

In nachfolgender Übersicht wurde die Tragfähigkeit der Wand entsprechend der Nachweisführung nach Rosenkranz [2], Seite 18, und mit den im Parallelprogramm des IFMB GmbH an der Jade Hochschule Oldenburg nach [24] ermittelten Festigkeiten für das Stampflehmmauerwerk für 100% Stampflehmwandquerschnitt sowie den o.g. 92 %-igem und 80%-igem Wandquerschnitt nach 30 Minuten und 90 Minuten Brandbeanspruchung überschläglich ermittelt. Hierbei wurde allerdings N_{Ed} nicht mit dem Reduktionsfaktor für den Bemessungswert der Einwirkungen im Brandfall $\eta_{fi} = 0,7$ (außergewöhnlicher LF) nach DIN 1996-1-2/NA:2013-06, Gl. (NA.4) abgemindert (sichere Seite!).

-18-



Nachweis des vertikalen Traglastwiderstands

$N_{Rd,i} = \Phi_{z,i} \cdot \Phi_{y,i} \cdot f_d \cdot t \cdot l$

f_d aktuell nach Versuchen am IfM *

					Wandquerschnitt 100%		Wandquerschnitt 92%		Wandquerschnitt 80%	
					N_{Rd}	η	N_{Rd}	η	N_{Rd}	η
Wandkopf:										
		ϕ_z	ϕ_y	t	l					
EWK 1:	$N_{Rd,o} = 0,647 \cdot 1,000 \cdot 0,91 \cdot 0,60 \cdot 6,40 \cdot 10^3$					2.261	0,15	2.080		1.809
EWK 2:	$N_{Rd,o} = 0,579 \cdot 1,00 \cdot 0,91 \cdot 3,840$					1.916	0,36	1.765		1.534
EWK 3:	$N_{Rd,o} = 0,536 \cdot 1,00 \cdot 0,91 \cdot 3,840$					1.873	0,40	1.723		1.484
Wandmitte:										
EWK 1:	$N_{Rd,m} = 0,746 \cdot 0,928 \cdot 0,91 \cdot 3,840$					2.426	0,25	2.232		1.941
EWK 2:	$N_{Rd,m} = 0,692 \cdot 0,953 \cdot 0,91 \cdot 3,840$					2.304	0,46	2.120		1.843
EWK 3:	$N_{Rd,m} = 0,684 \cdot 0,964 \cdot 0,91 \cdot 3,840$					2.304	0,48	2.120		1.843
Wandfuß:										
EWK 1:	$N_{Rd,u} = 0,900 \cdot 0,989 \cdot 0,91 \cdot 3,840$					2.827	0,30	2.601		2.262
EWK 2:	$N_{Rd,u} = 0,900 \cdot 0,930 \cdot 0,91 \cdot 3,840$					2.925	0,48	2.691		2.340
EWK 3:	$N_{Rd,u} = 0,900 \cdot 0,946 \cdot 0,91 \cdot 3,840$					2.975	0,49	2.737		2.380

Zusammenfassung Ausnutzung des vertikalen Traglastwiderstandes

		N_{Ed} [kN]	für F30 → 92%		für F90 → 80%	
			N_{Rd} [kN]	$\eta = N_{Ed} / N_{Rd}$ [-]	N_{Rd} [kN]	$\eta = N_{Ed} / N_{Rd}$ [-]
Wandkopf						
EWK 1		346	2.080	0,17	1.809	0,19
EWK 2		695	1.765	0,39	1.534	0,45
EWK 3		742	1.723	0,43	1.484	0,50
Wandmitte						
EWK 1		611	2.232	0,27	1.941	0,31
EWK 2		1052	2.120	0,50	1.843	0,57
EWK 3		1099	2.120	0,50	1.843	0,60
Wandfuß						
EWK 1		875	2.601	0,37	2.262	0,39
EWK 2		1409	2.691	0,52	2.340	0,60
EWK 3		1456	2.737	0,53	2.380	0,61

→ Nachweis erbracht!

* hier wurde der Design-Wert des Stampflehm-MW nach E DIN 18940:2012-10 "Tragender Lehmsteinmauerwerk-Konstr., Bemessung, Ausführung" Entwurf ermittelt nach Abschnitt 7.6.5

Bild 38 Nachweis des vertikalen Traglastwiderstandes mit aktuellen Werten in Anlehnung an [2]

Wie die Berechnungen zeigen, ist die Wand nach 30 Minuten und einer 8 %-igen Querschnittsschwächung nur zu maximal 53 % ausgelastet und nach 90-minütiger Brandbeanspruchung und 20 %-iger Querschnittsschwächung auch nur zu 61 %. Das bedeutet, dass hier, sollte der Fall des Vollbrandes im Ausstellungsbereich des Freilichtmuseums in Detmold im unmittelbaren Anschluss an die antragsgegenständliche Stampflehmwand eintreten, noch einige Reserven in der Stampflehmwand vorliegen.

Der Nachweis einer horizontalen Belastung gemäß DIN EN 1991-1-1/NA, Tab. 6.12 DE unter 1kN/ m ist durch den Pendelschlagversuch nach DIN EN 1363-2-1999-10 erbracht.

5.1 Fazit

Gegenstand der Zustimmung im Einzelfall

Eigenschaften die erreicht werden sollen:

- feuerhemmend F30 der Stampflehmwand,
- standsicher gegenüber den abzutragenden Lasten aus Eigengewicht und Dachkonstruktion (Dachtragwerk und Dachdeckung), äußeren Einwirkungen sowie horizontaler Belastung gemäß DIN EN 1991-1-1/NA, Tab. 6.12 DE [20] unter 1 kN/m in Höhe von 1,2 m

Eigenschaften für die es bisher keinen Ver- und/ oder Anwendbarkeitsnachweis gibt:

Abweichung der Lehmbauregeln

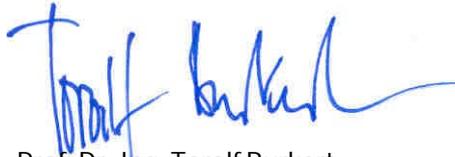
- *Die Lehmbauregeln gelten nur für Wohngebäude der Gebäudeklasse 1 und 2.*
- *Lehm hat laut Lehmbauregeln, welche sich auf die DIN 4102-4 (1994) [19] und DIN V 18954 (1956) [9] beziehen, folgendes Brandverhalten:
Massive Wände einer Dicke von 24 cm – F 90 A*
- *Dies muss jedoch laut „Liste der eingeführten Technischen Baubestimmungen“ NRW nach [8], Anlage 2.7/15 (vergl. Lehmbauregeln [6] S. 98) nachgewiesen werden.*

Vorschlag der Gutachter

Aus Sicht der Gutachter wurde durch die Ergebnisse der antragsgegenständlichen Versuche eindeutig nachgewiesen, dass die geplante Stampflehmwandkonstruktion mit einer Dicke von 60 cm und einer Höhe von 8,20 m (7,65 m) sowohl den geforderten Feuerwiderstand gemäß aktuellem Brandschutzkonzept als auch der Belastung aus Eigengewicht und Dachkonstruktion sowie äußeren Einwirkungen gegenüber standsicher ist. Es wird der Obersten Bauaufsicht in Düsseldorf, Referat 614, empfohlen, die Zustimmung im Einzelfall gemäß Antrag zu erteilen.

Radebeul, 31.03.2023


Prof. Dr.-Ing. Wolfram Jäger
Jäger Ingenieure GmbH, Radebeul


Prof. Dr.-Ing. Toralf Burkert
Jäger Ingenieure GmbH, Radebeul

6 Literatur

- [1] Gabriel, J., Lauterbach, S.: LWL – Freilichtmuseum Detmold, Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude, 32760 Detmold, Paderborner Straße. Brandschutzkonzept 19-2662B. Aufgestellt durch: Thormählen + Peuckert – Beratende Ingenieure PartG mbB, Büro Paderborn – Technologiepark 31, 33100 Paderborn. 92 Seiten, 6 Pläne, 15.12.2020
- [2] Seitz, H., Rosenkranz, O., Anders, J.: Fachtechnische Stellungnahme zur Begleitung einer Zustimmung im Einzelfall für die Ausführung von tragenden Lehmwänden beim Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude Freilichtmuseum, Detmold. Proj.-Nr. 2019-0437 Freilichtmuseum Detmold, Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude, 32760 Detmold, Paderborner Straße. Kempen Krause Beratende Ingenieure GmbH, Konrad-Adenauer-Ufer 41, 50668 Köln. 25 Seiten, 07.2021
- [3] Bauordnung NRW (BauO NRW), Aktuelle Fassung vom 21. Juli 2018
- [4] Verordnung über Bau und Betrieb von Sonderbauten – Teil 1: Versammlungsstätten. Aktueller Stand: 02.08.2019
- [5] Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen NRW (VV TB NRW) vom 30. Juni 2021.
- [6] Dachverband Lehm e.V.: Lehmbau Regeln, 3. überarbeitete Auflage, Vieweg + Teubner Wiesbaden 2009.
- [7] ACMS-Architekten Contor Müller Schlüter: Basisplan 0V. Plan-Nr. 65.60, Werkplanung, M: 1:5. Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude, Paderborner Straße, 32760 Detmold. 29.09.2021
- [8] Liste der Technischen Baubestimmungen. Anlage zum RdErl. d. MWEBWV vom 22.05.2012. Ministerialblatt für das Land Nordrhein-Westfalen – Nr. 17 vom 20. Juni 2012.
- [9] Vornorm DIN 18954:1956-06: Ausführung von Lehmbauten, Richtlinien. (nicht mehr gültig)
- [10] Schulz, Jens-Uwe: Überlegungen zum Standsicherheitsnachweis im Lehmbau. Gefunden auf: <http://www.moderner-lehmbau.com> › editorial › lr_d65, 07.10.2021
- [11] DIN 1053: Mauerwerk – Berechnung und Ausführung. Fachnormenausschuß Bauwesen im Deutschen Normenausschuß, Arbeitsgruppe Einheitliche technische Baubestimmungen ETB), Berlin, Dezember 1952.

-
- [12] Maybaum, G.: Materialkennwerte Stampflehm. Ermittelt im Rahmen des Forschungsvorhabens: „Optimierung der Herstellung und der Tragfähigkeit von Stampflehmwänden“. HAWK Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst. Hochschule Hildesheim, Holzminden, Göttingen. 2010
- [13] N.N.: Bestimmung Rohdichte und Druckfestigkeit. Prüfprotokolle Serien 01-21 bis 03-21 mit je 3 Lehmwürfeln mit Kantenlänge 200 mm nach 59 Tagen (15.07.2021), Prüfprotokolle 04-21 bis 07-21 mit je 3 Lehmwürfeln der Kantenlänge 200 mm nach 56 Tagen (07.09.2021). Im Auftrag von: Conluto – Vielfalt aus Lehm, Blomberg. Schomburg GmbH & Co. KG, Zentrale Anwendungstechnik, zert. Betonprüfstelle, Baustofflabor. Aquafinstr. 2-8, 32760 Detmold.
- [14] DIN EN 1363-1:2020-05: Feuerwiderstandsprüfungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen. NABau im DIN e.V., Berlin 2020.
- [15] DIN EN 1365-1:2013-08: Feuerwiderstandsprüfungen für tragende Bauteile – Teil 1: Wände. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN, Berlin 2013.
- [16] DIN EN 1996-1-1:2013-02: Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk. NABau im DIN, Berlin 2013.
- [17] DIN EN 1996-3:2010-12: Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 3: Vereinfachte Berechnungsmethoden für unbewehrte Mauerwerksbauten. NABau im DIN, Berlin 2010.
- [18] DIN EN 1996-3/NA:2012-01: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 3: Vereinfachte Berechnungsmethoden für unbewehrte Mauerwerksbauten. NABau im DIN, Berlin 2012.
- [19] DIN 4102-4:1994-03: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile. NABau im DIN e.V., Berlin 1994.
- [20] DIN EN 1991-1-1/NA:2010-12: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau. NABau im DIN, Berlin 2010.
- [21] Burkert, T.: BV: Freilichtmuseum Detmold, hier: Konzept zur Erlangung einer ZIE für tragende Stampflehmwände mit Brandschutzanforderungen. E-Mail an Herrn Schuchhardt vom Ministerium für Heimat, Kommunales, Bau und Gleichstellung des Landes NRW, Referat 614 „Bautechnik, Bauphysik“ vom 13.10.2021, 07:25.

-
- [22] Schuchardt, R.: WG: Freilichtmuseum Detmold, hier: Konzept zur Erlangung einer ZIE für tragende Stampflehmwände mit Brandschutzanforderungen. Antwort-E-Mail an Hrn. T. Burkert, Jäger Ingenieure GmbH, vom 29.10.2021, 13:26.
- [23] Wigger, H.; Relishkis, A.: Freilichtmuseum Detmold – Landesmuseum für Alltagskultur. Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude. Mechanische Eigenschaften des Stampflehms. Zwischenbericht Nr.: 0075/21 ME (IMS/AR/HW). Im Auftrag von: LWL – Bau- und Liegenschaftsbetrieb, Warenhofer Straße 24, 48145 Münster. Institut für Materialprüfung und Bauwerkserhaltung GmbH, Zeughausstraße 15, 26121 Oldenburg. 42 Seiten, Oldenburg, 08.02.2022.
- [24] Wigger, H.; Ince, M.: Freilichtmuseum Detmold – Landesmuseum für Alltagskultur. Neubau Eingangs- und Ausstellungsgebäude. Mechanische und physikalische Eigenschaften des Stampflehms. Abschlussbericht Nr.: 0075/21 (IMS/JB/HW). Im Auftrag von: LWL – Bau- und Liegenschaftsbetrieb, Warenhofer Straße 24, 48145 Münster. Institut für Materialprüfung und Bauwerkserhaltung GmbH, Zeughausstraße 15, 26121 Oldenburg. 39 Seiten, Oldenburg, 13.03.2023.
- [25] Anders, J.: FLM Detmold: Vertikallasten Lehmwände. 2 E-Mails an Hrn. Burkert, Jäger Ingenieure GmbH vom 23.05.2022, 12:49 und 16.05.2022, 16:12.
- [26] Juknat, M.; Dorn, E.: Prüfbericht Nr. PB 3.2/21-263-1: Feuerwiderstandsprüfung einer 220 mm dicken, tragenden, raumabschließenden und wärmedämmenden Stampflehmwandkonstruktion auf Brandverhalten bei einseitiger Brandbeanspruchung gemäß DIN EN 1363-1: 2020-05 in Verbindung DIN EN 1365-1: 2013-08 sowie Stoßbeanspruchung nach DIN EN 1363-2: 1999-10. Im Auftrag von: Landschaftsverband Westfalen-Lippe (LWL), LWL-Bau und Liegenschaftsbetrieb, Warendorfer Straße 24, D-48133 Münster. MFPA Leipzig GmbH, Geschäftsbereich III: Baulicher Brandschutz, Hans-Weigel-Straße 2B, 04319 Leipzig. 8 Seiten und 6 Anlagen, insgesamt 27 Seiten. Leipzig, 30.06.2022.
- [27] Juknat, M.; Dorn, E.: Prüfbericht Nr. PB 3.2/21-263-2: Feuerwiderstandsprüfung einer 600 mm dicken, tragenden, raumabschließenden und wärmedämmenden Stampflehmwandkonstruktion auf Brandverhalten bei einseitiger Brandbeanspruchung gemäß DIN EN 1363-1: 2020-05 in Verbindung DIN EN 1365-1: 2013-08 sowie Stoßbeanspruchung nach DIN EN 1363-2: 1999-10. Im Auftrag von: Landschaftsverband Westfalen-Lippe (LWL), LWL-Bau und Liegenschaftsbetrieb, Warendorfer Straße 24, D-48133 Münster. MFPA Leipzig GmbH, Geschäftsbereich III: Baulicher Brandschutz, Hans-Weigel-Straße 2B, 04319 Leipzig. 9 Seiten und 6 Anlagen, insgesamt 29 Seiten. Leipzig, 29.08.2022.

7 Anlagen

7.1 Aktuelle Planunterlagen zum Eingangs- und Ausstellungsgebäude, ACMS Architekten GmbH

siehe gesonderte Anlage/ Ordner

7.2 Fachtechnische Stellungnahme zur Ausführung von tragenden Stampflehmwänden beim Neubau des Eingangs- und Ausstellungsgebäudes von Kempen Krause Beratende Ingenieure GmbH, 07.2021

25 Seiten

7.3 Herleitung Belastung für Brandversuch Lehmwand $D = 22 \text{ cm}$, Jäger Ingenieure GmbH

9 Seiten