

Nachhaltig und zuverlässig Bauen mit Lehm

Entwicklung eines semiprobabilistischen Sicherheitskonzepts für feuchtebeeinflusstes Lehm-mauerwerk

BBSR-
Online-Publikation
25/2024

von
Dr.-Ing. Maximilian Brinkmann



Nachhaltig und zuverlässig Bauen mit Lehm

Entwicklung eines semiprobabilistischen Sicherheitskonzepts für
feuchtebeeinflusstes Lehmmauerwerk

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

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

Aktenzeichen: 10.08.18.7-21.44

Projektlaufzeit: 07.2021 bis 10.2023

IMPRESSUM

Herausgeber

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

Fachbetreuer

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
Dr. Jan Weckendorf
jan.weckendorf@bbr.bund.de

Autor

BBF | Beck Brinkmann Förster Beratende Ingenieure PartG mbB
Dr.-Ing. Maximilian Brinkmann (Projektleitung)
brinkmann@bbf-ing.de
www.bbf-ing.de

Redaktion

BBF | Beck Brinkmann Förster Beratende Ingenieure PartG mbB

Stand

Februar 2024

Gestaltung

BBF | Beck Brinkmann Förster Beratende Ingenieure PartG mbB

Bildnachweis

Dr.-Ing. Maximilian Brinkmann: Titelbild, S. 17, S. 25

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

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

Zitierweise

Brinkmann, Maximilian, 2024: Nachhaltig und zuverlässig bauen mit Lehm: Entwicklung eines semiprobabilistischen Sicherheitskonzepts für feuchtebeeinflusstes Lehmmauerwerk. BBSR-Online-Publikation 25/2024, Bonn.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	6
Abstract	8
1 Einführung	10
1.1 Motivation	10
1.2 Stand der Forschung	12
1.3 Zielstellung	14
1.4 Vorgehensweise	15
2 Experimentelle Untersuchungen zur Klimaabhängigkeit der Festigkeits- und Verformungseigenschaften	17
2.1 Einführung	17
2.2 Lehmsteine	20
2.3 Lehmmauermörtel	23
2.4 Lehmmauerwerk	26
2.4.1 Einführung	26
2.4.2 Untersuchungen zum Einfluss der relativen Luftfeuchte	27
2.4.3 Untersuchungen zum Einfluss der Temperatur	29
2.5 Fazit	31
3 Tragfähigkeit druckbeanspruchten Lehmmauerwerks unter Feuchteinfluss	33
3.1 Einführung	33
3.2 Modellierung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung	33
3.3 Wirklichkeitsnahe Traglastberechnung unter Berücksichtigung des Feuchteinflusses	36
3.3.1 Einführung	36
3.3.2 Ausgangswert der Querschnitts- und Systemtragfähigkeit	36
3.3.3 Berücksichtigung des Feuchteinflusses auf die Wandtragfähigkeit	39
4 Hygrothermische Analysen praxisüblicher Wandaufbauten	42
4.1 Einführung	42
4.2 Allgemeine Simulationsrandbedingungen	42
4.3 Materialmodellierung	44
4.4 Klimarandbedingungen	46
4.5 Untersuchte Anwendungsfälle	47
4.6 Simulationsergebnisse	50
5 Zuverlässigkeitsanalyse	52
5.1 Vorgehensweise	52
5.2 Simulationsparameter	54
5.3 Modellierung der streuenden Simulationsparameter	56
5.3.1 Mechanische Materialparameter	56
5.3.2 Einwirkungen	57
5.3.3 Materialfeuchte	58
5.3.4 Modellunsicherheiten	60
5.4 Ergebnisse	61

6	Zusammenfassung und Fazit	64
7	Mitwirkende	66
8	Kurzbiographien	67
9	Literatur	69
10	Abbildungsverzeichnis	75
11	Tabellenverzeichnis	77
12	Anlagen	78
	Anlage 1 - Normierte Spannungs-Dehnungs-Beziehungen des Lehm-mauerwerks bei einer Temperatur von $\theta = 23\text{ °C}$	78
	Anlage 2 - Gutachten zu den hygrothermischen Materialeigenschaften der untersuchten Lehm-baustoffe des Instituts für Bauklimatik der TU Dresden	79

Kurzfassung

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Nachhaltig und zuverlässig bauen mit Lehm - Entwicklung eines semiprobabilistischen Sicherheitskonzepts für feuchtebeeinflusstes Lehmmauerwerk“ wurde die Zuverlässigkeit druckbeanspruchter Lehmmauerwerkswände unter expliziter Berücksichtigung des Einflusses der vorherrschenden Materialfeuchte sowie deren Streuung analysiert. Das übergeordnete Ziel war hierbei die Überprüfung der Tragwerkszuverlässigkeit von Lehmmauerwerk nach Umstellung des bisher geltenden globalen Sicherheitskonzepts auf ein semiprobabilistisches Nachweisverfahren. Im Rahmen der Nachweisführung muss dabei stets sichergestellt sein, dass die normativ zulässige Versagenswahrscheinlichkeit beim Einsatz tragender Lehmbauteile nicht überschritten und der zugehörige Zielzuverlässigkeitsindex gemäß DIN EN 1990/NA eingehalten wird.

Um die dafür erforderlichen zuverlässigkeitstheoretischen Untersuchungen durchführen zu können, wurde im Zuge des Projekts zunächst die Klimaabhängigkeit bemessungsrelevanter Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Lehmmauerwerk sowie seiner Einzelkomponenten unter Druckbeanspruchung experimentell analysiert. Innerhalb der durchgeführten Versuchsreihen wurden die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen sowie die daraus ableitbaren Materialeigenschaften der untersuchten Lehmbaustoffe nach Konditionierung in verschiedenen Umgebungsklimata ermittelt. Auf Basis der experimentellen Untersuchungsergebnisse sowie unter Einbezug einer umfangreichen Literaturdatenbank konnte eine lineare Abhängigkeit zwischen der Druckfestigkeit bzw. dem Elastizitätsmodul und der Materialfeuchte unstabilisierter Lehmbaustoffe hergeleitet werden.

Der hierdurch quantifizierbare Feuchteeinfluss auf die relevanten Festigkeits- und Verformungseigenschaften von unstabilisierten Lehmbaustoffen wurde im weiteren Verlauf des Projekts zur Entwicklung eines Traglastmodells verwendet, welches die Berechnung der Querschnitts- und Systemtragfähigkeit druckbeanspruchter Lehmmauerwerkswände unter Berücksichtigung beliebiger hygroskopischer Materialfeuchten erlaubt. Hierzu wurde zunächst ein Ansatz zur Modellierung der nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Beziehung von Lehmmauerwerk unter Einbezug einer über den Wandquerschnitt konstanten Materialfeuchteverteilung entwickelt. Die daraus resultierende Arbeitslinie bildete daraufhin die Grundlage zur Modifizierung eines mauerwerkstypischen Traglastmodells zur wirklichkeitsnahen Berechnung der Querschnitts- und Systemtragfähigkeit druckbeanspruchter Wände. Mit Hilfe des angepassten Berechnungsansatzes ist es möglich, die Tragfähigkeit druckbeanspruchter Lehmmauerwerkswänden unter Einbezug des materialspezifischen Festigkeits- und Verformungsverhaltens sowie unter Berücksichtigung verschiedener Materialfeuchten analytisch zu ermitteln.

Anschließend wurden hygrothermische Analysen von Lehmmauerwerkswänden für verschiedene Anwendungsfälle mit unterschiedlicher Feuchteexposition durchgeführt. Hierzu wurde zunächst ein hygrothermisches Materialmodell für unstabilisiertes Lehmmauerwerk kalibriert und mit Hilfe von Literaturdaten validiert. Im Zuge der Simulationen wurden verschiedene Wandaufbauten unter variierenden Randbedingungen betrachtet. Die ermittelten Materialfeuchten innerhalb des Lehmmauerwerks sowie deren Schwankungen über den Jahresverlauf wurden im Rahmen der darauf

aufbauenden Zuverlässigkeitsanalyse als Grundlage zur Kalibrierung einer geeigneten Verteilungsfunktion für den Feuchtegehalt innerhalb von Lehmmauerwerkswänden verwendet.

Basierend auf den durchgeführten Voruntersuchungen wurde die Versagenswahrscheinlichkeit sowie der daraus resultierende Zuverlässigkeitsindex von tragenden Lehmmauerwerkswänden mittels probabilistischer Methoden bestimmt. Die Zuverlässigkeitsanalysen erlaubten Rückschlüsse auf die Versagenswahrscheinlichkeit tragender Lehmmauerwerkswände, welche nach den normativen Regeln der DIN 18940 auf Grundlage eines semiprobabilistischen Sicherheitskonzepts bemessen wurden. Es wurde dabei sowohl der Einfluss variierender geometrischer Randbedingungen wie beispielsweise unterschiedliche Wandschlankheiten oder Deckenspannweiten sowie der Einfluss verschiedener Feuchteexpositionen untersucht.

Die Ergebnisauswertung zeigte, dass das semiprobabilistische Nachweisverfahren gemäß DIN 18940 eine zuverlässige Bemessung von tragendem Lehmmauerwerk ermöglicht. Im Fall von Außenwänden aus Lehmmauerwerk ist zur Einhaltung der geforderten Tragwerkszuverlässigkeit jedoch insbesondere in Gebieten mit erhöhter Schlagregenbeanspruchung auf einen ausreichenden Schlagregenschutz zu achten. Weiterhin zeigen die Forschungsergebnisse, dass die semiprobabilistische Bemessung druckbeanspruchter Lehmmauerwerkswände unter Ansatz des mauerwerkstypischen, materialeitigen Teilsicherheitsbeiwerts in Höhe von $\gamma_M = 1,5$ für die untersuchten Anwendungsfälle zu einer hinreichenden Zuverlässigkeit von tragenden Lehmmauerwerkswänden führt.

Die Erkenntnisse dieses Forschungsvorhabens flossen während der Projektlaufzeit kontinuierlich in die Erarbeitung der Konstruktions-, Bemessungs- und Ausführungsnorm DIN 18940 sowie die Überarbeitung der Produktnormen für Lehmsteine DIN 18945 und Lehmmauermörtel DIN 18946 ein und leisteten somit einen entscheidenden Beitrag zur Weiterentwicklung der normativen Regelung von tragenden Lehmbaustoffen innerhalb Deutschlands.

Abstract

In the context of the research project "Sustainable and Reliable Construction with Earth - Development of a Semi-Probabilistic Safety Concept for Moisture-Affected Earth Masonry," the reliability of earth masonry walls under compressive stress was analyzed with explicit consideration of the influence of material moisture content and its variability. The overarching goal was to check the structural reliability after changing the existing global safety concept to a semi-probabilistic design method for earth masonry walls. During the design, it is essential to ensure that the normatively permissible failure probability for load-bearing earth components is not exceeded and that the associated target reliability index according to DIN EN 1990/NA is maintained.

To conduct reliability-theoretical investigations, experimental investigations of the climate-dependent design-relevant strength and deformation properties of earth masonry and its individual components under compression were carried out. Within the experiments, stress-strain relationships and the resulting material properties of the examined earth building materials were determined after conditioning the specimens in different environmental climates. Based on the results and an extensive literature database, a linear relationship between the mechanical properties and the material moisture of unstabilized earthen building materials was derived.

The influence of moisture content on the strength and deformation properties of unstabilized earthen building materials was subsequently used in the development of an analytical model to calculate the load-bearing capacity. This model allows for the determination of the cross-sectional and system load-bearing capacity of earth masonry walls under compression, considering various hygroscopic material moistures. Initially, an approach to model the nonlinear stress-strain relationship of earth masonry, considering a constant material moisture distribution across the cross-section of the wall, was developed. The resulting stress-strain-relationship served as the basis for modifying a typical masonry load-bearing capacity model. Using this adapted calculation approach, it is possible to determine the load-bearing capacity of earth masonry walls under compression, considering material-specific strength and deformation behavior and various material moisture contents.

Subsequently, hygrothermal analyses of earth masonry walls were conducted for different moisture exposure scenarios. An hygrothermal material model for unstabilized earth masonry was first calibrated and validated using literature data. Various wall constructions under varying boundary conditions were considered during the simulations. The determined material moisture contents within the earth masonry and their fluctuations over the course of a year formed the basis for calibrating a suitable distribution function for the moisture content of earth masonry walls within the subsequent reliability analysis.

Based on the preliminary investigations, the failure probability and resulting reliability index of load-bearing earth masonry walls were determined using probabilistic methods. The reliability analyses provided insights into the failure probability of load-bearing earth masonry walls designed according to the rules of DIN 18940. The influence of varying geometric boundary conditions, such as different wall slenderness or ceiling spans, as well as the influence of different moisture exposures, were examined.

The results of the project showed that DIN 18940 allows for a reliable design of load-bearing earth masonry under the condition, that adequate protection against driving rain, particularly for exterior walls in areas with high exposure, is ensured. Furthermore, the research results indicated that a semi-probabilistic design of earth masonry walls under

compression, assuming the masonry-specific partial safety factor of $\gamma_M = 1.5$, leads to sufficient reliability for load-bearing earth masonry walls under the examined boundary conditions.

The findings of this research project continuously affected the development of the construction, design and execution standard DIN 18940 and the revision of product standards for earth bricks DIN 18945 and earth mortar DIN 18946 during the project's duration, thus making a significant contribution to the advancement of normative regulations for load-bearing earth building materials in Germany.

1 Einführung

1.1 Motivation

Hinsichtlich des stetig voranschreitenden Klimawandels ist es dringend notwendig die globalen Treibhausgasemissionen zeitnah zu verringern. Da der Bau- und Gebäudesektor für 37 % der globalen CO₂-Emissionen sowie für 34 % des globalen Energiebedarfs verantwortlich ist [1], besteht in diesem Bereich erheblicher Handlungsbedarf. Der vermehrte Einsatz nachhaltiger Materialien für den Neu- und Umbau von Gebäuden kann dabei einen wichtigen Beitrag zur Reduktion der Treibhausgasemissionen und damit auch zum Erreichen der Klimaschutzziele der Bundesregierung [2] leisten.

Vor diesem Hintergrund bietet sich die vermehrte Verwendung des Naturbaustoffs Lehm auf Grund seiner ökologischen und bauphysikalischen Vorzüge für vielfältige Nutzungszwecke an. Die wesentlichen ökologischen Vorteile von modernen Lehmbaustoffen sind dabei auf den geringen Primärenergiebedarf bei der Produktion, die vollständige Wiederverwendbarkeit am Ende der Nutzungsdauer sowie die nahezu flächendeckende Verfügbarkeit zurückzuführen [3–5]. Darüber hinaus bieten Lehmbaustoffe diverse bauphysikalische Vorzüge wie beispielsweise eine hohe Wärmespeicherkapazität, die Fähigkeit zur effektiven Regulierung der Innenraumluftfeuchte sowie gute Schallschutzeigenschaften, was in Summe zu einem konstanten, gesunden und behaglichen Raumklima führt [5–7]. Neben diesen ökologischen und bauphysikalischen Aspekten ist die Nutzung von energieeffizient produzierten Lehmbaustoffen im Hinblick auf das steigende Baustoff- und Energiepreisniveau zudem unter ökonomischen Gesichtspunkten interessant [8].

Auf Grund der materialspezifischen Eigenschaften von Lehmbaustoffen könnte ein möglicher Einsatzbereich von Lehmstrukturen beispielsweise die Schaffung von nachhaltigen Wohngebäuden sein. Da innerhalb Deutschlands zur Zeit ein großer Wohnraumbedarf von ca. 220.000 bis 350.000 neuen Wohneinheiten pro Jahr besteht [9–12] und dieser umweltfreundlich und gleichzeitig kostengünstig gedeckt werden sollte, bietet sich hier die Verwendung von Lehm als Alternative zu herkömmlichen Baustoffen an. Tragendes Lehmsteinmauerwerk besitzt dabei besonderes Potential für eine verbreitete Nutzung, da es analog zu herkömmlichem Mauerwerk verarbeitet werden kann und somit eine unkomplizierte und niedrighwellige baupraktische Anwendbarkeit ermöglicht. Auf Grund der ökologischen und bauphysikalischen Vorzüge von Lehmmauerwerk kann dessen Einsatz neben der Schaffung von Wohnraum aber auch im Zuge von Neu- und Umbaumaßnahmen anderer geringgeschossiger Gebäude sinnvoll sein. Eine Anwendung wäre beispielsweise auch im Bereich von nachhaltigen Büro- und Verwaltungsgebäuden oder öffentlichen Gebäuden wie Schulen oder Kindergärten denkbar.

Für einen verbreiteten Einsatz tragenden Lehmmauerwerks muss jedoch sichergestellt sein, dass die damit errichteten Strukturen alle üblichen Anforderungen an moderne Tragwerke erfüllen. Hierbei sind neben den Aspekten der Gebrauchstauglichkeit und der Standsicherheit auch die Zuverlässigkeit des Tragwerks zu analysieren. Im Vordergrund steht dabei die Einhaltung der gesellschaftlich und politisch akzeptierten Versagenswahrscheinlichkeit von tragenden Bauteilen innerhalb von Gebäuden, welche

sich in normativ geregelten Zielzuverlässigkeiten widerspiegeln. Die Tragwerkszuverlässigkeit wird dabei im Allgemeinen von vielzähligen Randbedingungen sowie unterschiedlichsten Berechnungsparametern und deren Streuungen beeinflusst. Hierzu gehören beispielsweise die mechanischen Materialeigenschaften, die äußeren Einwirkungen, die zugrunde liegenden Berechnungsmodelle oder weitere systembedingte Einflussgrößen.

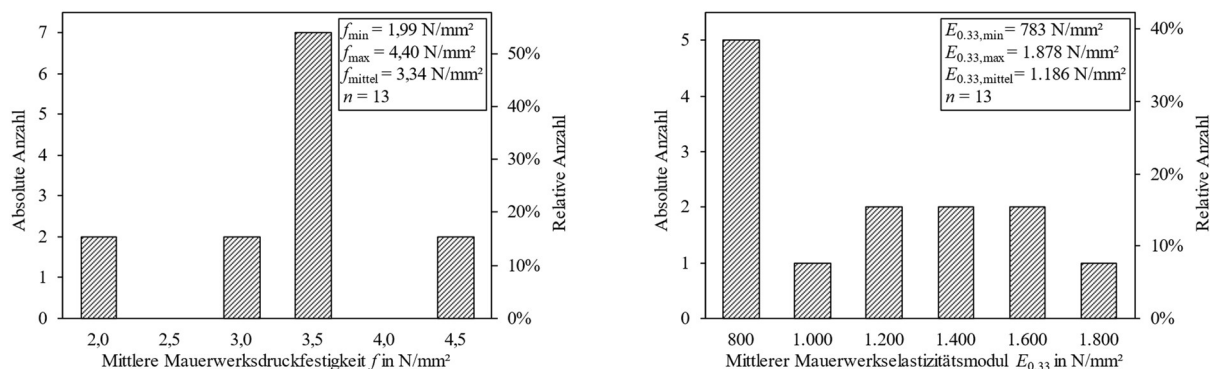
Innerhalb dieses Forschungsvorhabens steht die Zuverlässigkeit tragender Lehmmauerwerkswände unter Druckbeanspruchung im Fokus. Es wird untersucht, welche Parameter die Tragfähigkeit druckbeanspruchten Lehmmauerwerks maßgeblich beeinflussen und wie sich diese Einflussgrößen auf die Versagenswahrscheinlichkeit des Tragwerks auswirken. Hierbei werden die materialspezifischen Besonderheiten von Lehmbaustoffen, wie zum Beispiel der Feuchteinfluss auf die mechanischen Materialeigenschaften, explizit mitberücksichtigt. Ein wesentlicher Untersuchungsgegenstand dieses Forschungsprojekts ist daher zunächst die Quantifizierung der Klimaabhängigkeit bemessungsrelevanter Materialeigenschaften von Lehmmauerwerk, die Ermittlung und Analyse des zu erwartenden Feuchtegehaltes innerhalb von Lehmmauerwerkswänden in unterschiedlichen Anwendungsfällen sowie die Entwicklung eines Berechnungsmodells, welches den Einfluss der vorherrschenden Materialfeuchte auf die Tragfähigkeit druckbeanspruchter Lehmmauerwerkswände wirklichkeitsnah berücksichtigen kann. Aufbauend auf diesen Voruntersuchungen wird die Zuverlässigkeit druckbeanspruchter Lehmmauerwerkswände unter Einbezug praxisrelevanter Randbedingungen untersucht und bewertet. Durch diese umfangreiche zuverlässigkeitstheoretische Betrachtung von tragendem Lehmmauerwerk kann dessen Versagenswahrscheinlichkeit innerhalb diverser Anwendungsfälle ermittelt und Schlussfolgerungen über die Sicherheit von Gebäuden mit Tragwerken aus Lehmmauerwerk gezogen werden.

Weiterhin kann auf Basis der Untersuchungsergebnisse die Zuverlässigkeit druckbeanspruchter Lehmmauerwerkswände, welche nach dem kürzlich erarbeiteten Bemessungsansatz für tragendes Lehmmauerwerk DIN 18940 [13] bemessen wurden, fundiert beurteilt werden. Das dort verankerte semiprobabilistische Nachweiskonzept ist an das aktuelle Nachweis- und Sicherheitskonzept der Eurocodes angelehnt und soll das für die Bemessung von Lehmmauerwerkswände bisher geltende globale Sicherheitskonzept ablösen. Es gilt jedoch zu überprüfen, ob auf Basis des neuen normativen Regelwerks die Einhaltung des geforderten Zielzuverlässigkeitsniveaus für Hochbauten in allen üblichen Anwendungsfällen sichergestellt und eine zuverlässige Bemessung tragender Lehmbauteile ermöglicht wird. Die wissenschaftliche Beurteilung der Tragwerkszuverlässigkeit wird erforderlich, da der Anwendungsbereich von tragenden Lehmmauerwerkskonstruktionen auf Grundlage der DIN 18940 [13] gegenüber der bisher in Deutschland geltenden Planungsgrundlage, den Lehmbau Regeln [47], erheblich erweitert wird. Zudem erfolgt die normative Bemessung von Lehmmauerwerk in Anlehnung an die Vorgehensweise des Eurocode 6, womit eine wesentliche Umstellung des gesamten Nachweiskonzepts im Vergleich zu den bisher angewendeten Lehmbau Regeln [47] einhergeht. Demzufolge ist die Zuverlässigkeit von tragenden Lehmmauerwerkswänden einer umfassenden Prüfung zu unterziehen, um eine erhöhte Anzahl an Versagensfällen auszuschließen und somit das gesellschaftliche Vertrauen in die moderne Lehmbauweise langfristig zu stärken.

1.2 Stand der Forschung

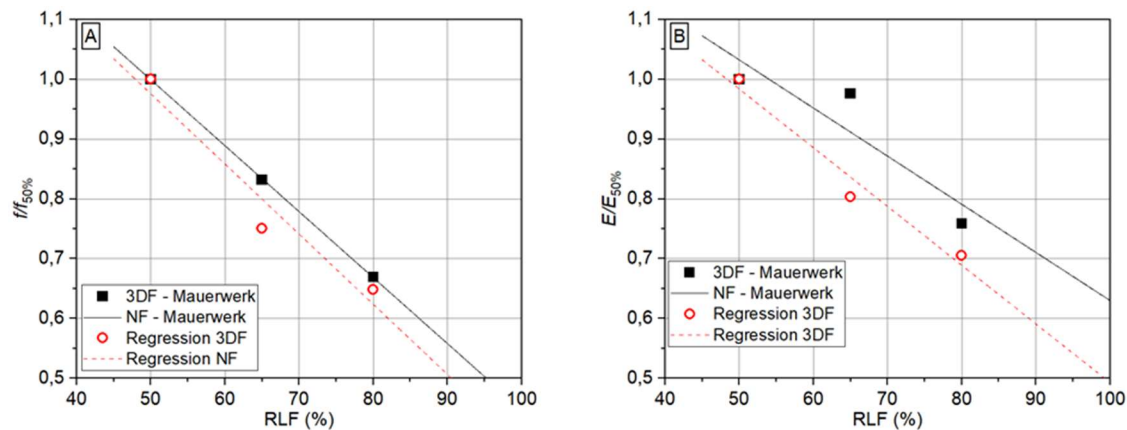
In der Vergangenheit wurden bereits diverse Untersuchungen zu den mechanischen Eigenschaften sowie dem Tragverhalten von Lehmbaustoffen durchgeführt. Hierbei wurden die Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Lehmsteinen, Lehmmauermörteln, Stampflehm sowie Lehmsteinmauerwerk experimentell analysiert (z. B. in [14–23]). Auf Grundlage dieser Untersuchungen kann festgestellt werden, dass die Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Lehmbaustoffen für die Errichtung tragender Bauteile in geringgeschossigen Gebäuden unter praxisüblichen Belastungsbedingungen ausreichend sind. Dies kann durch die Verteilungen der an 13 verschiedenen Stein-Mörtel-Kombinationen in [21, 22, 24, 25] ermittelten mittleren Mauerwerksdruckfestigkeiten sowie -elastizitätsmoduln bei standardisierten Klimabedingungen (Luftfeuchte $\varphi = 50\%$ und Temperatur $\theta = 23\text{ °C}$) in Abbildung 1 exemplarisch dargestellt werden [26]. Die aus diesen Versuchen hervorgehende mittlere Mauerwerksdruckfestigkeit liegt mit $f \approx 3,3\text{ N/mm}^2$ im Bereich anderer niederfesten Mauerwerksbaustoffe.

Abbildung 1: Verteilung der mittleren Druckfestigkeit sowie des mittleren Elastizitätsmoduls von Lehmmauerwerk bei einer relativen Luftfeuchte von $\varphi = 50\%$ und einer Temperatur von $\Theta = 23\text{ °C}$ basierend auf Literaturdaten



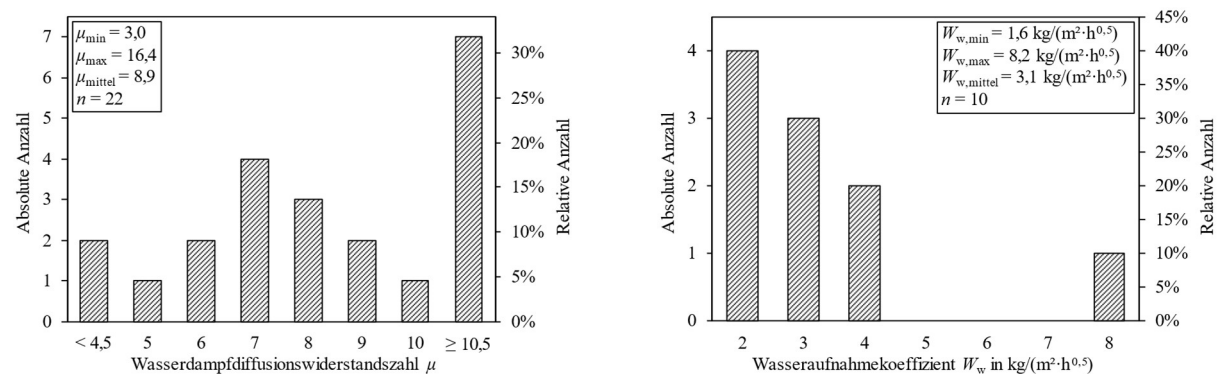
Weiterhin geht aus verschiedenen Veröffentlichungen hervor, dass die mechanischen Materialeigenschaften von Lehm einer nicht zu vernachlässigenden Feuchteabhängigkeit unterliegen [25, 27–32]. Dieser Effekt konnte durch ein kürzlich abgeschlossenes Forschungsvorhaben zur Ermittlung von Bemessungsgrundlagen für tragendes Lehmmauerwerk bestätigt werden und sollte daher im Rahmen der Traglastermittlung und der Bemessung von Lehmmauerwerk hinreichend berücksichtigt werden [33, 34]. Die innerhalb des genannten Forschungsprojekts experimentell ermittelte Feuchteabhängigkeit der Mauerwerksdruckfestigkeit sowie des Mauerwerkselastizitätsmoduls ist in Abbildung 2 illustriert.

Abbildung 2: Feuchteinfluss auf die Mauerwerksdruckfestigkeit und den Mauerwerkselastizitätsmodul gemäß [33]



Zur Ermittlung baupraktisch relevanter Materialfeuchten von Lehm-mauerwerkswänden sind die hygrothermischen Materialeigenschaften von Lehm relevant. Hinsichtlich des wärme- und feuchtetechnischen Speicher- und Transportverhaltens wurden z. B. in [25, 31, 35–46] vielfältige Untersuchungen durchgeführt. Empfehlungswerte für gewisse hygrothermische Materialkennwerte von Lehm-baustoffen, wie beispielsweise für die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl oder die Wärmeleitfähigkeit, sind zudem in technischen Regelwerken wie den Lehm-bau Regeln [47] oder der DIN 4108-4 [48] zu finden. In Abbildung 3 sind exemplarisch die Verteilungen der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl von 22 verschiedenen un-stabilisierten Lehm-baustoffen aus [25, 31, 35, 36, 38, 39, 41] sowie des Wasseraufnahmekoeffizienten von 10 verschiedenen un-stabilisierten Lehm-baustoffen aus [25, 35, 45, 46] dargestellt. Diese und weitere bauphysikalische Kennwerte können zur Erstellung eines wirklichkeits-nahen hygrothermischen Materialmodells herangezogen werden, welches daraufhin die Analyse der Materialfeuchte innerhalb praxisüblicher Lehm-mauerwerkswände sowie deren Streuungen erlaubt.

Abbildung 3: Verteilung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl sowie des Wasseraufnahmekoeffizienten von Lehm-baustoffen basierend auf Literaturdaten



Im Gegensatz zu den mechanischen und bauphysikalischen Materialeigenschaften wurde die Zuverlässigkeit von tragendem Lehm-mauerwerk bisher nur selten wissenschaftlich thematisiert [24, 49]. Zudem berücksichtigen die bestehenden zuverlässigkeitstheoretischen Untersuchungen den Einfluss der Bauteilfeuchte und deren statistische Streuung nicht explizit, weshalb zur realitäts-nahen Ermittlung der

Versagenswahrscheinlichkeit und des vorliegenden Zuverlässigkeitsniveaus von Tragwerken aus Lehmmauerwerk Handlungsbedarf besteht.

Innerhalb Deutschlands erfolgte die Bemessung tragender Lehmmauerwerkswände bisher auf Basis der Lehmbau Regeln [47]. Hierbei handelt es sich um ein technisches Regelwerk, welches in der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) des Deutschen Instituts für Bautechnik für die Planung von Wohnungsgebäuden aus Lehmstoffen der Gebäudeklasse 1 und 2 mit höchstens zwei Vollgeschossen aufgenommen wurde. Die Lehmbau Regeln [47] entsprechen jedoch im Bereich der Bemessung tragender Bauteile nicht mehr dem Stand der Technik und können das Leistungsvermögen modernen Lehmmauerwerks daher nicht adäquat abbilden. Zudem ergeben sich aus den Lehmbau Regeln diverse konservative Restriktionen und erhebliche Einschränkungen des Anwendungsbereichs, weshalb danach bemessene Lehmteile gegenüber Tragwerken aus anderen Baustoffen oftmals unwirtschaftlich oder planerisch nicht realisierbar sind. Weiterhin stimmt das gemäß der Lehmbau Regeln [47] für die Dimensionierung von tragenden Lehmteilen geltende globale Sicherheitskonzept nicht mit den aktuell gültigen normativen Regelungen des Eurocodes überein. Dort ist baustoffübergreifend ein semiprobabilistisches Sicherheitskonzept verankert, welches es erlaubt, Streuungen sowohl auf der Einwirkungs- als auch auf der Widerstandsseite des nachzuweisenden Bauteils detailliert zu erfassen. Hierdurch ist in der Regel eine präzisere Kalibrierung des Zuverlässigkeitsniveaus möglich, was wiederum zu einer sicheren und gleichzeitig wirtschaftlichen Bemessung führt. Aus diesen Gründen ist auch bei der Bemessung tragenden Lehmmauerwerks eine Umstellung des Sicherheitskonzepts auf eine semiprobabilistische Nachweisführung erstrebenswert.

Um den Problemen des bisherigen Nachweisverfahrens für Lehmmauerwerkswände entgegenzuwirken, erfolgte parallel zur Laufzeit dieses Forschungsprojekts eine intensive Überarbeitung und Erweiterung der normativen Regelungen im Bereich des Lehmbaus. Durch die Einführung der neuen Konstruktions-, Bemessungs- und Ausführungsnorm für tragendes Lehmsteinmauerwerk DIN 18940 [13] sowie der Überarbeitung der zugehörigen Produktnormen für Lehmsteine DIN 18945 [50] und Lehmmauermörtel DIN 18946 [51] wurde unter kontinuierlichem Einbezug der in diesem Bericht dargelegten Forschungsergebnisse die Grundlage für eine erweiterte und zuverlässige Nutzung von tragendem Lehmmauerwerk geschaffen.

1.3 Zielstellung

Um Lehmstoffe zur Errichtung nachhaltiger Bauwerke verbreitet einsetzen zu können, muss sichergestellt sein, dass die für tragende Bauteile geltenden Zuverlässigkeitsanforderungen von Lehmmauerwerkswänden in allen praxisrelevanten Anwendungsfällen erfüllt werden.

Das Hauptziel dieses Forschungsprojekts ist daher die Überprüfung der Tragwerkszuverlässigkeit nach der Umstellung des in der Bemessung von tragendem Lehmmauerwerk bisher angewendeten globalen Sicherheitskonzepts auf eine semiprobabilistische Nachweisführung. Dabei ist wissenschaftlich zu validieren, dass durch die Umstellung des Sicherheitskonzepts das in DIN EN 1990 [76] definierte Ziel-Zuverlässigkeitsniveau von tragenden Lehmmauerwerkswänden in praxisrelevanten Anwendungsbereichen erreicht wird. Auf Basis der bisherigen qualitativen Erkenntnisse zum

Materialverhalten von unstabilisierten Lehmbaustoffen ist die Feuchteabhängigkeit der mechanischen Materialeigenschaften im Zuge der Untersuchungen explizit zu berücksichtigen.

Zur Erreichung des Forschungszweckes werden folgende Zwischenziele definiert:

- Quantifizierung der Klimaabhängigkeit der bemessungsrelevanten Materialeigenschaften von Lehmmauerwerk
- Erarbeitung eines wirklichkeitsnahen Traglastmodells für druckbeanspruchte Lehmmauerwerkswände unter expliziter Berücksichtigung des Einflusses der Materialfeuchte
- Ermittlung der zu erwartenden Materialfeuchte innerhalb von Lehmmauerwerkswänden in praxisrelevanten Anwendungsfällen sowie deren zeitlichen Streuung
- Erarbeitung von statistischen Verteilungsfunktionen zur statistischen Abbildung der Materialfeuchte innerhalb von Lehmmauerwerkswänden
- Bewertung der Zuverlässigkeit von Lehmmauerwerkswänden unter Feuchteeinfluss anhand von Zuverlässigkeitsanalysen unter Berücksichtigung praxisrelevanter Anwendungsfälle sowie variierender Randbedingungen

1.4 Vorgehensweise

Zu Beginn des Forschungsvorhabens wird die Klimaabhängigkeit der bemessungsrelevanten Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Lehmmauerwerk anhand von experimentellen Untersuchungen quantifiziert. Hierzu werden Lehmsteine, Lehmmauermörtel sowie daraus hergestellte Mauerwerksprobekörper bei verschiedenen Umgebungsbedingungen innerhalb eines Klimaschranks bis zur Massekonstanz konditioniert und anschließend einer Druckprüfung unterzogen. Auf Basis der Ergebnisse dieser experimentellen Untersuchungen soll ein möglichst repräsentativer Zusammenhang zwischen der Materialfeuchte und den mechanischen Materialeigenschaften von Lehmmauerwerk abgeleitet werden.

Dieser Zusammenhang soll daraufhin die Basis für die Entwicklung eines Berechnungsmodells für die analytische Bestimmung der Querschnitts- und Systemtragfähigkeit unter Berücksichtigung der Materialfeuchte darstellen. Hierfür werden Traglastmodelle zur wirklichkeitsnahen Ermittlung der Tragfähigkeit druckbeanspruchter Wände aus herkömmlichen Mauerwerksbaustoffen basierend auf den individuellen Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Lehmmauerwerk adjustiert. Zudem wird eine Möglichkeit entwickelt, beliebige hygroskopische Materialfeuchten im Zuge der Berechnungen einzubeziehen.

Anschließend erfolgt die Ermittlung der zu erwartenden Materialfeuchte innerhalb von Lehmmauerwerkswänden in praxisrelevanten Anwendungsfällen. Hierzu müssen relevante Materialkennwerte des Feuchtespeicher- und Feuchtetransportverhaltens von Lehmbaustoffen identifiziert und ermittelt werden. Anschließend werden die Kennwerte in ein hygrothermisches Materialmodell implementiert, um anhand instationärer, hygrothermischer Analysen die erwartbaren Bauteilfeuchten in Lehmmauerwerkswänden abschätzen zu können. Dabei werden verschiedene

Parameterkombinationen aus Wandaufbau, Innenklima und Außenklima untersucht. Basierend auf den Simulationsergebnissen werden Anwendungsbereiche mit vergleichbaren Materialfeuchten definiert und durch geeignete statistische Verteilungsfunktionen abgebildet.

Aufbauend auf diesen Untersuchungen werden umfangreiche probabilistische Analysen mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt. Im Rahmen der zuverlässigkeitstheoretischen Betrachtungen werden praxisnahe Anwendungsfälle und Bemessungssituationen druckbeanspruchter Lehmmauerwerkswände sowie die dabei zu erwartenden Materialfeuchten berücksichtigt. Die Ergebnisanalyse erlaubt abschließend eine fundierte Beurteilung des zu erwartenden Zuverlässigkeitsniveaus von tragenden Lehmmauerwerkswänden bei einer Nachweisführung auf Basis eines semiprobabilistischen Sicherheitskonzepts.

Teilergebnisse dieses Forschungsvorhabens wurden bereits in den folgenden wissenschaftlichen Publikationen beschrieben und veröffentlicht:

Brinkmann, M.; Wiehle, P. (2023): Correlation between relative humidity and the strength and deformation characteristics of unstabilised earth masonry. *In: Construction and Building Materials* 366. [53]

Brinkmann, M. (2023): Tragfähigkeit druckbeanspruchten Lehmmauerwerks unter Berücksichtigung nichtlinearer Feuchteprofile. Dissertation. Technische Universität Darmstadt. [26]

2 Experimentelle Untersuchungen zur Klimaabhängigkeit der Festigkeits- und Verformungseigenschaften

2.1 Einführung

Zu Beginn des Forschungsvorhabens wurde ein Versuchsprogramm konzipiert, welches die experimentelle Analyse des Klimaeinflusses auf relevante mechanische Materialeigenschaften von unstabilisierten Lehmsteinen, Lehmmauermörtel sowie Lehmmauerwerk unter Druckbeanspruchung ermöglicht. Hierzu wurden zunächst die zu untersuchenden Baustoffe ausgewählt und geeignete Probekörpergeometrien festgelegt.

Zur experimentellen Untersuchung der Steineigenschaften wurden zwei verschiedene Lehmsteine analysiert. Um eventuell vorhandene produktionsbedingte Einflüsse auf die Feuchteabhängigkeit der Materialeigenschaften berücksichtigen zu können, erfolgten die durchgeführten experimentellen Untersuchungen sowohl an einem formgeschlagenen als auch an einem stranggepressten Lehmstein. Bei beiden Lehmsteinen handelte es sich um Vollsteine im Normalformat. Der formgeschlagene Lehmstein (Lehmstein I) ist gemäß DIN 18945 [54] der Anwendungsklasse Ib zuzuordnen und somit für die Herstellung durchgängig verputzten Außenmauerwerks geeignet. Bei dem stranggepressten Lehmstein (Lehmstein II) handelt es sich um einen ungebrannten Ziegelstein (Grünling), welcher auf Grund seines höheren Tonanteils in die Anwendungsklasse II einzuordnen ist und somit eine geringere Feuchteresistenz aufweist. Infolgedessen darf Lehmstein II gemäß der normativen Regelungen ausschließlich für konstruktiv witterungsgeschütztes Außenmauerwerk oder Innenmauerwerk verwendet werden. Gemäß der Herstellerangaben ist die Verwendung von Lehmstein I für die Herstellung von tragenden Bauteilen zulässig, wohingegen Lehmstein II offiziell nicht für den Einsatz in tragenden Konstruktionen klassifiziert ist. Alle relevanten Herstellerangaben der untersuchten Lehmsteine sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

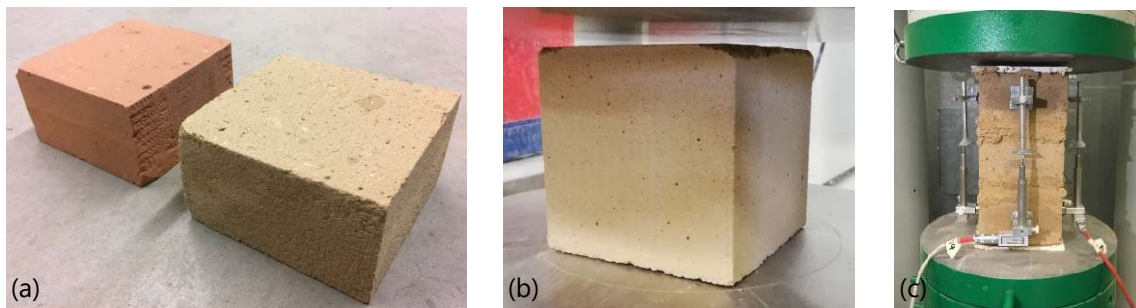
Tabelle 1: Herstellerangaben der untersuchten Lehmsteine

Bezeichnung	Format	Lochung	Herstellungsart	Rohdichte -klasse	Druckfestigkeits- klasse	Anwendungsklasse
Lehmstein I	NF	Vollstein	formgeschlagen	2,0	2	Ib (tragend)
Lehmstein II			stranggepresst	1,8	-	II (nicht tragend)

Weiterhin erfolgten experimentelle Untersuchungen an einem mineralischen Lehmmauermörtel, welcher für die Kombination mit Lehmsteinen der Anwendungsklasse I oder II zugelassen ist. Er lässt sich gemäß Herstellerangaben der Korngruppe 0/4, der Rohdichteklasse 2,0 und der Druckfestigkeitsklasse M3 nach DIN 18946 [55] zuordnen und ist somit für den Einsatz in tragenden Konstruktionen geeignet. Um die vertikalen Verformungen des Festmörtels während der Druckprüfung über eine geeignete Messstrecke aufnehmen zu können, wurden die Probekörper in Würfelschalungen mit einer nominellen Kantenlänge von 10 cm hergestellt.

Zur Analyse der Mauerwerkseigenschaften wurden Dreisteinkörper unter Verwendung des Lehmsteins I sowie des beschriebenen Lehmmauermörtels gefertigt. In Anlehnung an herkömmlichen Normalmörtel gemäß DIN EN 1996-1-1/NA [56] betrug die planmäßige Lagerfugendicke zwischen den drei halbierten Lehmsteinen 12 mm. Um die Ebenheit der Lasteinleitungsflächen zu gewährleisten, wurden die Probekörper an den Ober- und Unterseiten mit Gipsschichten planparallel abgeglichen. Die Messung der vertikalen Verformungen während der Prüfung erfolgte durch je einen magnetisch befestigten, induktiven Wegaufnehmer an den vier Außenseiten des Dreisteinkörpers. Alle untersuchten Lehmbaumaterialien sind in Abbildung 4 exemplarisch dargestellt.

Abbildung 4: Probekörper des Lehmstein II & Lehmstein I (a), Lehmmauermörtel (b), Lehmmauerwerk (c)



Um im Rahmen der Versuchsreihe den Feuchte- und Temperatureinfluss auf die mechanischen Materialeigenschaften zutreffend ermitteln zu können, wurden alle Probekörper vor der Prüfung bei verschiedenen Umgebungsklimata bis zum Erreichen ihrer Massekonstanz innerhalb eines Klimaschranks gelagert, welcher es bei einer relativen Luftfeuchte von $\varphi = 50\%$ ermöglicht, die vorherrschende Temperatur in einem Bereich von $10\text{ °C} \leq \theta \leq 95\text{ °C}$ mit einer Abweichung von maximal $\theta \pm 1,3\text{ °C}$ zu regulieren. Weiterhin kann die relative Luftfeuchte innerhalb des Klimaschranks bei einer Temperatur von $\theta = 23\text{ °C}$ in einem Bereich von $35\% \leq \varphi \leq 98\%$ mit einer Abweichung von maximal $\varphi \pm 2,5\%$ justiert werden. Um relative Luftfeuchten außerhalb des Regelungsbereichs des Klimaschranks zu generieren, wurden gesättigte Salzlösungen gemäß DIN EN ISO 12571 [57] Anhang A verwendet. Das Einstellen einer relativen Luftfeuchte von $\varphi = 20\%$ erfolgte demzufolge mit Hilfe des Salzes Kaliumacetat ($\text{C}_2\text{H}_3\text{KO}_2$), wohingegen für eine relative Luftfeuchte von $\varphi = 5\%$ das Trockensalz Calciumchlorid (CaCl_2) verwendet wurde.

Gemäß DIN 18945 [54] und DIN 18946 [55] gilt die Massekonstanz eines Lehmprobekörpers als erreicht, wenn sich dessen Masse innerhalb von 24 Stunden um nicht mehr als 0,2 % verändert. Dieser Grenzwert wurde bei allen Probekörpern spätestens nach einer einwöchigen Lagerung innerhalb des gewünschten Umgebungsklimas eingehalten. Im Rahmen der nachfolgenden Auswertungen wird unterstellt, dass sich nach Erreichen der Massekonstanz ein stetiger Feuchtegehalt innerhalb des Baustoffs eingestellt hat. Daraus folgt, dass die angegebenen relativen Konditionierungsluftfeuchten äquivalent zum Feuchtegehalt der untersuchten Lehmbaumaterialien sind. Um einen Feuchteausgleich mit der Außenluft nach Abschluss der Konditionierung zu verhindern, wurden alle Probekörper nach der Entnahme aus dem Klimaschrank bis zum Prüfzeitpunkt mit einer diffusionsdichten Folie umwickelt. Die Druckprüfungen erfolgten anschließend unter zentrischem Druck mit einer einheitlichen

weggesteuerten Belastungsgeschwindigkeit von 0,002 mm/s. Der Elastizitätsmodul wurde bei allen untersuchten Lehmbaumaterialien als Sekantenmodul bei einem Lastniveau in Höhe eines Drittels der Druckfestigkeit ermittelt. Die gewählten klimatischen Randbedingungen sowie die Anzahl der durchgeführten Untersuchungen sind für alle analysierten Lehmbaumaterialien in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Umfang der durchgeführten experimentellen Untersuchungen

Relative Luftfeuchte φ	Temperatur θ	Versuchsumfang			
		Lehmstein I	Lehmstein II	Lehmmörtel	Lehmmauerwerk
5 %	23 °C	-	-	3	3
20 %		3	3	4	3
40 %		-	-	-	4
50 %	10 °C	-	-	-	3
	23 °C	3	3	3	6
	40 °C	-	-	-	3
65 %	23 °C	-	-	-	3
80 %		3	3	3	3
95 %		3	3	3	3

Um die Klimaabhängigkeit der untersuchten Lehmbaumaterialien optimal analysieren zu können, ergaben sich bei der Wahl der Probekörpergeometrien sowie bei der Festlegung der Prüfabläufe vereinzelt Abweichungen gegenüber den normativen Vorgaben. Um eine gleichmäßig verteilte Materialfeuchte innerhalb der Lehmmauerwerkprobekörper nach Abschluss der Konditionierung zu erhalten, wurden die Druckversuche des Lehmmauerwerks beispielsweise an Dreisteinprobekörpern durchgeführt, welche ein geringeres Volumen als die bei herkömmlichem Mauerwerk üblicherweise verwendeten RILEM-Probekörper aufweisen und das Erreichen der gewünschten Ausgleichsmaterialfeuchte somit schneller und konstanter möglich ist. Zur Ermittlung aussagekräftiger Verformungskennwerte erfolgte die Prüfung der normalformatigen Lehmsteine zudem nicht an übereinanderliegenden Steinhälften, da die Dehnungsmessung durch die gemäß DIN 18945 [54] vorzusehende Gipsfuge in der Mitte des Probekörpers beeinflusst werden könnte. Auch die experimentellen Untersuchungen des Lehmmauerwerks wurden an Prismas mit größeren Probekörperabmessungen als gemäß DIN 18946 [55] vorgegeben durchgeführt, um eine hinreichende Messstreckenlänge zur Aufnahme der Vertikaldehnungen zu erhalten. Den Absolutwerten der generierten Prüfergebnisse fehlte somit die direkte Vergleichbarkeit mit normativ ermittelten Materialkennwerten, weshalb nachfolgend auf deren Darstellung gänzlich verzichtet wird. Stattdessen erfolgt im Zuge der Ergebnisauswertung eine Normierung mit den experimentell bestimmten Mittelwerten des jeweiligen Materialkennwerts bei einer Temperatur von $\theta = 23 \text{ °C}$ und einer relativen Luftfeuchte von $\varphi = 50 \text{ %}$. Hierdurch wird der Einfluss des Umgebungsklimas auf die Festigkeits- und Verformungseigenschaften der untersuchten Lehmbaumaterialien unmittelbar und unabhängig von anderen Einflussfaktoren ersichtlich. Ein weiterer Vorteil dieser Normierung besteht darin, dass das gewählte Referenzklima dem normativen Konditionierungsklima für Lehmbaumaterialien gemäß DIN 18945 [54] und DIN 18946 [55] entspricht, weshalb die normierten Versuchsergebnisse als direkte Modifikationsfaktoren für normativ ermittelte Materialkennwerte in Abhängigkeit der vorherrschenden klimatischen Umgebungsbedingungen angesehen werden können.

2.2 Lehmsteine

Im Zuge der Probekörpervorbereitung wurden die untersuchten Lehmsteine zunächst längsseitig halbiert, was zu einer planmäßigen Probekörpergeometrie von $120 \times 115 \times 71 \text{ mm}^3$ führte. Zur Beseitigung von Unebenheiten der Lasteinleitungsflächen wurden diese im Anschluss planparallel geschliffen. Auf Grund der geringen Probekörperhöhe erfolgte die Ermittlung der vertikalen Dehnungen mit Hilfe eines Seilzugwegaufnehmers, welcher am unteren Druckstempel der Prüfmaschine befestigt wurde. Die Messwerte wurden zusätzlich mit Hilfe des internen Wegaufnehmers der Prüfmaschine validiert. Die Druckfestigkeit der Lehmsteine wurde bei allen durchgeführten Prüfungen nach circa 5 – 11 Minuten erreicht.

Um den Einfluss der relativen Luftfeuchte auf die Festigkeits- und Verformungseigenschaften der Lehmsteine geeignet abzubilden, werden die experimentell ermittelten Spannungs-Dehnungs-Linien für Lehmstein I in Abbildung 5 normiert dargestellt. Wie in Kapitel 2.1 bereits erläutert, dienen der bei einer relativen Luftfeuchte von $\varphi = 50 \%$ und einer Temperatur von $\theta = 23 \text{ °C}$ bestimmte Mittelwert der Steindruckfestigkeit $f_{b,50\%}$ sowie der Mittelwert der zugehörigen Dehnung $\varepsilon_{f,50\%}$ als Referenzwerte.

Weiterhin werden die aus den normierten Spannungs-Dehnungs-Linien abgeleiteten bezogenen Mittelwerte der Druckfestigkeit $f_b/f_{b,50\%}$, des Elastizitätsmoduls $E_b/E_{b,50\%}$ sowie der Dehnung bei Erreichen der Druckfestigkeit $\varepsilon_f/\varepsilon_{f,50\%}$ für Lehmstein I in Abbildung 6 in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte dargestellt. Die Fehlerindikatoren kennzeichnen dabei den Bereich einer Standardabweichung ober- und unterhalb des Mittelwerts der jeweiligen Prüferie. Bei Prüferien ohne erkennbaren Fehlerindikator beträgt die Standardabweichung der Prüfergebnisse weniger als 0,05. Die normierten Spannungs-Dehnungs-Linien sowie die daraus abgeleiteten Festigkeits- und Verformungseigenschaften können für Lehmstein II in analoger Weise aus Abbildung 7 und Abbildung 8 entnommen werden.

Abbildung 5: Experimentell ermittelte Spannungs-Dehnungs-Beziehungen des Lehmsteins I bei variierender relativer Luftfeuchte φ und einer konstanten Temperatur von $\theta = 23 \text{ °C}$

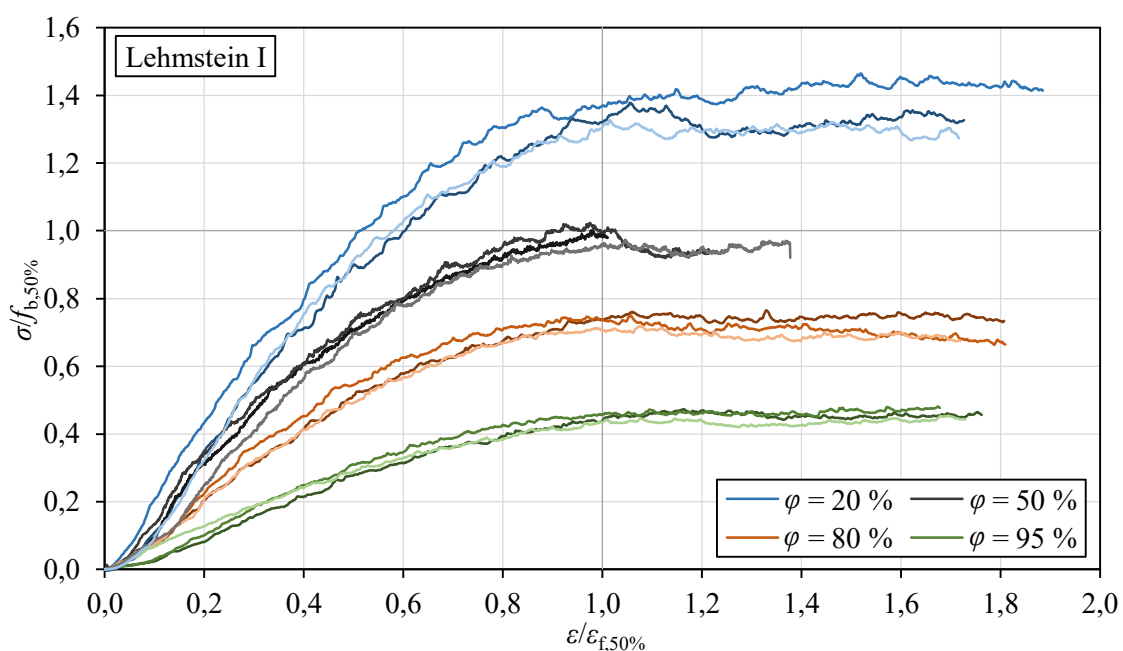


Abbildung 6: Normierte Mittelwerte der Festigkeits- und Verformungseigenschaften des Lehmsteins I bei variierender relativer Luftfeuchte φ und einer konstanten Temperatur von $\theta = 23\text{ °C}$

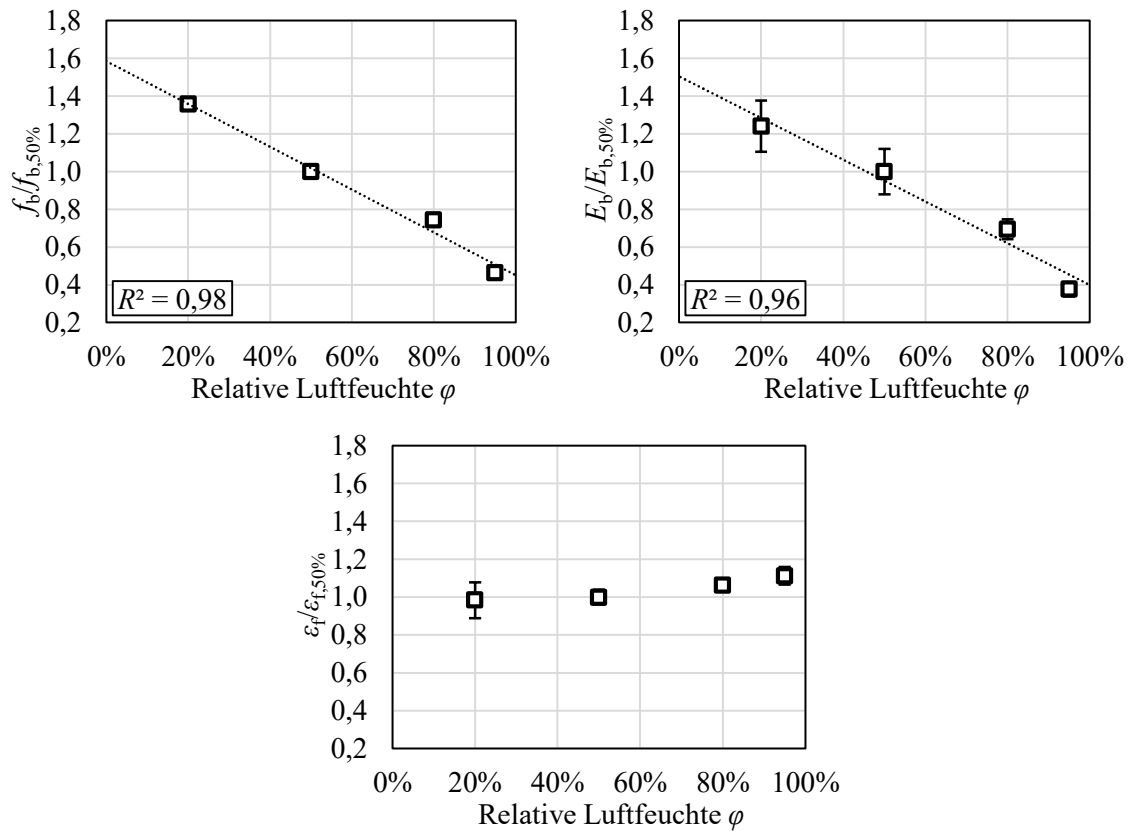


Abbildung 7: Experimentell ermittelte Spannungs-Dehnungs-Beziehungen des Lehmsteins II bei variierender relativer Luftfeuchte φ und einer konstanten Temperatur von $\theta = 23\text{ °C}$

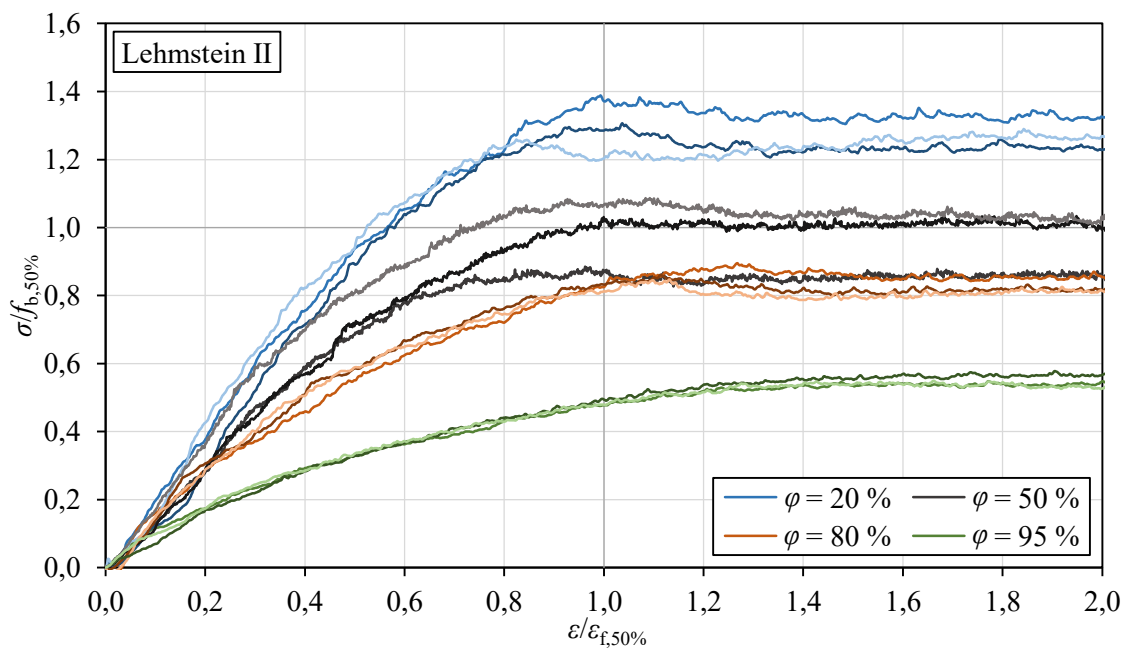
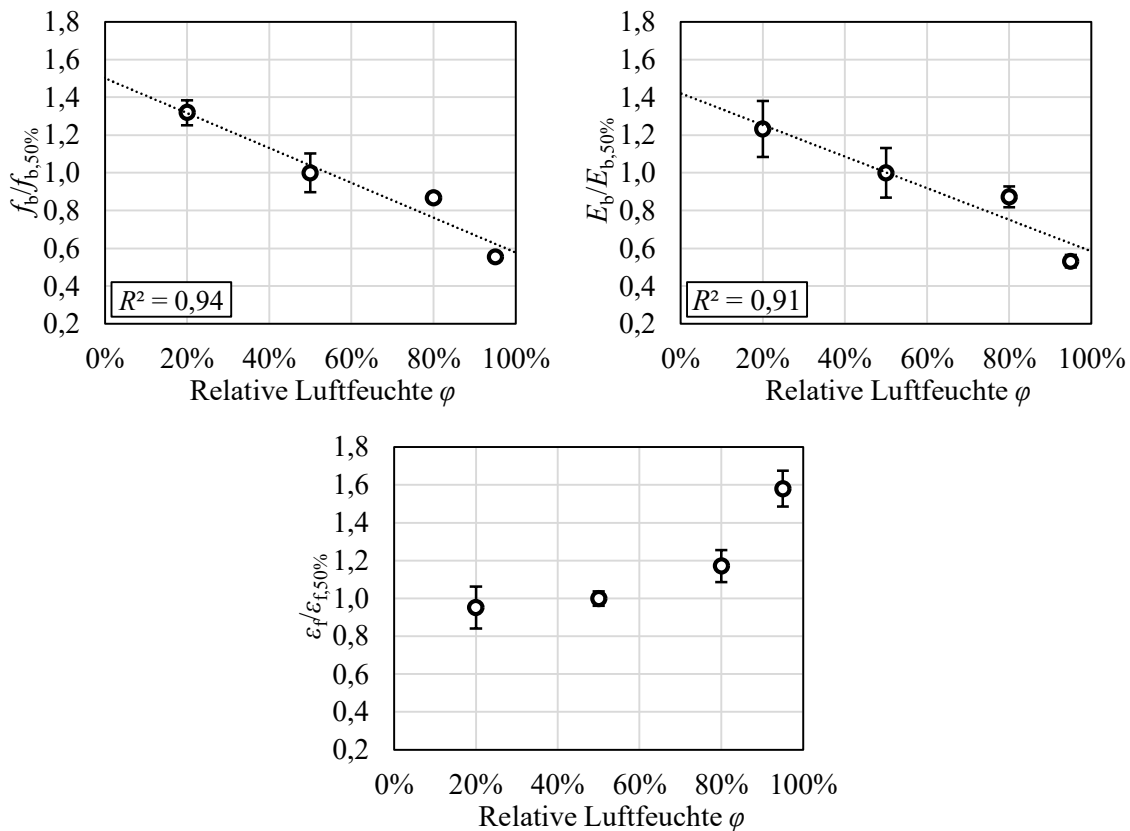


Abbildung 8: Normierte Mittelwerte der Festigkeits- und Verformungseigenschaften des Lehmsteins II bei variierender relativer Luftfeuchte φ und einer konstanten Temperatur von $\theta = 23\text{ °C}$



Der Verfestigungsbereich der Spannungs-Dehnungs-Beziehungen von Lehmstein I und Lehmstein II verläuft bei allen Umgebungsklimata deutlich nichtlinear. Im Entfestigungsbereich beider Lehmsteine ist anhand der großen Dehnungszuwächse bei konstanter Spannung eine ausgeprägte Duktilität zu erkennen. Da die Prüfungen von Lehmstein I bei einer relativen Luftfeuchte von $\varphi = 50\%$ frühzeitig manuell beendet worden sind, fällt hier der Entfestigungsbereich im Vergleich zu den übrigen Konditionierungsklimata kürzer aus. Die hohe Duktilität der Lehmsteine wird jedoch durch die geringe Probekörperhöhe und die damit einhergehende Querdehnungsbehinderung begünstigt und lässt sich daher nicht ohne weitere Untersuchungen auf normative Probekörperabmessungen übertragen. Das Versagensbild der Lehmsteine charakterisiert sich durch ein typisches Ausbrechen seitlicher Schalen, wie es auch bei Vollsteinen aus anderen Mauerwerksbaustoffen beobachtet werden kann.

Mit steigender relativer Luftfeuchte ist ein deutliches Abflachen der Spannungs-Dehnungs-Beziehung beider Lehmsteine zu erkennen. Dies hat eine Reduktion der Druckfestigkeit sowie des Elastizitätsmoduls zur Folge, was ebenfalls in den Darstellungen der Feuchteabhängigkeit der Festigkeits- und Verformungseigenschaften deutlich wird. Bei Verringerung der relativen Luftfeuchte wird dagegen ein gegenläufiger Effekt in Form eines Anstiegs der genannten Materialkennwerte sichtbar. Zudem fällt auf, dass Änderungen der relativen Luftfeuchte bei beiden Lehmsteinen einen nahezu linearen Einfluss auf die Druckfestigkeit und den Elastizitätsmodul haben. Diese lineare Korrelation kann durch Betrachtung des Bestimmtheitsmaßes bestätigt werden: Bei beiden untersuchten Lehmsteinen weist dieser sowohl hinsichtlich der Druckfestigkeit als auch des Elastizitätsmoduls Werte von $R^2 > 0,90$ auf. Weiterhin zeigt

sich, dass die feuchtebedingte Änderung des Elastizitätsmoduls nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ affin zur Änderung der Druckfestigkeit ausfällt. Demzufolge deuten die Versuchsergebnisse auf eine Feuchteunabhängigkeit des Verhältnisses aus Elastizitätsmodul zu Druckfestigkeit der untersuchten Lehmsteine hin.

Darüber hinaus lässt sich feststellen, dass die Dehnung bei Erreichen der Druckfestigkeit von Lehmstein I im untersuchten Feuchtebereich nahezu konstant bleibt, wohingegen bei Lehmstein II für relative Luftfeuchten $\varphi > 50\%$ ein deutlicher Anstieg zu verzeichnen ist. Die zu beobachtende Steigerung der experimentell ermittelten Dehnungen bei Erreichen der Druckfestigkeit könnte durch den ausgeprägteren Tonanteil von Lehmstein II hervorgerufen werden, welcher die Feuchteabhängigkeit dieses Parameters bei erhöhter Materialfeuchte möglicherweise verstärkt. Dabei sei jedoch darauf hingewiesen, dass durch die bei hohen relativen Luftfeuchten abflachenden Spannungs-Dehnungs-Beziehungen der Lehmsteine ein fließender Übergang zwischen dem Verfestigungs- und Entfestigungsbereich entsteht, welcher die exakte experimentelle Bestimmung der Dehnung bei Erreichen der Druckfestigkeit erschwert. Da die Spannungs-Dehnungs-Beziehung im Bereich von $\varepsilon/\varepsilon_{f,50\%} \approx 1$ bereits nahezu horizontal verläuft und der Spannungsanstieg im nachfolgenden Bereich der Arbeitslinie marginal ist, kann die Dehnung bei Erreichen der Druckfestigkeit der Lehmsteine zur Modellierung des Materialverhaltens daher in guter Näherung als unabhängig von der relativen Luftfeuchte beschrieben werden.

Basierend auf der Annahme einer annähernd feuchteunabhängigen Dehnung bei Erreichen der Druckfestigkeit sowie der linearen Feuchteabhängigkeit der Druckfestigkeit und des Elastizitätsmoduls, lässt sich feststellen, dass die Spannungs-Dehnungs-Linie der Lehmsteine durch Änderungen der relativen Luftfeuchte ausschließlich eine Skalierung in Richtung der Spannungsachse erfährt, wohingegen die Dehnungsachse nicht nennenswert beeinflusst wird. Hieraus ergibt sich eine vertikale Streckung der Arbeitslinie bei niedriger relativer Luftfeuchte und eine korrespondierende Stauchung bei hoher relativer Luftfeuchte.

Durch einen direkten Vergleich der Prüfergebnisse von Lehmstein I und Lehmstein II wird zudem deutlich, dass deren Festigkeits- und Verformungseigenschaften in vergleichbarem Ausmaß von der vorherrschenden relativen Luftfeuchte abhängen. Die durchgeführten Untersuchungen deuten somit nicht darauf hin, dass die mechanischen Materialeigenschaften von Lehmsteinen der Anwendungsklasse II stärker von Änderungen der Materialfeuchte im hygroskopischen Bereich beeinflusst werden als die Materialeigenschaften von Lehmsteinen der Anwendungsklasse Ib.

2.3 Lehmmauermörtel

Zur Probekörperherstellung wurde der erdfeuchte Lehmmauermörtel per Hand mit Wasser angerührt. Das Masseverhältnis zwischen Lehmmauermörtel und Wasser entsprach hierbei 6:1. Um die vertikalen Verformungen des Festmörtels während der Druckprüfung über eine geeignete Messstrecke aufnehmen zu können, wurden die Probekörper in Würfelschalungen mit einer nominellen Kantenlänge von 10 cm hergestellt. Nach dem Einfüllen des Frischmörtels in die Schalung wurde dieser auf einem Rütteltisch verdichtet. Das Ausschalen der Probekörper erfolgte nach ungefähr 14 Tagen. Nach einer weiteren

Trocknungszeit im Raumklima wurden die Ober- und Unterseiten der Würfel planparallel geschliffen, um eine gleichmäßige Lasteinleitung während der Prüfung zu gewährleisten.

Die Ermittlung der vertikalen Dehnungen während der Druckprüfung erfolgte mit Hilfe eines Seilzugwegaufnehmers, welcher am unteren Druckstempel der Prüfmaschine befestigt wurde. Die Messwerte wurden zusätzlich mit Hilfe des internen Wegaufnehmers der Prüfmaschine validiert. Die Druckfestigkeit des Lehmmauermörtels wurde bei allen durchgeführten Prüfungen nach circa 7 - 9 Minuten erreicht.

In Abbildung 9 sind die experimentell ermittelten normierten Spannungs-Dehnungs-Linien des Lehmmauermörtels dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit umfasst diese Abbildung nur vier der fünf untersuchten relativen Luftfeuchten. Weiterhin werden die normierten Mittelwerte der Druckfestigkeit $f_{mo}/f_{mo,50\%}$, des Elastizitätsmoduls $E_{mo}/E_{mo,50\%}$ sowie der Dehnung bei Erreichen der Druckfestigkeit $\varepsilon_f/\varepsilon_{f,50\%}$ des Lehmmauermörtels für alle untersuchten relativen Luftfeuchten in Abbildung 10 dargestellt. Die Fehlerindikatoren innerhalb der Diagramme kennzeichnen den Bereich einer Standardabweichung ober- und unterhalb des Mittelwerts der jeweiligen Prüferie. Bei Prüferien ohne erkennbaren Fehlerindikator beträgt die Standardabweichung der Prüfergebnisse weniger als 0,05.

Abbildung 9: Experimentell ermittelte Spannungs-Dehnungs-Beziehungen des Lehmmauermörtels bei variierender relativer Luftfeuchte φ und einer konstanten Temperatur von $\theta = 23\text{ °C}$

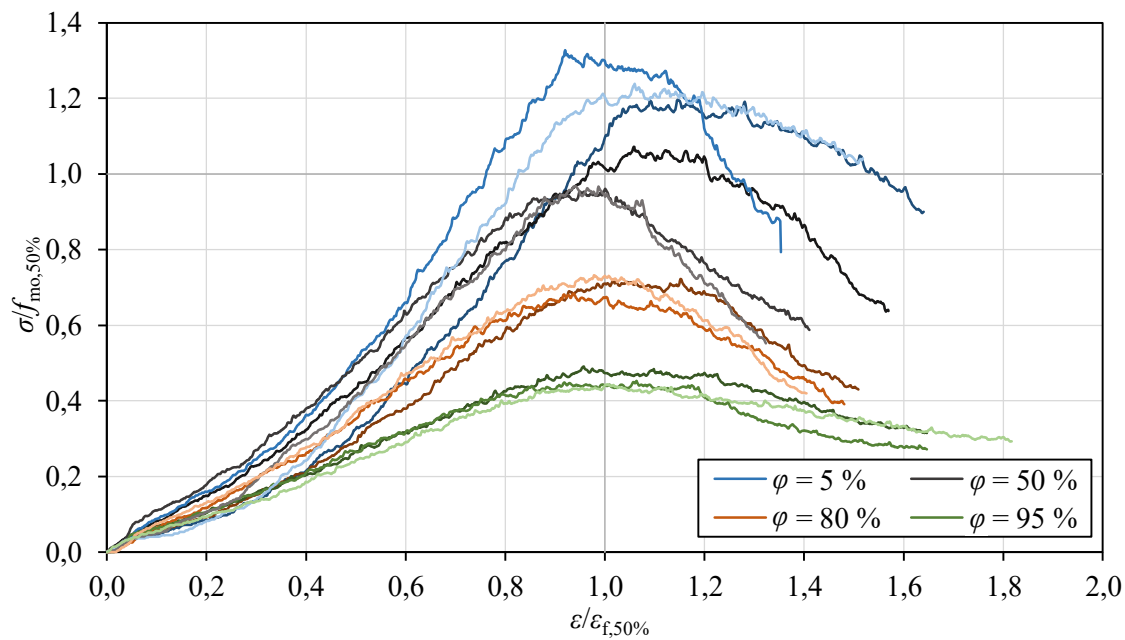
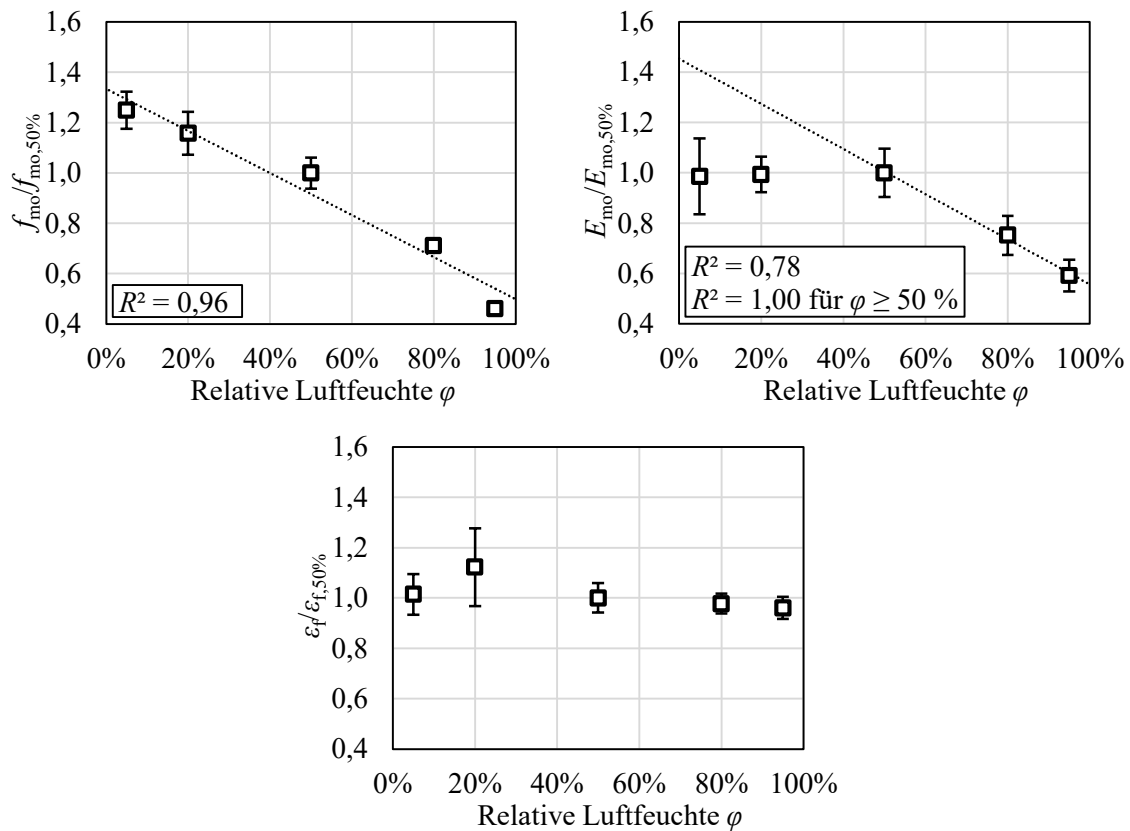


Abbildung 10: Normierte Mittelwerte der Festigkeits- und Verformungseigenschaften des Lehmmauermörtels bei variierender relativer Luftfeuchte φ und einer konstanten Temperatur von $\theta = 23\text{ °C}$



Die experimentell ermittelten Arbeitslinien des Lehmmauermörtels weisen im Gegensatz zu den Arbeitslinien der Lehmsteine innerhalb ihres Verfestigungsbereichs einen nahezu linearen Verlauf auf. Bei niedrigen relativen Luftfeuchten ist zu Beginn der Belastung eine konkave Krümmung der Spannungs-Dehnungs-Linien zu erkennen, welche auf anfängliche Kompaktierungsvorgänge innerhalb des Materials zurückzuführen ist. Dieses Phänomen einer mikrostrukturellen Konsolidierung im Zuge der Erstbelastung wurde ebenfalls bereits bei anderen experimentellen Untersuchungen an drucklos verdichteten Lehmbaumaterialien beobachtet [17]. Das Versagensbild nach Überschreiten der Druckfestigkeit charakterisiert sich durch vertikale Rissbildung in den Randbereichen der Probekörper. Der Entfestigungsbereich der Spannungs-Dehnungs-Linien indiziert bei allen Umgebungsklimata ein duktileres Werkstoffverhalten ohne schlagartiges Versagen.

Analog zu den in Kapitel 2.2 beschriebenen Untersuchungsergebnissen an Lehmsteinen fällt auf, dass die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen des Lehmmauermörtels durch Änderungen der relativen Luftfeuchte eine Skalierung in Richtung der Spannungsachse erfahren. Die Dehnung bei Erreichen der Druckfestigkeit bleibt für jedes untersuchte Konditionierungsklima annähernd konstant und lässt sich somit wie im Fall der Lehmsteine als feuchteunabhängig charakterisieren. Aus Abbildung 10 geht mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,96$ ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen relativer Luftfeuchte und mittlerer Druckfestigkeit hervor. Eine vergleichbare Linearität ist auch bei Betrachtung des Elastizitätsmoduls im Bereich höherer relativer Luftfeuchte von $\varphi \geq 50\%$ zu erkennen. Bei niedrigerer relativer Luftfeuchte steigt der experimentell ermittelte Elastizitätsmodul jedoch nicht weiter

an und weicht somit von einem idealisierten linearen Zusammenhang ab. Diese Abweichung lässt sich auf die konkave Krümmung der Spannungs-Dehnungs-Linien von drucklos verdichteten Lehmstoffen infolge der oben beschriebenen Kompaktierungsvorgänge zurückführen.

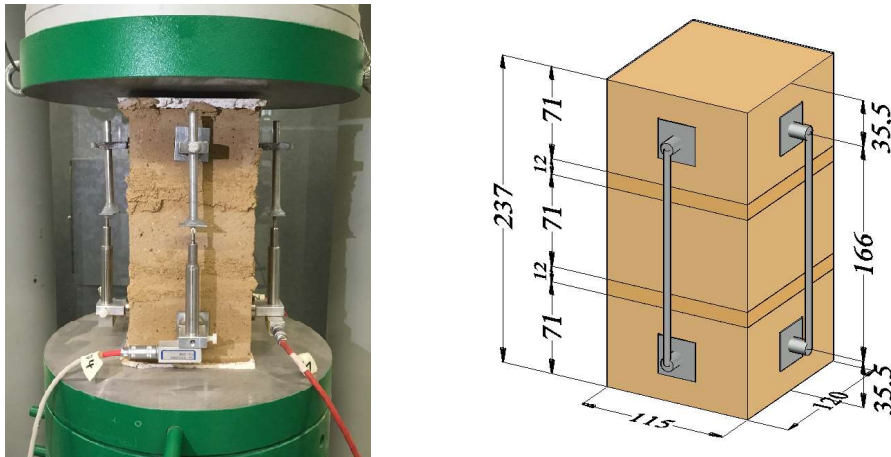
2.4 Lehmmauerwerk

2.4.1 Einführung

Aufbauend auf den bereits beschriebenen Untersuchungen an Lehmsteinen und Lehmmauermörteln werden nachfolgend die experimentellen Analysen des Einflusses variierender Umgebungsklimata auf die Festigkeits- und Verformungseigenschaften des Kompositbaustoffs Lehmmauerwerk dargelegt. Hierzu wurden Druckversuche unter zentrischer Belastung an Dreisteinkörpern bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten (vgl. Kapitel 2.4.2) sowie verschiedenen Umgebungstemperaturen (vgl. Kapitel 2.4.3) durchgeführt.

Die Probekörperherstellung erfolgte sowohl zur Untersuchung des Feuchteinflusses als auch des Temperatureinflusses analog. Die zu prüfenden Dreisteinkörper wurden unter Verwendung des für den tragenden Einsatz zugelassenen Lehmsteins I in Verbindung mit dem bereits beschriebenen Lehmmauermörtel gefertigt. Vor dem Vermauern wurden die Lehmsteine zunächst längsseitig halbiert. In Anlehnung an herkömmlichen Normalmörtel gemäß DIN EN 1996-1-1/NA [56] beträgt die planmäßige Lagerfugendicke zwischen den drei halbierten Lehmsteinen 12 mm. Um die Ebenheit der Lasteinleitungsflächen zu gewährleisten, wurden die Probekörper an den Ober- und Unterseiten mit Gipsschichten planparallel abgeglichen. Zur späteren Anbringung der Messtechnik wurden anschließend Metallplättchen in die Mitte aller vier Außenflächen des oberen und unteren Lehmsteins geklebt. Die Klebeflächen wurden hierfür zunächst mit einem Tiefengrund für sandige Oberflächen gefestigt. Die Messung der vertikalen Verformungen während der Prüfung erfolgte durch je einen magnetisch befestigten, induktiven Wegaufnehmer an den vier Außenseiten des Dreisteinkörpers. Die resultierende Gesamtverformung wurde auf Basis des Mittelwerts der Messwerte aller vier Wegaufnehmer errechnet. Die Druckfestigkeit der Dreisteinkörper wurde bei allen durchgeführten Prüfungen nach circa 15 – 19 Minuten erreicht. Ein exemplarischer Probekörper inklusive Messtechnik sowie eine vermaßte Skizze sind in Abbildung 11 dargestellt.

Abbildung 11: Dreisteinkörper inklusive Messtechnik (Maße in mm)



2.4.2 Untersuchungen zum Einfluss der relativen Luftfeuchte

Nachfolgend wird der Einfluss von Änderungen der relativen Luftfeuchte auf die Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Lehm-mauerwerk analysiert. Zur Wahrung der Übersichtlichkeit werden die experimentell ermittelten feuchteabhängigen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen in Abbildung 12 nur für vier der sieben untersuchten relativen Luftfeuchten abgebildet. Aus Anlage 1 können alle Spannungs-Dehnungs-Linien getrennt für die einzelnen Konditionierungsklimata entnommen werden. Die resultierenden Mittelwerte der bezogenen Druckfestigkeit $f/f_{50\%r}$, des bezogenen Sekantenelastizitätsmoduls $E_{0,33}/E_{0,33,50\%}$ sowie der bezogenen Dehnung bei Erreichen der Druckfestigkeit $\epsilon_f/\epsilon_{f,50\%}$ sind dahingegen bereits in Abbildung 13 für alle untersuchten relativen Luftfeuchten aufgetragen. Die Fehlerindikatoren innerhalb dieser Darstellung kennzeichnen den Bereich einer Standardabweichung ober- und unterhalb des Mittelwerts der jeweiligen Prüfserie. Bei Prüfserien ohne erkennbaren Fehlerindikator beträgt die Standardabweichung der Prüfergebnisse weniger als 0,05.

Abbildung 12: Experimentell ermittelte Spannungs-Dehnungs-Beziehungen des Lehm-mauerwerks bei variierender relativer Luftfeuchte φ und einer konstanten Temperatur von $\theta = 23\text{ }^\circ\text{C}$

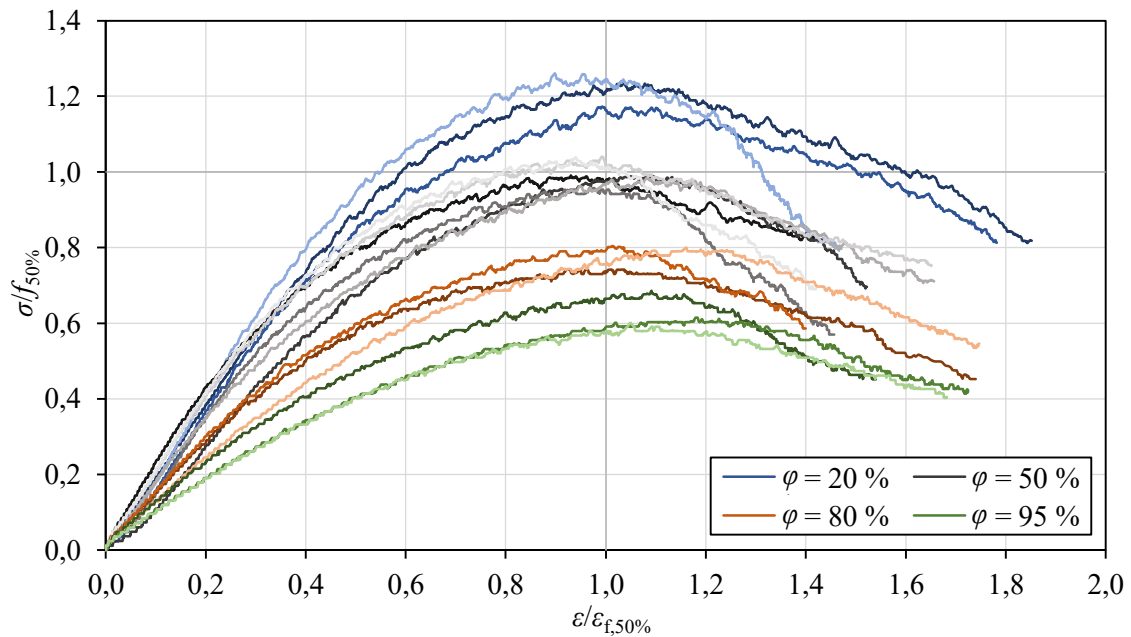
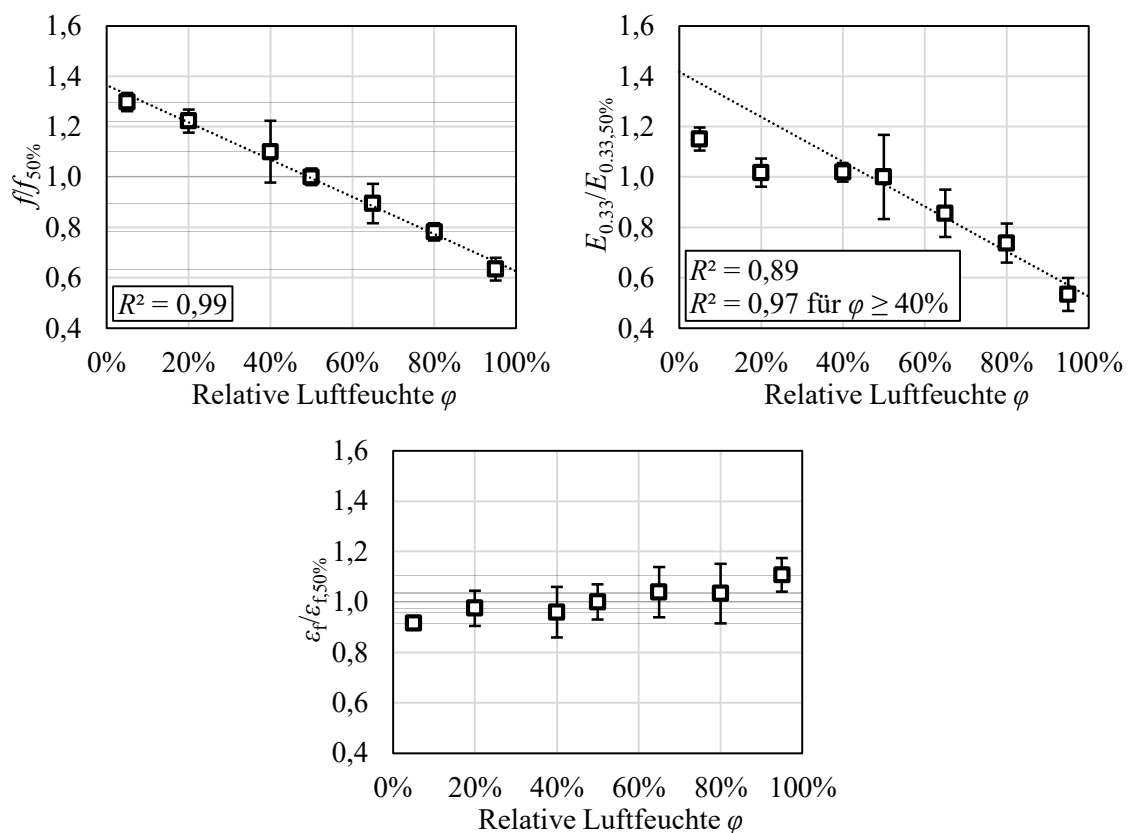


Abbildung 13: Normierte Mittelwerte der Festigkeits- und Verformungseigenschaften des Lehm-mauerwerks bei variierender relativer Luftfeuchte φ und einer konstanten Temperatur von $\theta = 23\text{ }^\circ\text{C}$



Bei Betrachtung der experimentell ermittelten Spannungs-Dehnungs-Linien des Lehm-mauerwerks ist wie bei den untersuchten Lehmsteinen ein deutlich nichtlinearer Ver- und Entfestigungsbereich zu

erkennen. Das Versagen der Dreisteinkörper charakterisierte sich in der Regel durch Rissbildung am mittleren Lehmstein sowie durch Ausbrechen der Mörtelfugen. Nach Erreichen der Druckfestigkeit fallen die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen nur moderat ab, was von einer hohen Duktilität des untersuchten Lehmmauerwerks zeugt. Darüber hinaus sei erwähnt, dass jeder Versuch manuell beendet wurde und nie ein schlagartiges Versagen des Probekörpers eintrat.

Bei steigender relativer Luftfeuchte lässt sich analog zu den Untersuchungen an den Einzelkomponenten des Lehmmauerwerks ein deutliches Abflachen der Spannungs-Dehnungs-Linien beobachten. Hieraus geht eine Abminderung der Druckfestigkeit sowie des Elastizitätsmoduls hervor. Bei Reduktion der relativen Luftfeuchte ist ein gegenläufiger Effekt in Form eines Anstiegs der genannten Materialkennwerte festzustellen. Bei Betrachtung der Dehnung bei Erreichen der Druckfestigkeit lässt sich ebenfalls ein leichter Anstieg mit zunehmender relativer Luftfeuchte verzeichnen. Die Auswirkung des Feuchteinflusses ist hierbei jedoch marginal und kann somit im Sinne einer effizienten Materialmodellierung in guter Näherung vernachlässigt werden. Wie in Abbildung 13 ebenfalls zu erkennen ist, besteht mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,99$ ein nahezu idealer linearer Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit und der vorherrschenden relativen Luftfeuchte. Eine analoge Feuchteabhängigkeit ist ebenfalls bei der Betrachtung des Elastizitätsmoduls in einem erhöhten Feuchtebereich von $40 \% \leq \varphi \leq 95 \%$ festzustellen.

Wie bereits im Rahmen der Untersuchungen des Lehmmauermörtels zu erkennen war, steigt der experimentell ermittelte Elastizitätsmodul bei relativen Luftfeuchten von $\varphi < 40 \%$ jedoch weniger stark an, als es ein linearer Ansatz der Feuchteabhängigkeit suggerieren würde. Diese Abweichung entsteht durch eine leicht konkave Krümmung im Anfangsbereich der Spannungs-Dehnungs-Linien und kann auf Kompaktierungsvorgänge innerhalb der Mörtelfugen zurückgeführt werden.

2.4.3 Untersuchungen zum Einfluss der Temperatur

Nachfolgend wird die Temperaturabhängigkeit der Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Lehmmauerwerk analysiert. Dazu sind die bei unterschiedlichen Temperaturen θ in Kombination mit einer konstanten relativen Luftfeuchte von $\varphi = 50 \%$ experimentell ermittelten Spannungs-Dehnungs-Linien in Abbildung 14 dargestellt. Die daraus abgeleiteten Festigkeits- und Verformungseigenschaften können Abbildung 15 entnommen werden. Die Fehlerindikatoren innerhalb dieser Darstellung kennzeichnen den Bereich einer Standardabweichung ober- und unterhalb des Mittelwerts der jeweiligen Prüfserie. Bei Prüfserien ohne erkennbaren Fehlerindikator beträgt die Standardabweichung der Prüfergebnisse weniger als 0,05.

Abbildung 14: Experimentell ermittelte Spannungs-Dehnungs-Beziehungen des Lehmmauerwerks bei variierender Temperatur θ und einer konstanten relativen Luftfeuchte von $\varphi = 50\%$

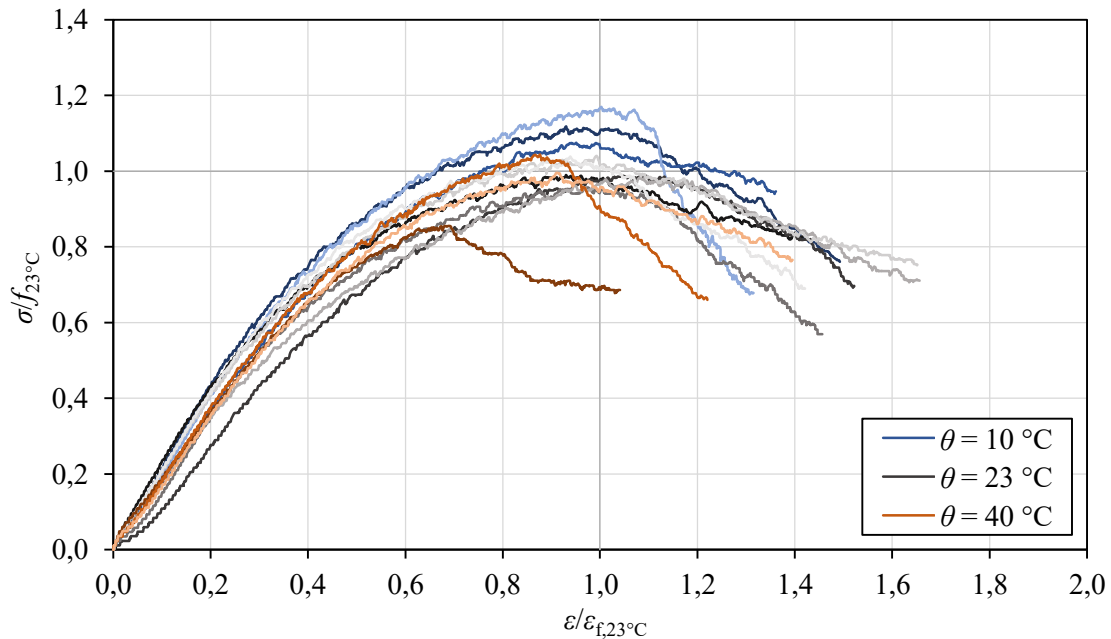
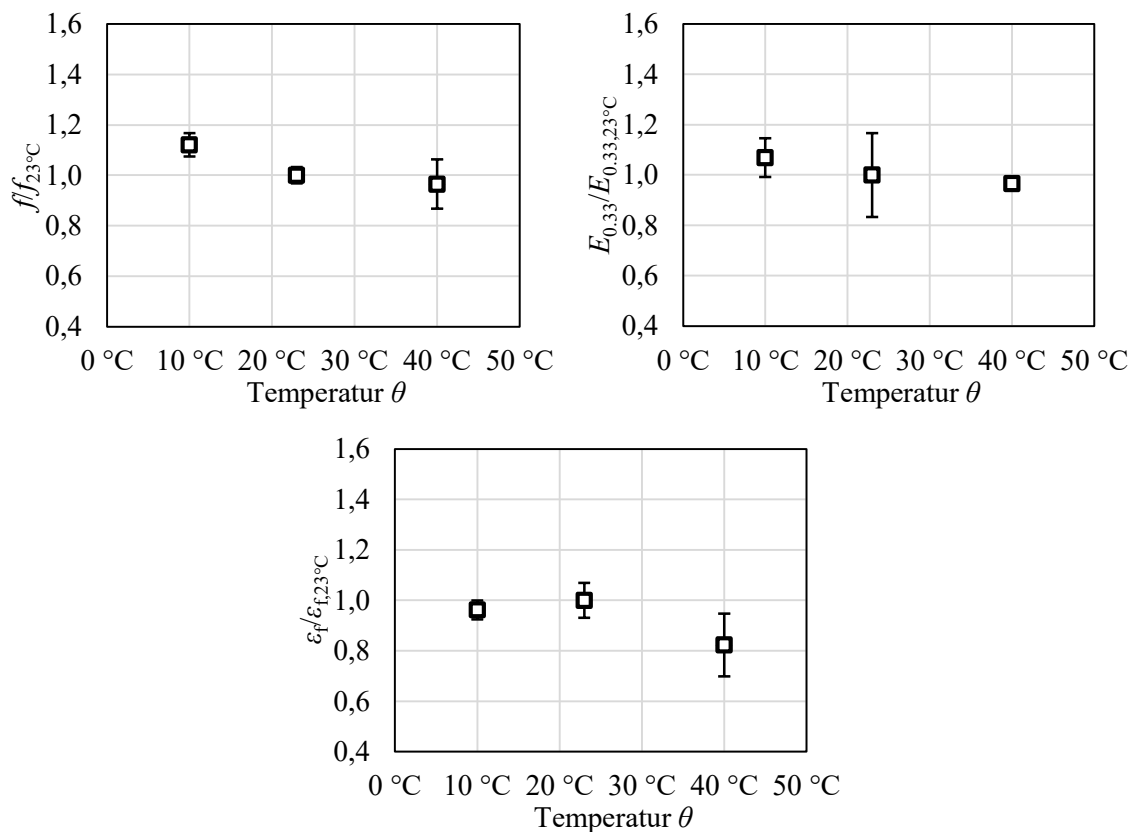


Abbildung 15: Normierte Mittelwerte der Festigkeits- und Verformungseigenschaften des Lehmmauerwerks bei variierender Temperatur θ und einer konstanten relativen Luftfeuchte von $\varphi = 50\%$



Bei Gegenüberstellung der Arbeitslinien lassen sich keine über die üblichen Materialstreuungen hinausgehenden Abweichungen zwischen den unterschiedlichen Konditionierungsklimata feststellen. Sowohl im Verfestigungs- als auch im Entfestigungsbereich wird kein signifikanter Temperatureinfluss

ersichtlich. Dies bestätigt sich ebenfalls bei Betrachtung der in Abhängigkeit der Temperatur dargestellten Festigkeits- und Verformungseigenschaften. Die Druckfestigkeit sowie der Elastizitätsmodul steigen ausgehend von dem Referenzwert bei $\theta = 23 \text{ °C}$ bei einer Temperatur von $\theta = 10 \text{ °C}$ nur geringfügig an, wohingegen bei einer Erhöhung der Temperatur auf $\theta = 40 \text{ °C}$ keine Veränderung der genannten Materialkennwerte festzustellen ist. Die experimentell ermittelten Dehnungen bei Erreichen der Druckfestigkeit bleiben bei einer Absenkung der Temperatur auf $\theta = 10 \text{ °C}$ konstant, fallen jedoch bei hoher Temperatur von $\theta = 40 \text{ °C}$ marginal ab. An dieser Stelle ist anzumerken, dass die Streuungen der Dehnungen in der letztgenannten Prüferserie vergleichsweise hoch sind und die dargestellte Reduktion der Dehnung bei Erreichen der Druckfestigkeit somit nur bedingt belastbar ist.

Aus den durchgeführten Tastversuchen kann bei konstanter relativer Luftfeuchte keine signifikante Temperaturabhängigkeit der Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Lehmmauerwerk innerhalb des baupraktisch relevanten Temperaturbereichs abgeleitet werden. Diese Erkenntnis ist in Einklang mit Ergebnissen von an Stampflehm durchgeführten Untersuchungen aus der Literatur [58]. Die Temperaturunabhängigkeit der Materialeigenschaften unstabilisierter Lehmbaustoffe lässt sich dabei durch zwei entgegengesetzte physikalische Effekte erklären. Einerseits erhöht sich die absolute Luftfeuchte bei steigender Temperatur in Kombination mit gleichbleibender relativer Luftfeuchte, was zunächst zu einer erhöhten äußeren Feuchteeinwirkung führt. Gleichzeitig wird jedoch der exotherme Prozess der Feuchteadsorption innerhalb eines mineralischen Baustoffs durch eine gesteigerte Bauteiltemperatur gehemmt. Wie bereits in [59–61] gezeigt werden konnte, heben sich diese gegenläufigen Effekte bei Massiv- bzw. Lehmbaustoffen nahezu vollständig auf, weshalb eine Temperaturänderung keine nennenswerten Auswirkungen auf die Materialfeuchte und somit auch nicht auf die mechanischen Eigenschaften unstabilisierten Lehmmauerwerks hat. Demzufolge muss die Umgebungs- bzw. Bauteiltemperatur nicht als zusätzlicher Einflussparameter bei der Materialmodellierung und der daran anknüpfenden Traglastberechnung berücksichtigt werden.

2.5 Fazit

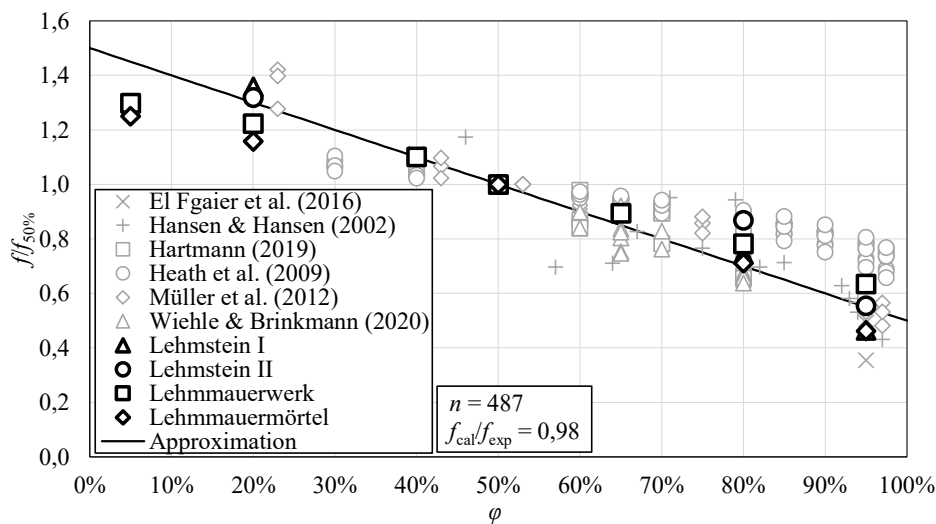
Basierend auf den Versuchsergebnissen aller im Rahmen des Projekts untersuchten Lehmbaustoffe kann ein analytischer Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit bzw. dem Elastizitätsmodul und der relativen Luftfeuchte φ nach Gl. (1) hergeleitet werden. Der sich daraus ergebende Modifikationsfaktor kann dazu verwendet werden, die bei normativen Klimabedingungen von $\varphi = 50 \text{ %}$ und $\theta = 23 \text{ °C}$ ermittelte Druckfestigkeit bzw. Elastizitätsmodul für davon abweichende Materialfeuchten umzurechnen und somit den Feuchteinfluss auf die genannten Festigkeits- und Verformungseigenschaften zu berücksichtigen.

$$\frac{f}{f_{50\%}} = \frac{E}{E_{50\%}} = 1,5 - \frac{\varphi [\%]}{100} \quad (1)$$

Um die Allgemeingültigkeit dieses Zusammenhangs zu überprüfen, wurde zusätzlich eine umfangreiche Literaturdatenbank mit weiteren Versuchsergebnissen in Bezug auf die Feuchteabhängigkeit der

mechanischen Materialeigenschaften unstabilisierter Lehmbaustoffe erstellt und mit den selbst generierten Versuchsdaten gegenübergestellt. Wie in Abbildung 16 für die bezogene Druckfestigkeit $f/f_{50\%}$ zu erkennen ist, kann die analytisch hergeleitete lineare Approximation gemäß Gl. (1) in guter Näherung auf beliebige unstabilisierte Lehmbaustoffe angewendet werden.

Abbildung 16: Lineare Approximation der bezogenen Druckfestigkeit $f/f_{50\%}$ für unstabilisierte Lehmbaustoffe



Neben den experimentellen Untersuchungen zur Feuchteabhängigkeit der Festigkeits- und Verformungseigenschaften wurde zudem eine ergänzende Versuchsreihe zur Temperaturabhängigkeit der mechanischen Materialparameter durchgeführt. Dabei konnte innerhalb eines praxisrelevanten Temperaturbereichs von $10\text{ °C} \leq \theta \leq 40\text{ °C}$ in Kombination mit einer konstanten relativen Luftfeuchte von $\varphi = 50\%$ keine nennenswerte Beeinflussung der Festigkeits- und Verformungseigenschaften durch Änderungen der Temperatur festgestellt werden. Es lässt sich somit schlussfolgern, dass die Bauteil- bzw. Umgebungstemperatur innerhalb baupraktischer Grenzen nicht als isolierter Einflussparameter bei der Materialmodellierung und der Berechnung der Tragfähigkeit von Lehmmauerwerk berücksichtigt werden muss.

Im Hinblick auf die im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens durchzuführende Zuverlässigkeitsanalyse lässt sich zudem festhalten, dass die unter Laborbedingungen ermittelten mechanischen Materialeigenschaften der analysierten Lehmbaustoffe nur geringe Streuungen aufwiesen. Für das untersuchte Lehmmauerwerk ergab sich bei Betrachtung der Druckfestigkeit ein über alle Versuchsreihen gemittelter Variationskoeffizient von 5,9 % und für den Elastizitätsmodul ein mittlerer Variationskoeffizient von 9,1 %. Basierend auf diesen Werten ist somit nicht davon auszugehen, dass die Zuverlässigkeit tragenden Lehmmauerwerks im Vergleich zu herkömmlichen Mauerwerksbaustoffen durch produktionsbedingte Einflüsse beeinträchtigt wird.

3 Tragfähigkeit druckbeanspruchten Lehmmauerwerks unter Feuchteinfluss

3.1 Einführung

Nachfolgend wird eine Methode zur Ermittlung der Tragfähigkeit druckbeanspruchten Lehmmauerwerks unter expliziter Berücksichtigung des Feuchteinflusses erarbeitet. Hierzu wird zunächst eine Möglichkeit zur wirklichkeitsnahen und repräsentativen Modellierung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung von Lehmmauerwerk dargelegt und anhand experimenteller Versuchsdaten validiert. Anschließend werden die in Kapitel 2.4 gewonnenen Erkenntnisse zur Klimaabhängigkeit der Festigkeits- und Verformungseigenschaften unstabilierten Lehmmauerwerks für die Entwicklung eines analytischen Berechnungsmodells zur Ermittlung der Querschnitts- und Systemtragfähigkeit von Lehmmauerwerkswänden verwendet.

Die Materialfeuchte des Lehmmauerwerks wird innerhalb des nachfolgenden Rechenmodells stets in Form der äquivalenten relativen Luftfeuchte φ berücksichtigt. Dieser Parameter ist über die materialspezifische Feuchtespeicherfunktion mit der volumen- oder massebezogenen Materialfeuchte verknüpft und entspricht daher der Materialfeuchte, welche sich innerhalb eines Lehmbaustoffs einstellt, wenn dieser innerhalb eines konstanten Umgebungsklimas mit einer relativen Luftfeuchte φ bis zum Erreichen seiner Massekonstanz gelagert werden würde.

3.2 Modellierung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung

Aufbauend auf den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen konnte ein Traglastmodell entwickelt werden, mit dessen Hilfe sich die Querschnitts- und Systemtragfähigkeit vorwiegend druckbeanspruchter Lehmmauerwerkswände unter expliziter Berücksichtigung des Feuchteinflusses realitätsnah ermitteln lassen. Als Grundlage des Berechnungsverfahrens diente das modifizierte einaxiale Materialmodell gemäß Gl. (2), welches sowohl das ausgeprägt nichtlineare und duktile Materialverhalten von Lehmmauerwerk abbilden sowie den Einfluss unterschiedlicher hygroskopischer Materialfeuchten auf die resultierende Spannungsverteilung explizit berücksichtigen kann. Die Basis der Modellierung bildete dabei der Ansatz zur Beschreibung von nichtlinearem Materialverhalten gemäß DIN EN 1992-1-1/NA [62]. Die maßgebende Eingangsgröße zur Adjustierung des Verlaufs dieser Arbeitslinie ist der bezogene Ursprungselastizitätsmodul k , welcher sich gemäß Gl. (5) aus dem Quotienten des Ursprungselastizitätsmoduls E_0 und der Druckfestigkeit f multipliziert mit der Dehnung bei Erreichen der Druckfestigkeit ε_f berechnen lässt. Des Weiteren kann der Entfestigungsbereich der Spannungs-Dehnungs-Beziehung bis zu der bezogenen maximalen Dehnung η_{ult} in die Modellierung einbezogen werden. Im Rahmen der Modellbildung wird dabei stets von einer konstanten Verteilung der Materialfeuchte innerhalb der betrachteten Lehmmauerwerkswand ausgegangen.

$$\frac{\sigma}{f_{50\%}}(\eta) = \begin{cases} \frac{f}{f_{50\%}} \cdot \frac{k \cdot \eta - \eta^2}{1 + (k-2) \cdot \eta} & \text{für } \eta \leq \eta_{\text{ult}} = 1,30 \\ 0 & \text{für } \eta > \eta_{\text{ult}} = 1,30 \end{cases} \quad (2)$$

Mit:

$$\eta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_f} \quad (3)$$

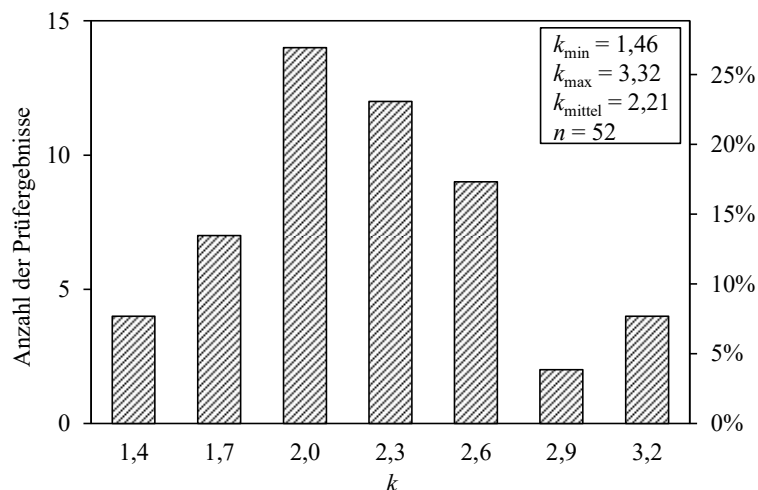
$$\eta_{\text{ult}} = \frac{\varepsilon_{\text{ult}}}{\varepsilon_f} \quad (4)$$

$$k = \frac{E_0}{E_f} = \frac{E_0}{f} \cdot \varepsilon_f \quad (5)$$

Der Vorfaktor $f/f_{50\%}$ beschreibt die feuchteabhängige lineare Skalierung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung in Richtung der Spannungsachse und kann für unterschiedliche Materialfeuchten näherungsweise mit Hilfe von Gl. (1) ermittelt werden. Durch diese Modifizierung des Spannungsverlaufs ist es möglich, die Arbeitslinie von Lehmmauerwerk für beliebige konstante Feuchteprofile zu approximieren.

Zur Ermittlung des anzusetzenden bezogenen Ursprungselastizitätsmoduls wurden Versuchsdaten aus der Literatur [24, 33] analysiert. In Abbildung 17 ist die Verteilung des bezogenen Ursprungselastizitätsmoduls der insgesamt 52 ausgewerteten Lehmmauerwerksprobekörper dargestellt.

Abbildung 17: Verteilung des bezogenen Ursprungselastizitätsmoduls k von unstabilisiertem Lehmmauerwerk basierend auf Literaturdaten

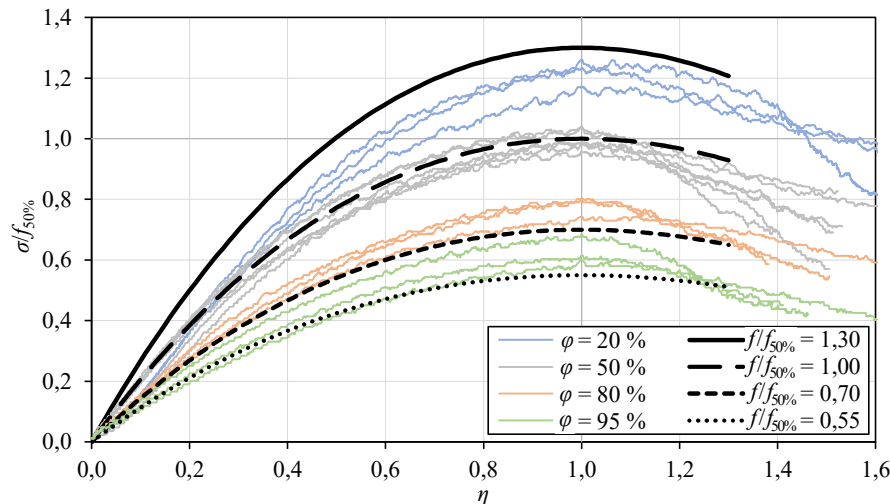


Basierend auf dieser Auswertung kann der bezogene Ursprungselastizitätsmodul für unstabilisiertes Lehmmauerwerk im Mittel mit $k = 2,2$ angenommen werden. Diese Annahme entspricht einem mittleren Verhältnis aus Elastizitätsmodul zu charakteristischer Mauerwerksdruckfestigkeit von $E/f_k = K_E = 440$ in Verbindung mit einer mittleren Dehnung bei Erreichen der Druckfestigkeit von $\varepsilon_f = 5,5$ ‰. Zudem kann

das duktile Entfestigungsverhalten von Lehmmauerwerk durch die Berücksichtigung einer bezogenen maximalen Dehnung von $\eta_{ult} = 1,3$ zutreffend abgebildet werden [26].

Zur Validierung des Werkstoffgesetzes gemäß Gl. (2) erfolgt in Abbildung 18 eine Gegenüberstellung mit den in diesem Projekt experimentell ermittelten Spannungs-Dehnungs-Linien von Lehmmauerwerk (vgl. Kapitel 2.4).

Abbildung 18: Vergleich der experimentell ermittelten Spannungs-Dehnungs-Beziehungen von Lehmmauerwerk (vgl. Kapitel 2.4) mit dem feuchteabhängigen Werkstoffgesetz nach Gl. (2)



Die Gegenüberstellung mit den Versuchsergebnissen aus Kapitel 2.4 zeigt, dass die Nichtlinearität der experimentell ermittelten Arbeitslinien durch das vorgeschlagene Werkstoffgesetz in allen Feuchtebereichen zutreffend abgebildet werden kann. Wie bereits aus Abbildung 16 hervor geht, wird die Mauerwerksdruckfestigkeit der untersuchten Stein-Mörtel-Kombination im Fall niedriger relativer Luftfeuchten durch die Näherungsgleichung der Feuchteabhängigkeit leicht überschätzt. Folglich liegt die Approximation der Spannungs-Dehnungs-Beziehung bei $\varphi = 20\%$ für diese individuelle Stein-Mörtel-Kombination ebenfalls geringfügig oberhalb der experimentell ermittelten Arbeitslinien. Da im Referenzklima von $\varphi = 50\%$ keine Skalierung der Spannungsachse erforderlich ist, werden die zugehörigen Versuchsergebnisse durch das vorgeschlagene Materialgesetz adäquat angenähert. Bei erhöhten relativen Luftfeuchten von $\varphi > 50\%$ wird die Druckfestigkeit des untersuchten Lehmmauerwerks von der linearen Annäherung der Feuchteabhängigkeit leicht unterschätzt (vgl. Abbildung 16), weshalb die approximierten Arbeitslinien für diesen Feuchtebereich einen etwas flacheren Verlauf als die betrachteten experimentellen Ergebnisse aufweisen.

Da aus der durchgeführten Gegenüberstellung nur geringfügige Diskrepanzen zwischen den experimentell ermittelten Arbeitslinien und dem vorgeschlagenen Materialmodell hervorgehen, ist das feuchteabhängige Materialgesetz gemäß Gl. (2), insbesondere unter dem Gesichtspunkt, dass hierdurch das durchschnittliche Materialverhalten beliebigen unstabilierten Lehmmauerwerks abgebildet werden soll, als zutreffend zu bewerten.

3.3 Wirklichkeitsnahe Traglastberechnung unter Berücksichtigung des Feuchteinflusses

3.3.1 Einführung

Zur Ermittlung der Tragfähigkeit druckbeanspruchten Lehmmauerwerks unter Berücksichtigung des Feuchteinflusses wird nachfolgend ein analytischer Berechnungsansatz dargelegt. Dabei ermöglicht die Methode den Einbezug beliebiger konstanter Feuchteverteilungen innerhalb des Wandquerschnitts. Um die zu erwartende Rechenzeit der darauf aufbauenden Zuverlässigkeitsanalyse zu minimieren, ist im vorliegenden Fall ein geschlossen lösbares Verfahren gegenüber einer iterativen numerischen Methode praktikabler und daher zu bevorzugen.

Das gewählte Vorgehen sieht daher zunächst die Ermittlung der Querschnitts- bzw. Systemtragfähigkeit mit Hilfe eines wirklichkeitsnahen Traglastmodells für überwiegend druckbeanspruchte Mauerwerkswände vor. Hierbei erfolgt noch kein Einbezug der tatsächlich vorherrschenden Materialfeuchte, sondern es wird in Anlehnung an das gängige Referenzkonditionierungsklima für Lehmbaumstoffe eine Materialfeuchte von $\varphi = 50\%$ unterstellt. Zur anschließenden Berücksichtigung abweichender Materialfeuchten erfolgt eine Modifizierung des Ausgangswerts der Querschnitts- oder Systemtragfähigkeit mit Hilfe des in Kapitel 2.5 dargestellten Zusammenhangs zwischen der Materialfeuchte und den Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Lehmmauerwerk. Dieser Anpassungsfaktor berücksichtigt die feuchtebedingte Skalierung der Spannungsverteilung und ermöglicht somit den expliziten Einbezug des Feuchteinflusses auf die Tragfähigkeit einer Lehmmauerwerkswand.

3.3.2 Ausgangswert der Querschnitts- und Systemtragfähigkeit

Als Basis des Berechnungsverfahrens wird zunächst ein Traglastmodell benötigt, welches die Querschnitts- und Systemtragfähigkeit druckbeanspruchter Lehmmauerwerkswände unter Berücksichtigung der zum Referenzkonditionierungsklima gehörenden Materialeigenschaften zutreffend ermitteln kann. Prinzipiell können hierfür alle wissenschaftlichen oder normativen Traglastmodelle verwendet werden, welche valide Ergebnisse für druckbeanspruchte Mauerwerkswände liefern. Im Sinne einer möglichst präzisen Berechnung des Ausgangswerts der Wandtragfähigkeit wird im Rahmen dieses Forschungsvorhabens das Approximationsverfahren nach Glock [63] herangezogen, welches es erlaubt, die Materialeigenschaften von Lehmmauerwerk detailliert in die Traglastermittlung einzubeziehen. Der Ausgangswert der Querschnittstragfähigkeit Φ_1 lässt sich auf dieser Grundlage mit Hilfe der bezogenen Lastexzentrizität e/t und des Plastizitätsfaktors V nach Gl. (6) berechnen. Letzterer berücksichtigt den bezogenen Ursprungsmodul k sowie die bezogene maximale Dehnung η_{ult} der zugrunde liegenden Materialmodellierung.

$$\Phi_1 = V \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{e}{t} \right) \quad (6)$$

Mit:

$$V \approx 1 + \frac{\exp\left(-6 \cdot (\eta_{ult} \cdot (k+1) + 1) \cdot \frac{e_1}{t}\right) - 1}{\frac{k+2}{k} \cdot (\eta_{ult} \cdot (k+1) - 1)^2 + 1} \quad (7)$$

Weiterhin lässt sich der Ausgangswert der Systemtragfähigkeit Φ_{II} nach Glock [63] unter Einbezug physikalischer und geometrischer Nichtlinearitäten sowie unter Berücksichtigung des wirklichkeitsnahen Krümmungsverlaufs folgendermaßen ermitteln:

$$\Phi_{II} = \Phi_{II,cr} \cdot \chi_1 \cdot \chi_2 \geq \Phi_{II,sb} \quad (8)$$

Der Basiswert des Traglastfaktors $\Phi_{II,cr}$ beschreibt hierbei die bezogene Systemtragfähigkeit eines vollständig gerissenen Querschnitts unter Vernachlässigung der Biegezugfestigkeit ($f_t/f = 0$) und ohne Berücksichtigung des Entfestigungsbereichs der Arbeitslinie im Druckbereich ($\eta_{ult} = 1$). Die bezogene Lastexzentrizität e_1/t beschreibt dabei die anfängliche Lastexzentrizität nach Theorie I. Ordnung. Die Berechnung von $\Phi_{II,cr}$ erfolgt durch Gl. (9):

$$\Phi_{II,cr} = \frac{\Phi_{I,0}}{0,3 \cdot \left(\frac{\frac{h_{ef}}{t} \cdot \sqrt{\varepsilon_f}}{1 - 2 \cdot \frac{e_1}{t}} \right)^{\frac{3,1}{k^{0,3}}} + 1} \quad (9)$$

Die Bezugsquerschnittstragfähigkeit $\Phi_{I,0}$ ergibt sich bei Ansatz von $\eta_{ult} = 1$ gemäß Gl. (6) und (7) zu:

$$\Phi_{I,0} = V_{(\eta_{ult}=1)} \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{e_1}{t}\right) = \left(1 + \frac{\exp\left(-6 \cdot (k+2) \cdot \frac{e_1}{t}\right) - 1}{(k+1)^2}\right) \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{e_1}{t}\right) \quad (10)$$

Der erste Anpassungsfaktor χ_1 aus Gl. (8) adjustiert die resultierende Systemtragfähigkeit bei kleinen Lastexzentrizitäten unter Berücksichtigung des Einflusses eines nicht oder nur teilweise gerissenen Querschnitts.

$$\chi_1 = \frac{\min \chi_1 - 1}{2} \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \frac{h_{ef}}{t} \cdot \sqrt{\varepsilon_f}}{1 - 2 \cdot \frac{e_1}{t}} - 2\right) + \frac{\min \chi_1 + 1}{2} \quad (11)$$

Mit:

$$\frac{3}{4} \leq \min \chi_1 = \frac{k \cdot (k+2)}{k \cdot (k+2) + \exp\left(-6 \cdot (k+2) \cdot \frac{e_1}{t}\right)} \leq 1 \quad (12)$$

Mit Hilfe des zweiten Anpassungsfaktors χ_2 aus Gl. (8) lässt sich der Entfestigungsbereich der zugrunde liegenden Arbeitslinie in die Berechnung einbeziehen. Hierdurch lässt sich die Systemtragfähigkeit im Bereich des Materialversagens, also im Fall gedrungener Mauerwerkswände, deutlich steigern. Da die Querschnittstragfähigkeit bei hohen Wandschlankheiten infolge des maßgebenden Stabilitätsversagens nicht vollständig ausgeschöpft wird, hat die Berücksichtigung des Entfestigungsbereichs in diesem Fall keinerlei Auswirkungen auf die resultierende Systemtragfähigkeit.

$$\chi_2 = (\max \chi_2 - 1) \cdot \exp \left(-2 \cdot \left(\frac{\frac{h_{\text{ef}}}{t} \cdot \sqrt{\varepsilon_f}}{1 - 2 \cdot \frac{e_1}{t}} \right)^2 \right) + 1 \quad (13)$$

Mit:

$$1 \leq \max \chi_2 = \frac{V_{(\eta_{\text{ult}})}}{V_{(\eta_{\text{ult}}=1)}} = \frac{1 + \frac{\exp \left(-6 \cdot (\eta_{\text{ult}} \cdot (k+1) + 1) \cdot \frac{e_1}{t} \right) - 1}{k+2} \cdot (\eta_{\text{ult}} \cdot (k+1) - 1)^2 + 1}{1 + \frac{\exp \left(-6 \cdot (k+2) \cdot \frac{e_1}{t} \right) - 1}{(k+1)^2}} \leq \frac{4}{3} \quad (14)$$

Die geringe Biegezugfestigkeit von Mauerwerk senkrecht zur Lagerfuge erhöht die resultierende Querschnittstragfähigkeit nur marginal und kann demzufolge bei kleinen und mittleren Wandschlankheiten in guter Näherung vernachlässigt werden. Im Fall von Stabilitätsversagen vergrößert ein Ansatz der Biegezugfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge jedoch den ungerissenen Bereich des Wandquerschnitts, was eine Erhöhung der effektiven Biegesteifigkeit zur Folge hat und somit die Querverformungen und damit auch die Zusatzbeanspruchungen nach Theorie II. Ordnung verringert. Um diesen Einfluss zu berücksichtigen, stellt $\Phi_{\text{II, sb}}$ für hohe Wandschlankheiten in Kombination mit Lastexzentrizitäten von $e_1/t \geq 0,20$ einen unteren Grenzwert der bezogenen Systemtragfähigkeit dar:

$$\Phi_{\text{II, sb}} = -\frac{1}{2} \cdot \left| \frac{f_t}{f} \right| \cdot \left(1 - \frac{k}{50} \right) + \frac{k}{3} \cdot \left(1 - \frac{k}{50} \right) \cdot \frac{1}{\left(\frac{h_{\text{ef}}}{t} \right)^2 \cdot \varepsilon_f} \cdot \left[1 - 6 \cdot \frac{e_1}{t} + \sqrt{\left(1 - 6 \cdot \frac{e_1}{t} - \frac{3}{2} \cdot \frac{|f_t/f|}{k} \cdot \left(\frac{h_{\text{ef}}}{t} \right)^2 \cdot \varepsilon_f \right)^2 + 6 \cdot \frac{|f_t/f|}{k} \cdot \left(\frac{h_{\text{ef}}}{t} \right)^2 \cdot \varepsilon_f} \right] \quad (15)$$

Hierbei liegt der Berechnung ein linearer Verlauf der Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung mit sprödem Entfestigungsverhalten zugrunde. Um einen stetigen Übergang zwischen Druck- und Zugbereich der bezogenen Arbeitslinie zu gewährleisten, wird der Zugelastizitätsmodul innerhalb des Modells vereinfachend identisch zum Ursprungselastizitätsmodul unter Druckbeanspruchung angenommen.

3.3.3 Berücksichtigung des Feuchteinflusses auf die Wandtragfähigkeit

Bei der Berechnung der aufnehmbaren Normalkraft einer feuchtebeeinflussten Lehm-mauerwerkswand $N_{R,\varphi}$, kann die vorherrschende Materialfeuchte φ mit Hilfe des Zusammenhangs zwischen der Materialfeuchte und der Druckfestigkeit gemäß Kapitel 2.5 berücksichtigt werden. Die Ermittlung der aufnehmbaren Normalkraft erfolgt dementsprechend durch Multiplikation des feuchteabhängigen Anpassungsfaktors $f/f_{50\%}$ gemäß Gl. (1) mit dem Ausgangswert der Querschnitts- oder Systemtragfähigkeit $\Phi_{I,II}$, der Querschnittsfläche A sowie der Druckfestigkeit des Lehm-mauerwerks bei den normativen Referenzkonditionierungsbedingungen $f_{50\%}$:

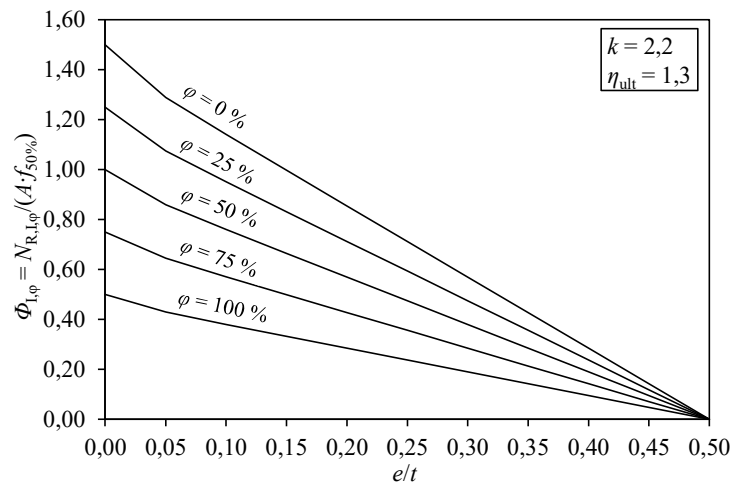
$$N_{R,\varphi} = \frac{f}{f_{50\%}} \cdot \Phi_{I,II} \cdot A \cdot f_{50\%} = \left(1,5 - \frac{\varphi [\%]}{100}\right) \cdot \Phi_{I,II} \cdot A \cdot f_{50\%} \quad (16)$$

Der feuchteabhängige Anpassungsfaktor $f/f_{50\%}$ modifiziert dabei die bei einer relativen Luftfeuchte von $\varphi = 50\%$ ermittelte Mauerwerksdruckfestigkeit und ermöglicht somit die explizite Berücksichtigung des Feuchteinflusses auf die resultierende Tragfähigkeit des Lehm-mauerwerks.

Da die Druckfestigkeit und der Elastizitätsmodul eine annähernd identische Abhängigkeit von der Materialfeuchte aufweisen, kann das Verhältnis dieser beiden Kennwerte als feuchteunabhängig betrachtet werden ($E/f(\varphi) \approx \text{const.}$). In Verbindung mit der gleichzeitigen Feuchteunabhängigkeit der Dehnungsachse der Spannungs-Dehnungs-Verteilung ($\varepsilon(\varphi) \approx \text{const.}$) ergibt sich gemäß Gl. (5) ebenfalls eine Feuchteunabhängigkeit des bezogenen Ursprungmoduls k . Daraus resultiert, dass die Nichtlinearität der Arbeitslinie von Lehm-mauerwerk nicht von Änderungen der Materialfeuchte beeinflusst wird. Es lässt sich somit schlussfolgern, dass die Berechnung der Tragfähigkeit gemäß Gl. (7) bei Annahme einer konstanten Verteilung der Materialfeuchte innerhalb des Wandquerschnitts sowohl zur Ermittlung der Querschnittstragfähigkeit als auch zur Ermittlung der Systemtragfähigkeit von Lehm-mauerwerkswänden angewendet werden kann.

Zur Veranschaulichung des Feuchteinflusses ist die bezogene Querschnittstragfähigkeit von feuchtebeeinflusstem Lehm-mauerwerk in Abbildung 19 exemplarisch für unterschiedliche Materialfeuchten φ in Abhängigkeit der bezogenen Lastexzentrizität e/t dargestellt.

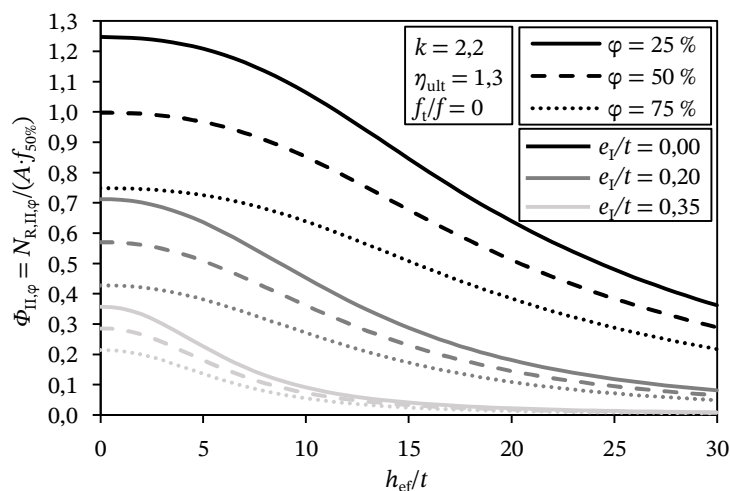
Abbildung 19: Bezogene Querschnittstragfähigkeit von Lehm-mauerwerk für verschiedene Materialfeuchten φ in Abhängigkeit der bezogenen Lastexzentrizität e/t



Bei Betrachtung der Querschnittstragfähigkeit ist ein maßgeblicher Feuchteinfluss infolge der durch Änderungen der Materialfeuchte hervorgerufenen linearen Skalierung der Spannungsverteilung ersichtlich. Die zu beobachtende Steigungsänderung des Verlaufs der Querschnittstragfähigkeit im Bereich niedriger Lastexzentrizitäten wird dahingegen nicht durch den Feuchteinfluss bedingt, sondern ergibt sich aus dem Übergang vom ungerissenen hin zu einem gerissenen Wandquerschnitt bei steigender Lastexzentrizität.

Weiterhin wird in Abbildung 20 der Feuchteinfluss auf die Systemtragfähigkeit exemplarisch illustriert. Hierfür wurde die Wandtragfähigkeit für verschiedene Materialfeuchten φ sowie unterschiedliche bezogene Lastexzentrizitäten e_i/t in Abhängigkeit der Wandschlankheit h_{ef}/t berechnet und innerhalb eines Diagramms dargestellt.

Abbildung 20: Bezogene Systemtragfähigkeit von Lehm-mauerwerk für verschiedene Materialfeuchten φ sowie unterschiedliche bezogene Lastexzentrizitäten e_i/t in Abhängigkeit der Wandschlankheit h_{ef}/t



Der Traglastvergleich zeigt, dass eine Änderung der Materialfeuchte ebenfalls einen erheblichen Einfluss auf die resultierende Systemtragfähigkeit von Lehm-mauerwerk ausübt. Dabei ist die absolute Änderung

der Systemtragfähigkeit bei kleinen Lastexzentrizitäten und geringen Wandschlankheiten am ausgeprägtesten. Bei großen Lastexzentrizitäten und hoher Wandschlankheit ist die Wandtragfähigkeit dagegen systembedingt bereits so niedrig, dass der absolute Einfluss der Materialfeuchte kaum relevant ist. Nichtsdestotrotz ist die relative Traglaständerung infolge variierender Materialfeuchten jedoch bei beliebigen Kombinationen aus Wandschlankheit und Lastexzentrizität identisch und entspricht ausgehend vom normativen Referenzkonditionierungsklima dem feuchteabhängigen Anpassungsfaktor $f/f_{50\%}$ gemäß Gl. (1).

4 Hygrothermische Analysen praxisüblicher Wandaufbauten

4.1 Einführung

Um die auftretende Materialfeuchte innerhalb praxisüblicher Lehm-mauerwerkswände sowie deren zeitliche Streuung zu ermitteln, werden nachfolgend die Ergebnisse instationärer hygrothermischer Simulationen unter Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen dargelegt. Die in diesem Kapitel gewonnenen Erkenntnisse bilden im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens die Grundlage zur Kalibrierung von statistischen Verteilungsfunktionen der Materialfeuchte. Hierdurch lässt sich die Materialfeuchte im Rahmen der durchzuführenden Zuverlässigkeitsanalyse für verschiedene Anwendungsfälle als eigenständige Zufallsvariable modellieren und die damit einhergehenden Streuungen der Wandtragfähigkeit bei der Beurteilung der Zuverlässigkeit explizit berücksichtigen.

Im Zuge der nachfolgenden Ausführungen werden eingangs die zugrunde liegenden allgemeinen Simulationsrandbedingungen, die verwendeten Materialmodelle sowie die Klimarandbedingungen dargelegt. Daraufhin wird die Materialfeuchte für repräsentative Anwendungsfälle von Lehm-mauerwerk über den Jahresverlauf ermittelt und analysiert.

Die Simulationsdurchführung orientiert sich hierbei an den Vorgaben des WTA Merkblatt 6-1 [64], des WTA Merkblatt 6-2 [65] sowie der DIN EN 15026 [66]. Für die instationären hygrothermischen Analysen wird das Programm DELPHIN (Version 6.1.2) verwendet, welches vom Institut für Bauklimatik der Technischen Universität Dresden entwickelt wurde und die numerische Simulation gekoppelter Wärme-, Feuchte- und Stofftransporte in kapillarporösen Baustoffen erlaubt.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die nachfolgenden Analysen grundsätzlich auf üblichen Feuchtespeicher- und Feuchtetransportmechanismen mineralischer Baustoffe beruhen. Untersuchungen aus der Literatur deuten darauf hin, dass sich diese Gesetzmäßigkeiten sowie die damit verbundenen modelltechnischen Vereinfachungen näherungsweise auf unstabilierte Lehmbaustoffe übertragen lassen [44].

4.2 Allgemeine Simulationsrandbedingungen

Die nachfolgend dargelegten hygrothermischen Simulationen erfolgten eindimensional unter der Annahme, dass der Feuchteverlauf über die Wandhöhe und -länge keine Veränderung erfährt. Die zugrunde gelegten allgemeinen Simulationskonstanten sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Die dort aufgeführten Wärme- und Wasserdampfübergangskoeffizienten wurden WTA Merkblatt 6-2 [65] entnommen und berücksichtigen die bauphysikalisch üblichen Übergangsbedingungen zwischen der untersuchten Wandkonstruktion und der Umgebungsluft. Die Wärmeübergangskoeffizienten umfassen dabei sowohl Wärmetransporteffekte infolge Konvektion als auch infolge langwelliger Wärmeabstrahlung. Der zugrunde liegende Adsorptionskoeffizient für Solarstrahlung wurde DIN V 18599-2 [67] entnommen und geht von einer hellen Wandoberfläche aus. Diese Annahme schätzt die solaren Trocknungseffekte konservativ ab und liegt somit für die folgenden Analysen des Feuchtegehalts

auf der sicheren Seite. Weiterhin wurde gemäß WTA Merkblatt 6-2 [65] davon ausgegangen, dass etwa 30 % des einwirkenden Schlagregens beim Auftreffen auf die Bauteiloberfläche abtropft und nicht vom Oberflächenmaterial aufgenommen werden kann.

Tabelle 3: Allgemeine Simulationsrandbedingungen

Parameter		Wert
Wärmeübergangskoeffizient (Konvektion und Strahlung)	Innen	8 W/(K·m ²)
	Außen	17 W/(K·m ²)
Wasserdampfübergangskoeffizient	Innen	25·10 ⁻⁹ s/m
	Außen	75·10 ⁻⁹ s/m
Adsorptionskoeffizient für Solarstrahlung		0,4
Spritzwasserfaktor für Schlagregen		0,7

Die im Zuge der numerischen Simulation notwendige Diskretisierung des untersuchten Wandaufbaus wurde dynamisch mit Netzelementbreiten in einem Bereich von $b_n = 1 \text{ mm} - 50 \text{ mm}$ durchgeführt. Um die Feuchteänderungen an den Bauteilrändern sowie den einzelnen Schichtgrenzen präzise erfassen zu können, erfolgte eine Netzverdichtung in den genannten Bereichen. Zur effizienteren Berechnung wurde der Verdichtungsgrad in Richtung der jeweiligen Schichtmitten sukzessive verringert.

Die Simulationsergebnisse wurden in Zeitschritten von $\Delta t = 6 \text{ h}$ ausgegeben. Hierdurch konnte sichergestellt werden, dass der tageszeitliche Einfluss auf die zu ermittelnde Materialfeuchte hinreichend genau abgedeckt wird. Nach Abschluss der Berechnung erfolgte die Ausgabe der generierten Ergebnisse für alle Zeitschritte innerhalb des letzten Simulationsjahres. Hierbei wurde darauf geachtet, dass sich der Verlauf der Materialfeuchte im Ausgabejahr gegenüber dem Vorjahr nicht verändert hat und somit von einem eingeschwungenen Feuchtezustand auszugehen ist. Die Materialfeuchte wurde anschließend für jeden Zeitschritt in Form des Feuchtegehalts als lokaler Mittelwert aller Netzelemente innerhalb der Lehmmauerwerksschicht ausgegeben. Zur konsistenten Darstellung der Ergebnisse wurde die Materialfeuchte einheitlich als äquivalente relative Luftfeuchte φ angegeben. Diese Angabe kann mit Hilfe der materialspezifischen Feuchtespeicherfunktion aus der absoluten Materialfeuchte ermittelt werden.

Da die Ergebnisauswertung ausschließlich im eingeschwungenen Feuchtezustand erfolgte, waren die Startbedingungen der Materialfeuchte und der Bauteiltemperatur sowie der Simulationszeitraum für die Ergebnisse der Untersuchungen irrelevant. Es sei angemerkt, dass es in der Praxis nach der Herstellung einer Lehmmauerwerkswand durch das Vornässen der Steine und den Auftrag von Mauer- und Putzmörtel zu kurzfristig erhöhten Materialfeuchten kommen kann. Tastsimulationen haben jedoch gezeigt, dass der eingeschwungene Feuchtezustand von Lehmbaustoffen zügig erreicht wird, sodass eine kurzzeitig erhöhte Anfangsfeuchte im Hinblick auf die gesamte Lebensdauer eines Lehmgebäudes nicht ausschlaggebend ist und somit näherungsweise vernachlässigt werden kann.

4.3 Materialmodellierung

Vorbereitend zur Erstellung eines geeigneten Materialmodells wurden maßgebende bauphysikalische Eingangsparameter zur numerischen Modellbildung von Lehmmauerwerk definiert. Da der Fokus der durchzuführenden hygrothermischen Analysen auf der Ermittlung praxisrelevanter Materialfeuchten sowie deren statistischen Streuungen liegt, sind insbesondere die Feuchtetransport- und Feuchtespeichereigenschaften der untersuchten Lehmstoffe von Relevanz. Hierzu gehören insbesondere die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ , der Wasseraufnahmekoeffizient W_w und die Feuchtespeicherfunktion $u(\varphi)$. Um auch das Wärmetransport- und Wärmespeicherverhalten im Rahmen der Simulation zutreffend abbilden zu können, sind darüber hinaus Parameter wie die Wärmeleitfähigkeit λ_0 , die spezifische Wärmekapazität c sowie die Porosität n bzw. die Rohdichte ρ entscheidend.

Die zur Materialmodellierung erforderlichen Kennwerte wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Bauklimatik der Technischen Universität Dresden für die im Rahmen dieses Forschungsprojekts untersuchten und in Kapitel 2 beschriebenen Lehmstoffe (Lehmstein I, Lehmstein II und Lehmmauermörtel) ermittelt und zur numerischen Modellierung in zugehörige Materialdateien überführt. Die experimentelle Ermittlung der erforderlichen Kennwerte sowie die Kalibrierung und Validierung der entsprechenden Materialmodelle mittels Wasseraufnahme- und Verdunstungsversuchen wurden im Rahmen eines Gutachtens dokumentiert (siehe Anlage 2 - Gutachten zu den hygrothermischen Materialeigenschaften der untersuchten Lehmstoffe des Instituts für Bauklimatik der TU Dresden). In Tabelle 4 sind die ermittelten hygrothermischen Materialparameter der untersuchten Lehmstoffe zusammengefasst.

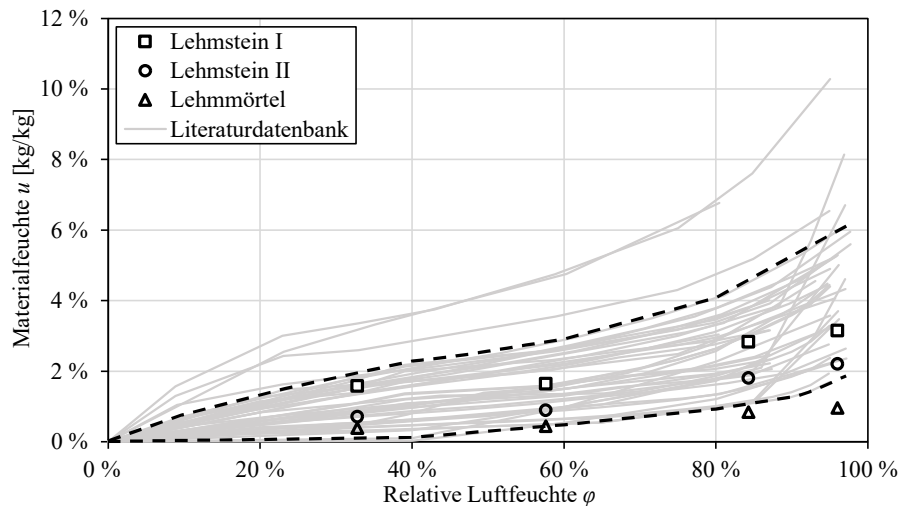
Tabelle 4: Hygrothermische Materialparameter der untersuchten Lehmstoffe

Hygrothermische Materialparameter			Lehmstein I	Lehmstein II	Lehmmörtel
Bezeichnung	Symbol	Einheit			
Porosität	n	m^3/m^3	0,36	0,32	0,31
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	μ	-	14,2	14,9	16,5
Wasseraufnahmekoeffizient	W_w	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$	12,2	4,3	4,8
Rohdichte	ρ	g/cm^3	1,70	1,80	1,83
Spezifische Wärmespeicherkapazität	c	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	834	869	801
Wärmeleitfähigkeit (trocken)	λ_0	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	0,88	0,86	1,26

Weiterhin sind in Abbildung 21 die experimentell ermittelten Feuchtespeicherfunktionen der untersuchten Lehmstoffe dargestellt. Um einordnen zu können, welche der drei Materialien das allgemeine Feuchtespeicherverhalten unstabilisierter Lehmstoffe im Mittel am zutreffendsten abbilden können, wurden die Feuchtespeicherfunktionen der untersuchten Lehmstoffe zudem mit einer umfangreichen Literaturdatenbank gegenübergestellt. Bestandteil dieser Literaturdatenbank sind Feuchtespeicherfunktionen von insgesamt 42 verschiedenen unstabilisierten Lehmsteinen (vgl. [19, 25, 29, 31, 35–44, 68]). Sofern in einer Literaturquelle sowohl Ad- als auch Desorptionsisotherme verfügbar waren, wurden diese im Rahmen der Auswertung gemittelt und zu einer Kurve zusammengefasst.

Innerhalb des Diagramms wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit auf eine Unterscheidung der einzelnen Literaturquellen verzichtet.

Abbildung 21: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Feuchtespeicherfunktionen von Lehmstein I, Lehmstein II und Lehmmörtel mit Feuchtespeicherfunktionen unstabilisierter Lehmbaustoffe aus der Literatur



Es ist zu erkennen, dass sich die Messwerte von Lehmstein I und Lehmstein II durchgehend innerhalb des gestrichelt dargestellten üblichen Wertekorridors für unstabilisierte Lehmbaustoffe befinden. Die Feuchtespeicherfunktion des Lehmmauermörtels verläuft dagegen deutlich flacher als die der Lehmsteine und liegt daher im Bereich hoher relativer Luftfeuchten nicht mehr innerhalb des üblichen Wertekorridors der Literaturdatenbank.

Da Lehmstein I das mittlere Feuchtespeicherverhalten unstabilisierter Lehmbaustoffe basierend auf der durchgeführten Gegenüberstellung am zutreffendsten abbildet, ist es naheliegend das Materialmodell von Lehmstein I für die nachfolgenden hygrothermischen Simulationen zu verwenden. Um diese Annahme zusätzlich abzusichern, wurden die wesentlichen hygrothermischen Materialkennwerte von Lehmstein I in Tabelle 5 mit dem üblichen Wertebereich für unstabilisierte Lehmbaustoffe aus der Literatur verglichen.

Tabelle 5: Vergleich der experimentell ermittelten hygrothermischen Materialeigenschaften von Lehmstein I mit Literaturdaten

Hygrothermische Materialparameter		Literaturdaten				Lehmstein I
Bezeichnung	Einheit	Min.	MW	Max.	Quelle	
Porosität	m ³ /m ³	0,25	-	0,45	[5, 25, 38, 44, 46]	0,36
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	-	3,0	8,9	16,4	[5, 25, 31, 35, 36, 38, 39, 41, 47, 48]	14,2
Wasseraufnahmekoeffizient	kg/(m ² ·h ^{0,5})	1,2	-	13,4	[5, 35, 45, 46, 69]	12,2
Rohdichte	g/cm ³	1,63	1,92	2,10	[29, 31, 35, 38, 39, 41–44, 46, 69]	1,70
Spezifische Wärmespeicherkapazität	J/(kg·K)	542	828	990	[5, 25, 29, 39, 47]	834
Wärmeleitfähigkeit (trocken)	W/(m·K)	-	0,82	-	[47, 48]	0,88

Durch die tabellarische Gegenüberstellung lässt sich bestätigen, dass sich die experimentell ermittelten, hygrothermischen Materialparameter von Lehmstein I innerhalb der üblichen Wertebereiche für unstabilisierte Lehmbaumstoffe bewegen. Der Wasseraufnahmekoeffizient von Lehmstein I liegt zwar im oberen Bereich der Literaturwerte, auf Grund der großen Streubreite dieses Materialparameters in Verbindung mit der zugehörigen komplizierten experimentellen Versuchsdurchführung kann der Messwert von Lehmstein I für die nachfolgenden Simulationen dennoch als geeigneter Eingangswert angesehen werden. Weiterhin sei angemerkt, dass ein größerer Wasseraufnahmekoeffizient zu einer schnelleren Durchfeuchtung des Lehmmauerwerks bei Kontakt mit Flüssigwasser führt, weshalb die Annahme eines Wertes im oberen Wertebereich hinsichtlich des Befeuchtungsverhaltens auf der sicheren Seite liegt.

Basierend auf den durchgeführten Untersuchungen kann festgehalten werden, dass das generierte Materialmodell von Lehmstein I für die Verwendung in den nachfolgenden Simulationen geeignet ist und das mittlere Materialverhalten unstabilisierter Lehmbaumstoffe zutreffend abbildet. Die zur Durchführung der hygrothermischen Simulationen zusätzlich verwendeten Materialmodelle für Putze und Dämmstoffe wurden der programminternen Materialbibliothek von DELPHIN entnommen.

4.4 Klimarandbedingungen

Für die Beurteilung der Bauteilfeuchte von Außenwänden sollte die Schlagregenbeanspruchung im Rahmen der hygrothermischen Simulationen zutreffend abgebildet werden. Die einwirkende Schlagregenmenge wird dabei wesentlich von Faktoren wie der Normalregenmenge, der Windgeschwindigkeit und -richtung sowie der Wandausrichtung beeinflusst. Um diese Einflussparameter adäquat berücksichtigen zu können, wurden innerhalb der instationären Analysen hygrothermische Referenzjahre (HRY) [70] verwendet, welche speziell für feuchtetechnische Beurteilung von Bauteilen mittels numerischer Simulationen entwickelt wurden. Sie setzen sich aus stündlichen Klimadaten zusammen und unterteilen Deutschland in 11 verschiedene Klimazonen. Jedes hygrothermische Referenzjahr besteht dabei aus 12 repräsentativen mittleren Monaten, welche aus Klimaaufzeichnungen der Jahre 2003 bis 2010 abgeleitet wurden. Die jährliche Schlagregenmenge R_s

kann dabei gemäß DIN EN ISO 15927-3 [71] aus den Klimadaten der hygrothermischen Referenzjahre berechnet werden und bezieht sich auf einen Quadratmeter Wandfläche einer senkrechten Wand in einer Referenzhöhe von 10 m über der Geländeoberkante. Auf eine Lageanpassung der hygrothermischen Referenzjahre mit Hilfe des Lokalklimagenerators wurde im Rahmen der Simulationsdurchführung verzichtet.

Im Zuge der nachfolgend dargestellten Untersuchungen wurde bei der Betrachtung von Außenbauteilen mit außenliegender Wärmedämmung das hygrothermische Referenzjahr des Standorts Stötten angesetzt. Dieser Klimadatensatz liegt gemäß DIN 4108-3 [72] innerhalb der Schlagregenbeanspruchungsgruppe III und stellt somit im Fall einer westwärts ausgerichteten Außenwand eine für Deutschland hohe Schlagregenbeanspruchung mit einer jährlichen Schlagregenmenge von $R_s = 1060$ mm/a dar. Um im Fall einer Außenwand mit kapillaraktiver Außendämmung den Einfluss unterschiedlicher Schlagregenbeanspruchungen auf die resultierende Materialfeuchte abbilden zu können, wurde dieser Wandaufbau zusätzlich zu einer hohen Schlagregenbeanspruchung auch für eine geringe Schlagregenbeanspruchung am Standort Kassel mit einer jährlichen Schlagregenmenge von $R_s = 190$ mm/a untersucht.

Weil tragende Lehm-mauerwerkswände mit innenliegender Wärmedämmung gemäß DIN 18945 [54] standardmäßig nur mit Lehmsteinen der Anwendungsklasse Ia oder Ib in der Schlagregenbeanspruchungsgruppe I ausgeführt werden dürfen, erfolgte die hygrothermische Analyse dieses Wandaufbaus unter Ansatz des Klimadatensatzes des Standorts Potsdam ($R_s = 391,5$ mm/a).

Da das Innenraumklima stark vom jeweiligen Nutzerverhalten sowie der vorhandenen Gebäudeausstattung und -einrichtung abhängt, wurden für dessen Modellierung keine tatsächlichen Messwerte verwendet. Stattdessen erfolgte die Modellierung des Innenraumklimas gemäß WTA Merkblatt 6-2 [65] näherungsweise in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur. Verschiedene Nutzungszwecke können dabei durch unterschiedliche Feuchtelasten berücksichtigt werden. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde stets der Regelfall einer normalen Feuchtelast zugrunde gelegt, welcher die Nutzung als Wohnraum (inklusive Küche und Bad) abdeckt. Da die Innenraumfeuchte innerhalb des gewählten Modellierungsansatzes mit zunehmender Außenlufttemperatur ansteigt, wurde für die Analyse der Innenwände der Standort Mannheim angesetzt. Dieser weist die höchste Jahresdurchschnittstemperatur aller hygrothermischen Referenzjahre auf und führt somit zur maßgebenden Feuchteexposition der untersuchten Innenwand.

4.5 Untersuchte Anwendungsfälle

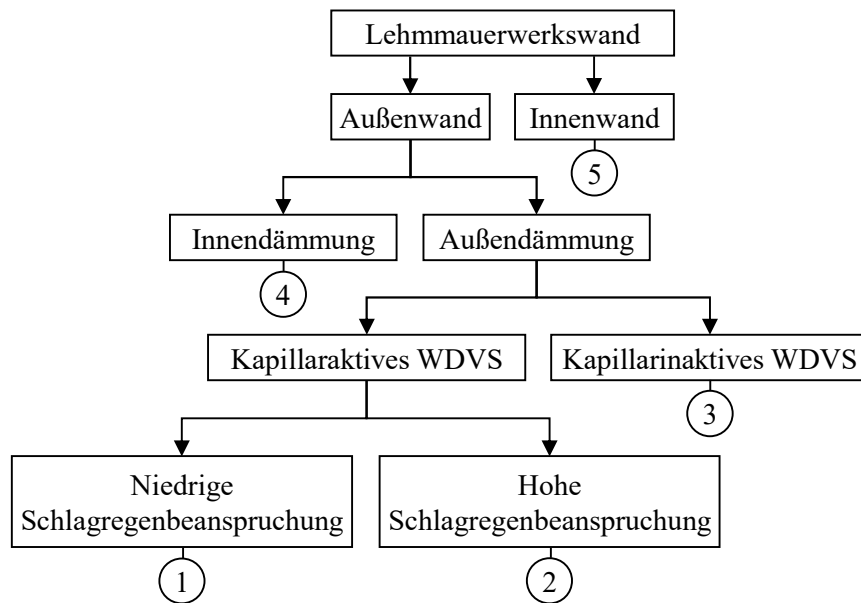
Für die Ermittlung der über den Jahresverlauf zu erwartenden Materialfeuchte innerhalb einer Lehm-mauerwerkswand wurden zunächst praxisrelevante Anwendungsfälle definiert. Hierbei wurden Anwendungsfälle, welche unterschiedliche Materialfeuchten erwarten lassen, getrennt voneinander simuliert, um diese im Rahmen der anschließenden Zuverlässigkeitsanalyse individuell berücksichtigen zu können.

Eingangs wurde zwischen Innen- und Außenwänden unterschieden. Dabei erfolgten im Fall einer Außenwand sowohl Untersuchungen für eine außenliegende als auch für eine innenliegende Wärmedämmung. Außenwände mit außenliegender Wärmedämmung wurden zudem nochmals hinsichtlich der Feuchteschutzwirkung des verwendeten Wärmedämmverbundsystems (WDVS) unterschieden. Hierbei erfolgten einerseits Analysen für kapillaraktive Wärmedämmverbundsysteme, welche eine ausgeprägtere Flüssigwasserleitfähigkeit aufweisen (z. B. bei Verwendung einer Holzfaser- oder Mineralschaumdämmung in Verbindung mit einem Kalkzementputz). Andererseits wurden Außenwände mit kapillarinaktiven Wärmedämmverbundsystemen untersucht, welche den Flüssigwassertransport zum tragenden Lehmmauerwerk auf Grund des Einsatzes von wasserundurchlässigen Wärmedämmmaterialien (z. B. Polystyrol) oder wasserabweisenden Außenputzen gemäß DIN 4108-3 [72] nahezu vollständig vermeiden. Für den Fall eines außenliegenden kapillaraktiven Wärmedämmverbundsystems wurden im Rahmen der Simulationen sowohl eine hohe als auch eine niedrige Schlagregenbeanspruchung untersucht.

Um den raumklimatischen Vorteil der Feuchtepufferung des Lehmmauerwerks ausnutzen zu können, wurde bei der Modellierung einer Außenwand ein Lehminnenputz vorgesehen. Im Fall einer Innenwand wurde dieser Lehmputz auf beiden Seiten der modellierten Lehmmauerwerkswand angesetzt. Die Modellierung des tragenden Lehmmauerwerks erfolgte durch das in Kapitel 4.3 erläuterte Materialmodell von Lehmstein I. Um die aktuellen Vorgaben des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) hinsichtlich des maximal zulässigen Wärmedurchgangs opaker Außenbauteile beheizter Gebäude einhalten zu können, wurde bei allen untersuchten Aufbauten einer Außenwand ein Wärmedämmverbundsystem vorgesehen. Für die Modellierung einer Innendämmung oder einer kapillaraktiven Außendämmung wurde dabei eine Holzfaserdämmplatte verwendet, wohingegen ein außenliegendes kapillarinaktives Wärmedämmverbundsystem mit Polystyrol modelliert wurde. Der letztgenannte Fall kann als näherungsweise äquivalent zur Verwendung eines wasserabweisenden Außenputzes gemäß DIN 4108-3 [72] in Kombination mit einem beliebigen außenliegenden Dämmmaterial betrachtet werden [73]. Die äußerste Schicht einer Außenwand wurde durch einen Kalkzementputz dargestellt. Dabei wurde der Unter- und Oberputz vereinfachend als homogene Schicht abgebildet. Die Wahl der Dicken des Außen- und Innenputzes erfolgten für die Modellbildung auf Grundlage der durchschnittlichen Normalputzdicke gemäß DIN EN 13914-1 [74] bzw. DIN EN 13914-2 [75].

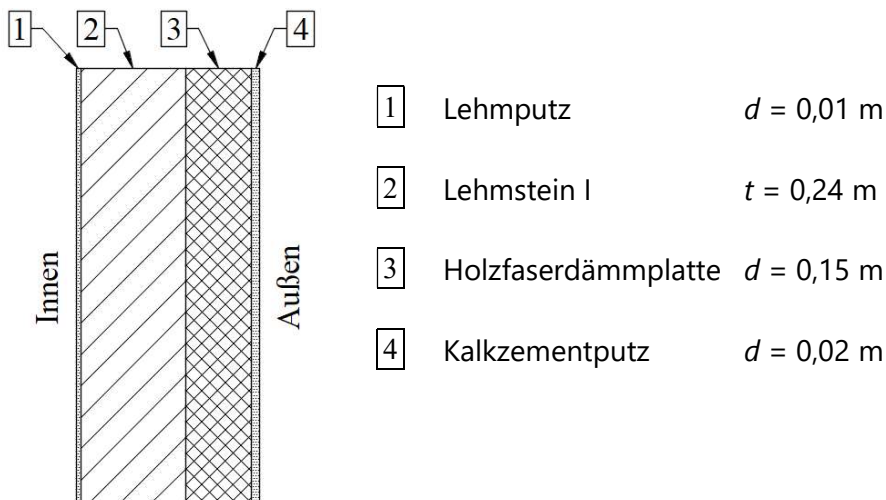
In Abbildung 22 sind die untersuchten Anwendungsfälle sowie die zugehörigen Wandaufbauten in Form eines Flussdiagramms sowie einer ergänzenden tabellarischen Beschreibung nochmals dargestellt. Zudem ist der Wandaufbau des Anwendungsfalls 1 in Abbildung 23 exemplarisch skizziert.

Abbildung 22: Nummerierung und Aufbau der untersuchten Anwendungsfälle von Lehm-mauerwerkswänden



Nummer	Typ	Wandaufbau										Außenklima				
		Innenputz		Innendämmung		Mauerwerk		Außendämmung		Außenputz						
		Material	Dicke	Material	Dicke	Material	Dicke	Material	Dicke	Material	Dicke					
1	Außenwand	Lehmputz	0,01 m	-	-	Lehmstein I	0,24 m	Holzfaserdämmplatte	0,15 m	Kalkzementputz	0,02 m	Kassel				
2																Stötten
3								Holzfaserdämmplatte				0,06 m				Potsdam
4																
5	Innenwand									Lehmputz	0,01 m	Mannheim				

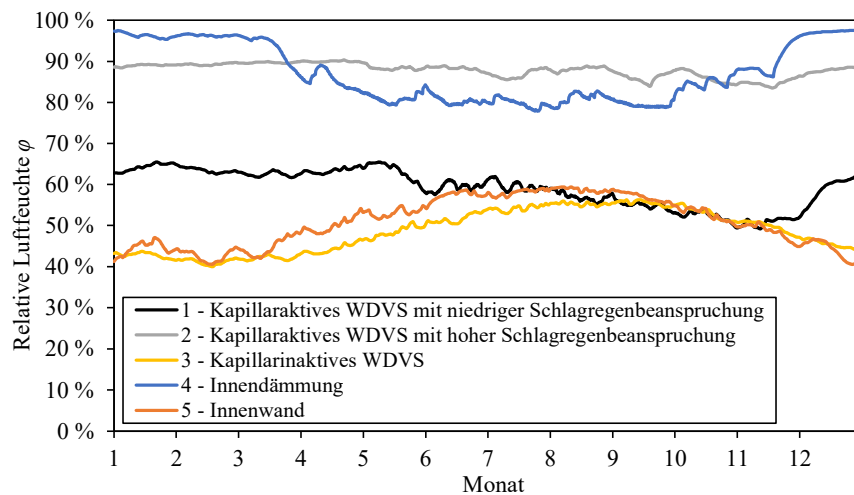
Abbildung 23: Graphische Darstellung des Wandaufbaus für Anwendungsfall 1



4.6 Simulationsergebnisse

Für die in Kapitel 4.5 definierten Anwendungsfälle wurde die Materialfeuchte innerhalb des Lehmmauerwerks mit Hilfe instationärer hygrothermischer Simulationen ermittelt und in Abbildung 24 gegenübergestellt. Dabei ist zu beachten, dass sich die dargestellte Materialfeuchte nicht auf den gesamten Wandaufbau sondern ausschließlich auf die tragende Lehmmauerwerksschicht bezieht.

Abbildung 24: Materialfeuchte des Lehmmauerwerks über den Jahresverlauf für verschiedene Anwendungsfälle



Die Gegenüberstellung der Feuchteverläufe zeigt, dass im Fall einer Außenwand mit außenliegendem, kapillaraktivem Wärmedämmverbundsystem oder einer Außenwand mit Innendämmung die höchsten Materialfeuchten erreicht werden. Die dort auftretenden erhöhten Feuchtegehalte sind durch wiederkehrende Schlagregenereignisse ohne ausreichende Trocknungsperioden in Verbindung mit der vergleichsweise geringen Regenschutzwirkung der äußeren Bauteilschichten zu erklären. Im Fall der innenliegenden Wärmedämmung findet in den Sommermonaten jedoch eine Trocknung des Lehmmauerwerks statt, wodurch sich die resultierende Materialfeuchte verringert. Der untersuchte Wandaufbau mit außenliegender kapillaraktiver Wärmedämmung (Anwendungsfall 2) erfährt durch die angesetzte hohe Schlagregenbeanspruchung keine signifikante Trocknung, weshalb die Materialfeuchte über den Jahresverlauf nahezu konstant verläuft.

Weiterhin lässt sich feststellen, dass die vorherrschende Schlagregenintensität im Fall eines außenliegenden kapillaraktiven Wärmedämmverbundsystems einen signifikanten Einfluss auf die zu erwartende Materialfeuchte hat. Im betrachteten Anwendungsfall wird bei niedriger Schlagregenbeanspruchung eine maximale Materialfeuchte von $\varphi = 65\%$ erreicht, wohingegen bei hoher Schlagregenbeanspruchung bereits ein Maximalwert im oberen hygroskopischen Feuchtebereich von $\varphi = 90\%$ zu verzeichnen ist. Das Auftreten von überhygroskopischen Materialfeuchten ($\varphi \geq 95\%$) ist jedoch nicht zu erwarten, da hierfür überproportional viel Feuchtigkeit in das Lehmmauerwerk eingetragen werden müsste und dies eine erhebliche Durchfeuchtung des außenliegenden Wärmedämmverbundsystems zur Folge hätte. Dieser Fall ist daher bereits aus bauphysikalischer Sicht durch geeignete Feuchteschutzmaßnahmen auszuschließen.

Da der Schlagregenschutz bei einer Lehmmauerwerkswand mit Innendämmung allein durch den mineralischen Außenputz sichergestellt wird und die Möglichkeit zur Feuchteabgabe in den Innenraum durch die Innendämmung zusätzlich eingeschränkt ist, sind bei diesem Wandaufbau größere maximale Feuchtegehalte als bei einer kapillaraktiven Außendämmung zu verzeichnen. Bereits bei der angesetzten geringen Schlagregenbeanspruchung werden in den Wintermonaten überhygroskopische Materialfeuchten von bis zu $\varphi = 97\%$ innerhalb des Lehmmauerwerks ermittelt. In der sommerlichen Trocknungsperiode reduziert sich der Feuchtegehalt auf ein Feuchteniveau von ungefähr $\varphi = 80\%$. Die Ergebnisse bestätigen, dass eine Lehmmauerwerkswand mit Innendämmung bei mittlerer oder hoher Schlagregenbeanspruchung auf Grund der dabei zu erwartenden dauerhaft erhöhten Materialfeuchten nicht empfehlenswert ist.

Bei einer Außenwand mit kapillarinaktivem Wärmedämmverbundsystem sowie im Fall einer Innenwand treten durch die geringe Feuchteeinwirkung nur geringere Materialfeuchten zwischen $\varphi = 40\% - 60\%$ auf. Zudem verläuft die Materialfeuchte über den Jahresverlauf qualitativ konträr zu den bisher beschriebenen Anwendungsfällen. Da sowohl die Innenwand als auch die Außenwand mit kapillarinaktivem Wärmedämmverbundsystem nahezu unbeeinflusst von den äußeren Klimabedingungen sind, ist die Materialfeuchte in diesen Anwendungsfällen maßgeblich vom vorherrschenden Innenraumklima abhängig. Da die relative Innenraumluftfeuchte gemäß der Klimamodelle des WTA Merkblatt 6-2 [65] mit zunehmender Außentemperatur ansteigt, treten daher in den Wintermonaten die niedrigsten und in den Sommermonaten die höchsten Feuchtegehalte innerhalb des Lehmmauerwerks auf. Die Maximalwerte liegen dabei sowohl bei der Außenwand mit kapillarinaktivem Wärmedämmverbundsystem als auch im Fall der Innenwand bei knapp 60% .

Des Weiteren ist festzuhalten, dass die ermittelten Materialfeuchten in Abhängigkeit des betrachteten Anwendungsfalls über den Jahresverlauf unterschiedlich stark schwanken. Diese zeitliche Streuung der Materialfeuchte ist im Zuge der Zuverlässigkeitsanalyse in Form einer individuellen Basisvariable zu berücksichtigen. Detaillierte Erläuterungen zur wahrscheinlichkeitstheoretischen Modellierung der Materialfeuchte können Kapitel 5.2 entnommen werden.

5 Zuverlässigkeitsanalyse

5.1 Vorgehensweise

Innerhalb dieses Kapitels wird die Analyse der Zuverlässigkeit druckbeanspruchter Lehmmauerwerkswände für unterschiedliche Parameterkombinationen dargestellt. Hierzu wurde die Versagenswahrscheinlichkeit von Lehmmauerwerkswänden sowie deren Zuverlässigkeitsindex mittels Monte-Carlo-Simulationen ermittelt. Die Simulationsparameter wurden hierzu in variable, deterministische und streuende Einflussgrößen unterschieden (vgl. Tabelle 6). Das Vorgehen sah dabei zunächst die Wahl der variablen Simulationsparameter vor. Hierbei wurden die lichte Deckenspannweite l_f , die Wandschlankheit h_{ef}/t sowie der vorliegende Anwendungsfall und somit die zu erwartende Materialfeuchte der Lehmmauerwerkswand in praxisrelevanten Bereichen variiert. Für die gewählten variablen Simulationsparameter wurde anschließend der Bemessungswert der aufnehmbaren Normalkraft N_{Rd} auf Basis des semiprobabilistischen Nachweisverfahrens für tragende Lehmmauerwerkswände gemäß DIN 18940 [13] berechnet. Unter der Annahme einer vollständig ausgenutzten Wand ($N_{Ed} = N_{Rd}$) konnten für die festgelegte Parameterkombination die Mittelwerte der zugehörigen ständig einwirkenden Normalkraft μ_{NG} sowie der veränderlichen einwirkenden Normalkraft μ_{NQ} ermittelt werden. Hierzu wurde das Verhältnis aus dem charakteristischen Wert der ständigen und veränderlichen Normalkraft auf $N_{Gk}/N_{Qk} = 2$ festgelegt [81]. Anschließend wurden die Zufallszahlen der streuenden Basisvariablen entsprechend ihrer Verteilungsfunktionen erzeugt. Die wahrscheinlichkeitstheoretische Modellierung der zugrunde liegenden Basisvariablen ist in Kapitel 5.2 detailliert erläutert. Unter Ansatz der erzeugten Zufallszahlen konnte die Wandtragfähigkeit N_R mit Hilfe des wirklichkeitsnahen Berechnungsverfahren gemäß Kapitel 3.3 ermittelt werden. Im Anschluss wurde unter Einbezug der jeweiligen Modellunsicherheiten θ überprüft, ob das System für die erzeugten Zufallszahlen tragfähig ist. Ist das System nicht tragfähig, wurde die Anzahl der Versagensfälle n_{fail} um einen Zähler erhöht. Daraufhin wurden neue Zufallszahlen der Basisvariablen erzeugt und die Versagensanalyse für die eingangs festgelegte Kombination der variablen Simulationsparameter wiederholt. Um eine hinreichende Genauigkeit der Versagenswahrscheinlichkeit zu erhalten, wurde der Simulationsumfang auf $n = 2 \cdot 10^7$ festgelegt. Nach Durchführung von $n = 2 \cdot 10^7$ Versagensanalysen konnte die Versagenswahrscheinlichkeit P_f gemäß Gl. (17) aus der Anzahl der Versagensfälle n_{fail} sowie dem Simulationsumfang n ermittelt werden.

$$P_f = \frac{n_{fail}}{n} \quad (17)$$

Gemäß DIN EN 1990 [76] wird die Zuverlässigkeit eines Bauteils mit Hilfe des Zuverlässigkeitsindex β beurteilt. Dieser berechnet sich folgendermaßen:

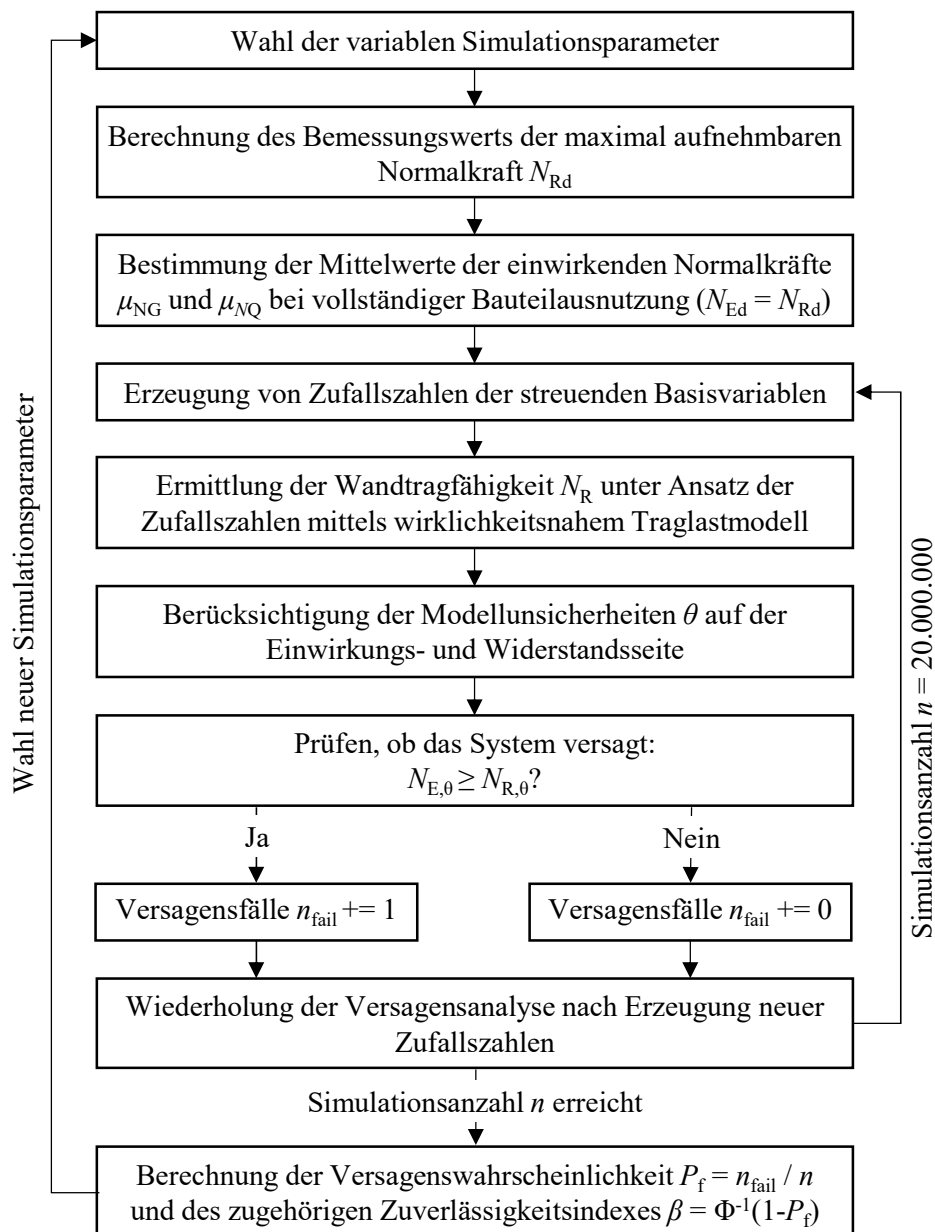
$$\beta = \Phi^{-1}(1 - P_f) \quad (18)$$

Der normative Zielzuverlässigkeitsindex beträgt für einen Bezugszeitraum von 50 Jahren sowie die Annahme einer mittleren Zuverlässigkeits- bzw. Schadensfolgeklasse $\beta = 3,8$.

Nach Ermittlung des Zuverlässigkeitsindex für die anfänglich gewählte Parameterkombination wurden neue Simulationsparameter gewählt und die Monte-Carlo-Simulation erneut durchgeführt.

Das gesamte Ablaufschema der Zuverlässigkeitsanalyse ist in Abbildung 25 anhand eines Flussdiagramms dargestellt.

Abbildung 25: Ablaufschema der Zuverlässigkeitsanalyse



5.2 Simulationsparameter

Bei der Festlegung der Simulationsparameter wurde zwischen deterministischen, variablen und streuenden Eingangsgrößen unterschieden. Die deterministisch festgelegten Simulationsparameter sind bei jeder Durchführung der Monte-Carlo-Simulationen unverändert und ohne Berücksichtigung möglicher Streuungen in die Berechnungen eingeflossen. Bei den variablen Simulationsparametern handelte es sich um Eingangsgrößen, welche im Zuge einer Sensitivitätsstudie in einem praxisrelevanten Wertebereich variiert wurden, um den Einfluss wesentlicher Bemessungsparameter wie beispielsweise der Wandschlankheit, der Deckenspannweite oder des vorliegenden Anwendungsfalls und der damit zusammenhängenden Materialfeuchte zu analysieren. Simulationsparameter, welche durch ihre Streuungen wesentlichen Einfluss auf die Zuverlässigkeit von Lehmmauerwerkswänden ausüben, wurden mit Hilfe von geeigneten Verteilungsfunktionen modelliert und innerhalb der Monte-Carlo-Simulation als streuende Basisvariablen berücksichtigt. Weitere Informationen zur Modellierung der streuenden Simulationsparameter können Kapitel 5.3 entnommen werden.

Die bezogene Lastexzentrizität e/t wurde im Rahmen der Zuverlässigkeitsanalyse bei der wirklichkeitsnahen Berechnung der Tragfähigkeit als deterministische Eingangsgröße angesetzt. Da die durchgeführten Versagensanalysen auf den Bemessungsregeln für tragendes Lehmsteinmauerwerk gemäß DIN 18940 [13] basieren, wurde die zugrunde liegende bezogene Lastexzentrizität näherungsweise aus den normativen Traglastfaktoren errechnet. Unter der Annahme starr-plastischen Materialverhaltens ergab sich die bezogene Lastexzentrizität zur Ermittlung der wirklichkeitsnahen Wandtragfähigkeit daher gemäß Gl. (19):

$$\frac{e}{t} = \frac{1 - \Phi_{\text{DIN18940}}}{2} \quad (19)$$

Die anfängliche bezogene Lastexzentrizität nach Theorie I. Ordnung in Wandhöhenmitte ergab sich gemäß DIN 18940 [13] in Verbindung mit Gl. (19) konstant zu $e_m/t = 0,075$. Die bezogene Lastexzentrizität am Wandfuß bzw. -kopf ist von der charakteristischen Mauerwerksdruckfestigkeit, dem Umgebungsfeuchtefaktor sowie der lichten Deckenspannweite abhängig und lag in einem Wertebereich von $0,05 \leq e/t \leq 0,30$.

In Tabelle 6 sind alle deterministischen, variablen und streuenden Simulationsparameter inklusive ihrer zugewiesenen Werte zusammenfassend dargestellt. Bei streuenden Eingangsgrößen sind neben dem Mittelwert zudem die gewählte Verteilungsfunktion sowie der zugrunde liegende Variationskoeffizient v der einzelnen Simulationsparameter angegeben. Detaillierte Informationen zu den Modellierungsansätzen der streuenden Materialparameter können Kapitel 5.3 entnommen werden.

Tabelle 6: Zusammenfassung der Simulationsparameter

Variable Simulationsparameter						
Bezeichnung		Symbol	Einheit	Wertebereich		
Lichte Deckenspannweite		l_f	m	2 - 6		
Wandschlankheit		h_{ef}/t	-	5 - 15		
Anwendungsfall		-	-	1 – 5 (s. Abbildung 22)		
Deterministische Simulationsparameter						
Bezeichnung		Symbol	Einheit	Wert		
Querschnittsfläche		A	m ²	1,00		
Bezogener Ursprungselastizitätsmodul		k	-	2,20		
Bezogene maximale Dehnung		η_{ult}	-	1,30		
Biegezugfestigkeit		f_t	N/mm ²	0,00		
Dauerstandsfaktor		ζ	-	0,85		
Verhältnis des charakteristischen Werts der ständig und veränderlich einwirkenden Normalkraft		N_{Gk}/N_{Qk}	-	2,00		
Materialeitiger Teilsicherheitsbeiwert		γ_M	-	1,50		
Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen		γ_G	-	1,35		
Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Einwirkungen		γ_Q	-	1,50		
Bezogene Exzentrizität in Wandhöhenmitte		e_m/t	-	0,075		
Streuende Simulationsparameter						
Bezeichnung		Symbol	Einheit	Verteilung	Mittelwert	ν
Charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeit		f_k	N/mm ²	LN	1,9	17,0 %
Elastizitätsmodul		E	N/mm ²	LN	$K_E \cdot f_k$	25,0 %
Verhältnis aus Elastizitätsmodul zu charakteristischer Mauerwerksdruckfestigkeit		K_E	-	LN	440	18,1 %
Ständig einwirkende Normalkraft		N_G	N/mm ²	N	var.	10,0 %
Veränderlich einwirkende Normalkraft		N_Q	N/mm ²	GUM	var.	25,0 %
Materialfeuchte (Bezugszeitraum 1 Monat)	Anwendungsfall 1	φ_1	%	GUM	61,1	7,4 %
	Anwendungsfall 2	φ_2	%	GUM	88,9	1,2 %
	Anwendungsfall 3	φ_3	%	GUM	50,2	10,8 %
	Anwendungsfall 4	φ_4	%	GUM	89,7	7,4 %
	Anwendungsfall 5	φ_5	%	GUM	53,1	10,1 %
Modellunsicherheit der Einwirkungsseite		θ_E	-	LN	1,0	5,0 %
Modellunsicherheit der Widerstandsseite		θ_R	-	LN	1,0	14,0 %
Modellunsicherheit der Materialfeuchte		θ_φ	-	LN	1,0	5,0 %
LN = Lognormalverteilung; N = Normalverteilung, GUM = Gumbelverteilung						

5.3 Modellierung der streuenden Simulationsparameter

5.3.1 Mechanische Materialparameter

Im Zuge der Materialmodellierung und der darauf aufbauenden wirklichkeitsnahen Berechnung der Tragfähigkeit von Lehmmauerwerkswänden wurden sowohl die Mauerwerksdruckfestigkeit als auch der Elastizitätsmodul als streuende Parameter angesetzt. Bei der Modellierung der Mauerwerksdruckfestigkeit wurde mit $f_k = 1,9 \text{ N/mm}^2$ der kleinstmögliche charakteristische Wert gemäß DIN 18940 [13] gewählt. Diese Mauerwerksdruckfestigkeit gehört zu einer Stein-Mörtel-Kombination mit der Steindruckfestigkeitsklasse 2 sowie der Mörtelklasse M 2,5. Der charakteristische Wert entspricht dabei dem 5%-Fraktilwert der statistischen Verteilungsfunktion. Der zugehörige Mittelwert μ_f lässt sich dementsprechend mit Gl. (20) ermitteln.

$$\mu_f = \frac{f_k}{1 + \Phi^{-1}(0,05) \cdot v_f} \quad (20)$$

Der Variationskoeffizient der Mauerwerksdruckfestigkeit wurde basierend auf den Empfehlungen für Ziegelmauerwerk des JCSS Probabilistic Model Code – Part 3: Resistance models – Masonry properties [77] mit $v_f = 17 \%$ festgelegt. Zudem wurde die Modellierung auf Basis desselben Regelwerks mit Hilfe einer Lognormalverteilung durchgeführt.

Für die statistische Modellierung des Elastizitätsmoduls wurde sich ebenfalls an der Empfehlung des JCSS Model Code [77] orientiert, welche den Ansatz einer Lognormalverteilung sowie einen Variationskoeffizienten von $v_E = 25 \%$ vorsieht. Darüber hinaus wurde im Zuge der Modellierung die Korrelation zwischen dem Elastizitätsmodul und der Mauerwerksdruckfestigkeit einbezogen. In Anlehnung an DIN EN 1996-1-1/NA [56] wurde diese Korrelation durch die Berechnung des Elastizitätsmoduls aus dem Produkt der charakteristischen Mauerwerksdruckfestigkeit f_k und der Kennzahl K_E berücksichtigt:

$$E = K_E \cdot f_k \quad (21)$$

Für Lehmmauerwerk kann der Mittelwert der Kennzahl K_E mit $\mu_{KE} = 440$ angesetzt werden (vgl. Kapitel 3.2). Um im Rahmen der Zuverlässigkeitsanalyse unterschiedliche Variationskoeffizienten für die Mauerwerksdruckfestigkeit und den Elastizitätsmodul berücksichtigen zu können, wurde die Kennzahl K_E nicht als deterministische, sondern als streuende und lognormalverteilte Eingangsgröße definiert. Der erforderliche Variationskoeffizient dieser Basisvariable v_{KE} ließ sich aus den Variationskoeffizienten der Mauerwerksdruckfestigkeit $v_f = 17 \%$ und des Elastizitätsmoduls $v_E = 25 \%$ berechnen [78]:

$$v_{KE} = \sqrt{\frac{v_E^2 - v_f^2}{1 + v_f^2}} = \sqrt{\frac{0,25^2 - 0,17^2}{1 + 0,17^2}} = 18,1\% \quad (22)$$

Im Zuge der Versagensanalyse wurde zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls zunächst eine Zufallszahl der Kennzahl K_E sowie eine Zufallszahl der Mauerwerksdruckfestigkeit f generiert. Der erzeugte Zufallswert der Mauerwerksdruckfestigkeit wurde anschließend durch Umstellen von Gl. (20) auf das charakteristische Niveau abgemindert ($f_k = (1 + \Phi^{-1}(0,05) \cdot v_f) \cdot f$). Anschließend erfolgte gemäß Gl. (21)

die Multiplikation der somit erhaltenen Zufallszahl der charakteristischen Mauerwerksdruckfestigkeit f_k mit der Zufallszahl K_E . Durch dieses Vorgehen konnten im Rahmen der Zuverlässigkeitsanalyse sowohl die Korrelation zwischen der Mauerwerksdruckfestigkeit und dem Elastizitätsmodul als auch die individuellen Streuungen der jeweiligen mechanischen Materialeigenschaften hinreichend berücksichtigt werden.

5.3.2 Einwirkungen

Die innerhalb der Versagensanalysen zu berücksichtigende einwirkende Normalkraft besteht sowohl aus ständigen als auch veränderlichen Einwirkungen, welche im Zuge der Zuverlässigkeitsanalyse individuell zu modellieren waren. Die ständig einwirkende Normalkraft N_G stellt dabei im Anwendungsgebiet von tragendem Lehmmauerwerk den dominierenden Anteil dar und besteht vorrangig aus dem Eigengewicht des Bauwerks. Entsprechend der Empfehlungen des JCSS Probabilistic Model Code – Part 2: Load models [79] wurde die ständige Einwirkung mit einer Normalverteilung modelliert. Der Variationskoeffizient wurde mit $\nu_{NG} = 10\%$ angesetzt. Dieser Wert deckt dabei Streuungen der Rohdichte sowie der Bauteilgeometrien ab. Der charakteristische Wert der ständig einwirkenden Normalkraft N_{Gk} entspricht dem 50%-Fraktilwert der zugrunde liegenden Verteilungsfunktion.

Die veränderlichen Einwirkungen N_Q umfassen im Anwendungsgebiet von tragendem Lehmmauerwerk hauptsächlich Verkehrslasten aus Wohn- oder Büronutzung. In Anlehnung an [78] wurde zur Modellierung eine Gumbelverteilung gewählt. Der Variationskoeffizient wurde auf $\nu_{NQ} = 25\%$ festgelegt, welcher im Rahmen der Versagensanalyse einen Mischwert aus Wohn- und Büronutzung für einen Bezugszeitraum von 50 Jahren darstellt [80]. Der charakteristische Wert der veränderlich einwirkenden Normalkraft N_{Qk} entspricht dabei dem 98%-Fraktilwert der gewählten Gumbelverteilung bei Betrachtung eines Bezugszeitraums von einem Jahr. Der Mittelwert der veränderlichen Einwirkung kann für einen Bezugszeitraum von 50 Jahren näherungsweise durch $\mu_{NQ} = 1,13 \cdot N_{Qk}$ bestimmt werden [78].

Der Bemessungswert der einwirkenden Normalkraft N_{Ed} wurde im Zuge der Zuverlässigkeitsanalyse nach Gleichung 1 aus DIN 18940 [13] mit Hilfe der charakteristischen Werte der ständig und veränderlich einwirkenden Normalkräfte sowie den zugehörigen Teilsicherheitsbeiwerten ermittelt:

$$N_{Ed} = \gamma_G \cdot N_{Gk} + \gamma_Q \cdot N_{Qk} \quad (23)$$

Die vereinfachten Einwirkungskombinationen nach Gleichung 2 und 3 aus DIN 18940 [13] wurden in den nachfolgenden Analysen nicht untersucht.

Das Verhältnis der charakteristischen Werte der ständig und veränderlich einwirkenden Normalkraft beträgt im herkömmlichen Mauerwerksbau ungefähr $N_{Gk}/N_{Qk} \approx 2,0$ [81]. Da Lehmsteine für die Errichtung tragender Strukturen vergleichsweise hohe Rohdichten aufweisen müssen und Lehmmauerwerkswände in der Baupraxis zudem eher gedungen ausgeführt werden, ist davon auszugehen, dass der genannte Verhältniswert im Fall von Bauwerken aus tragendem Lehmmauerwerk oftmals größer ausfällt ($N_{Gk}/N_{Qk} \approx 2 - 6$). Diese Annahme trifft insbesondere bei Gebäuden mit Stahlbetondecken zu, da hierdurch der Eigengewichtsanteil im Gegensatz zur Verwendung einer Holzdecke nochmals beträchtlich erhöht wird. Nichtsdestotrotz wurde das Verhältnis der

charakteristischen Werte der ständig und veränderlich einwirkenden Normalkraft im Zuge der Zuverlässigkeitsanalysen auf der sicheren Seite liegend mit dem üblichen Wert des Mauerwerksbaus $N_{Gk}/N_{Qk} = 2,0$ angesetzt.

5.3.3 Materialfeuchte

Wie durch die hygrothermischen Analysen in Kapitel 4 gezeigt wurde, fällt die zu erwartende Materialfeuchte innerhalb des Lehmmauerwerks in Abhängigkeit des vorliegenden Anwendungsfalls unterschiedlich aus. Um die Zuverlässigkeit tragender Lehmmauerwerkswände umfassend analysieren zu können, wurde die Materialfeuchte daher für jeden der fünf Anwendungsfälle gemäß Abbildung 22 mit einer individuellen statistischen Verteilung modelliert.

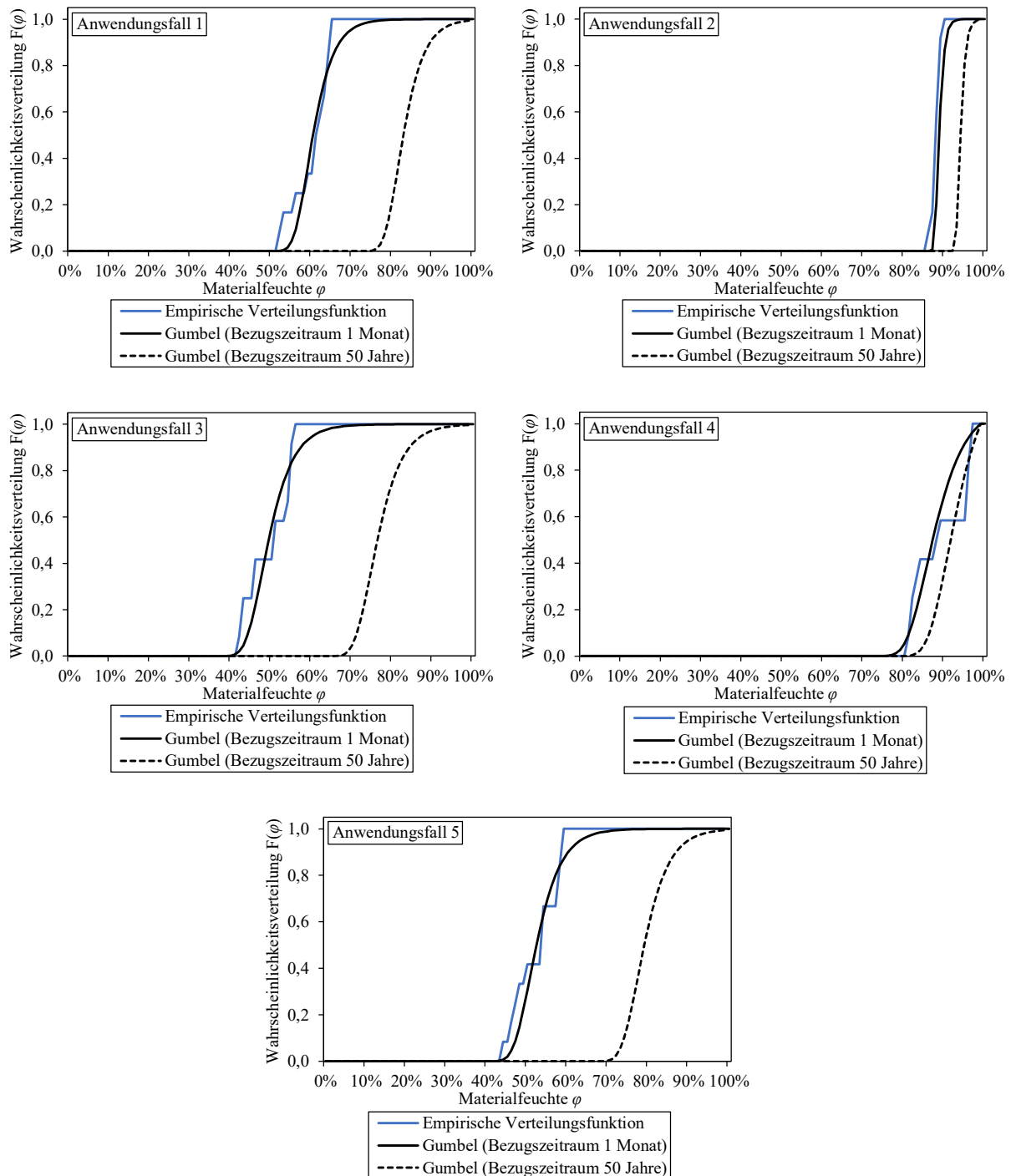
Da zur Bemessung von Lehmmauerwerkswänden die Maximalwerte der Materialfeuchte innerhalb des Nutzungszeitraums des Gebäudes maßgebend sind, wurde der Feuchtegehalt für alle Anwendungsfälle mit Hilfe einer Extremwertverteilung abgebildet. Analog zur Modellierung der Nutzlasten fiel die Wahl hierbei auf eine Gumbelverteilung. Die Parameter der Wahrscheinlichkeitsfunktion wurden auf Basis der mit Hilfe hygrothermischer Simulationen ermittelten Monatsmaximalwerte bestimmt (vgl. Kapitel 4). Im Anschluss ließ sich der daraus resultierende Bezugszeitraum der statistischen Verteilungsfunktion von $t_0 = 1$ Monat auf den bemessungsrelevanten Nutzungszeitraum eines Gebäudes von $t_{ref} = 50$ Jahren umrechnen. Im speziellen Fall einer Gumbelverteilung ergibt sich durch die rechnerische Änderung des Bezugszeitraums eine Anpassung des Mittelwerts der Materialfeuchte μ_φ , wohingegen die zugehörige Streuung konstant bleibt. Die entsprechende Modifikation des Mittelwerts der Materialfeuchte erfolgte in Abhängigkeit der zugehörigen Standardabweichung σ_φ gemäß nachfolgender Gleichung [78]:

$$\mu_{\varphi,ref} = \mu_{\varphi,0} + \ln \frac{t_{ref}}{t_0} \cdot \frac{\sigma_\varphi \cdot \sqrt{6}}{\pi} \quad (24)$$

Da die Materialfeuchte stets innerhalb eines Definitionsbereich von $0 \% \leq \varphi \leq 100 \%$ liegen muss, wurden die Zufallszahlen der Materialfeuchte ebenfalls auf diesen Wertebereich beschränkt. Weiterhin wurde der Mittelwert der Materialfeuchte mit $\mu_\varphi \leq 95 \%$ definitorisch auf den hygroskopischen Feuchtebereich begrenzt, da höhere Feuchtegehalte aus bauphysikalischen Gründen auszuschließen sind.

Die Verteilungsfunktionen der Materialfeuchte sind für die untersuchten Anwendungsfälle sowohl für den Beobachtungszeitraum von einem Monat als auch für den angepassten Bezugszeitraum von 50 Jahren in Abbildung 26 dargestellt. Die empirischen Wahrscheinlichkeitsfunktionen basieren auf den Ergebnissen der hygrothermischen Simulationen und stellen die Datengrundlage für die Kalibrierung der Extremwertverteilungen dar.

Abbildung 26: Wahrscheinlichkeitsfunktionen der Materialfeuchte



Um zu berücksichtigen, dass die Extremwerte der Materialfeuchte φ sowie der veränderlich einwirkenden Normalkraft N_Q innerhalb des betrachteten Bemessungszeitraums von 50 Jahren mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht gleichzeitig auftreten, wurden im Rahmen der Versagensanalysen zwei verschiedene Grenzzustandsfunktionen betrachtet, in denen entweder die Materialfeuchte oder die veränderlich einwirkende Normalkraft als Leiteinwirkung definiert wurde. Die jeweilige Leiteinwirkung wurde dabei stets für einen Bezugszeitraum von 50 Jahren modelliert. Da der daraus resultierende

Extremwert im Fall der veränderlich einwirkenden Normalkraft in der Regel nur maximal wenige Wochen am Stück auftritt, wurde die Extremwertverteilung der Materialfeuchte als zugehörige Begleiteinwirkung für einen Bezugszeitraum von einem Monat angesetzt. Für die Grenzzustandsfunktion, in der die Materialfeuchte die Leiteinwirkung darstellte, wurde die Extremwertverteilung der veränderlich einwirkenden Normalkraft als zugehörige Begleiteinwirkung dagegen für einen Bezugszeitraum von einem Jahr berücksichtigt. Diese Annahme begründet sich darin, dass sich die Materialfeuchte in regenreichen Jahren ohne ausreichende Trockenperioden innerhalb der Lehm-mauerwerkswand kumulieren kann und der entsprechende Extremwert der Materialfeuchte daher über längere Zeit vorherrscht. Da die veränderlich einwirkende Normalkraft analog zur Materialfeuchte durch eine Gumbelverteilung modelliert wurde, kann die Umrechnung des Bezugszeitraums hierbei ebenfalls mit Vorgehen gemäß Gl. (24) erfolgen.

5.3.4 Modellunsicherheiten

Zur Berücksichtigung epistemischer Modellunsicherheiten wurden die rechnerisch ermittelten Einwirkungen, Widerstände und Materialfeuchten im Zuge der Versagensanalysen mit zugehörigen Modellunsicherheitsfaktoren belegt. Die Modellunsicherheitsfaktoren wurden dabei in Anlehnung an den JCSS Probabilistic Model Code – Part 3: Resistance models [82] lognormalverteilt und mit einem Mittelwert von $\mu_{\theta} = 1,0$ abgebildet.

Die Festlegung des Variationskoeffizienten der Modellunsicherheit der Einwirkung erfolgte gemäß JCSS Probabilistic Model Code – Part 3: Resistance models [82]. Dabei gilt für Bauteile mit überwiegender Normalkraftbeanspruchung ein Variationskoeffizient von $v_{\theta E} = 5\%$.

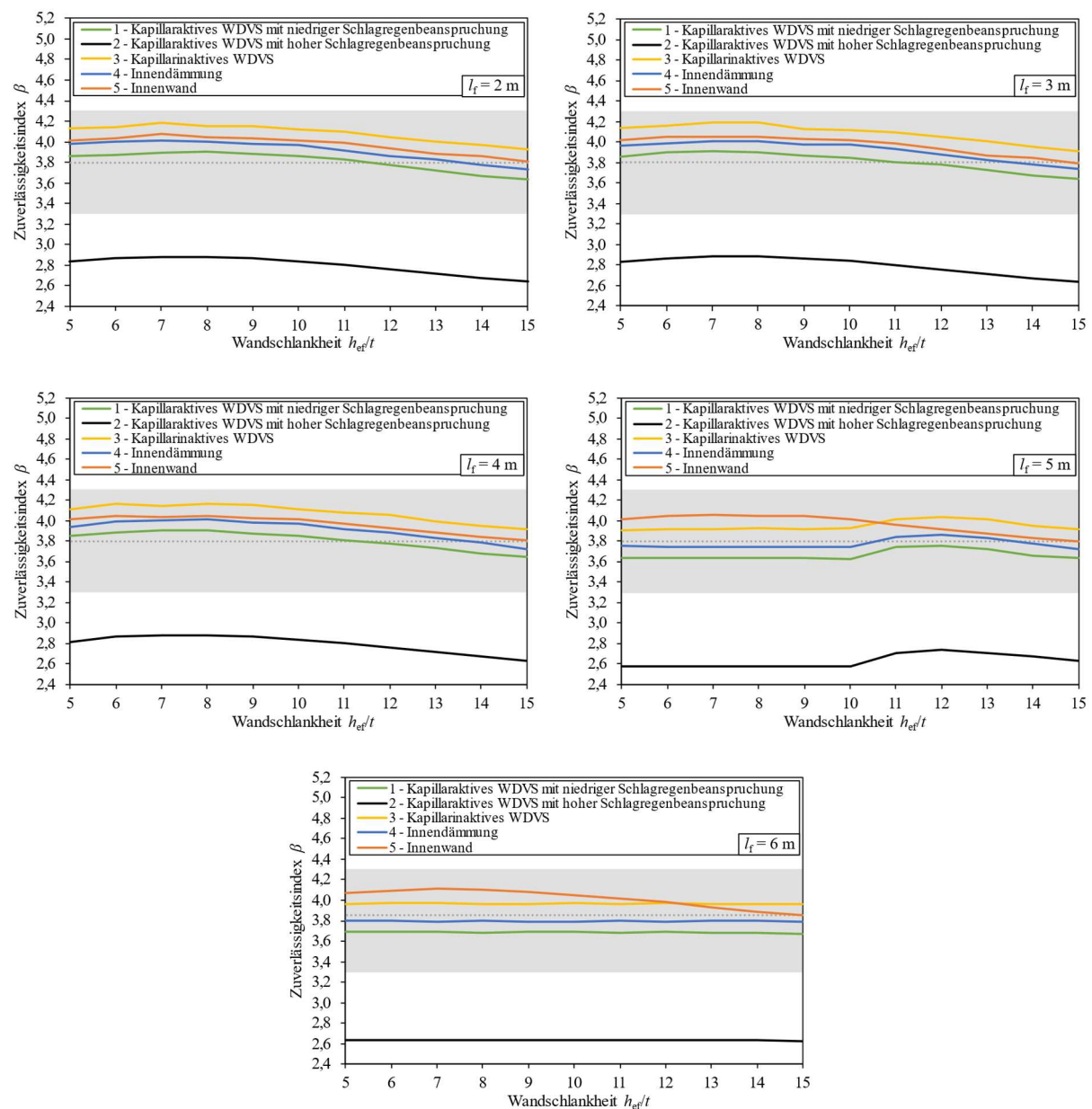
Der Variationskoeffizient der Modellunsicherheit der Bauteilwiderstände wurde mit $v_{\theta R} = 14\%$ angesetzt. Dieser Wert ist implizit im normativen Bemessungsverfahren für herkömmliches Mauerwerk enthalten und führt dort zu dem in Deutschland vorgesehenen materialeitigen Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_M = 1,50$ [78].

Der Variationskoeffizient der Modellunsicherheit bei Ermittlung der Materialfeuchte innerhalb des Lehm-mauerwerks auf Basis der instationären, hygrothermischen Simulationen (siehe Kapitel 4) wurde äquivalent zum Variationskoeffizient der Modellunsicherheit der Einwirkungen mit $v_{\theta \varphi} = 5\%$ abgeschätzt.

5.4 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalysen sind in Abbildung 27 in Abhängigkeit des jeweiligen Anwendungsfalls, der Wandschlankeit h_{ef}/t und der lichten Deckenspannweite l_f grafisch dargestellt. Zur besseren Einordnung der Ergebnisse ist der Zielzuverlässigkeitsindex von $\beta = 3,8$ gemäß DIN EN 1990 [76] durch eine horizontale Hilfslinie markiert. Da der Zuverlässigkeitsindex in Abhängigkeit der individuellen Bemessungssituation schwankt, wird zudem ein Zielbereich von $\beta = 3,8 \pm 0,5$ definiert und innerhalb der Diagramme grau hinterlegt. Liegt der ermittelte Zuverlässigkeitsindex oberhalb dieses Zielbereichs ist die Nachweisführung als zu unwirtschaftlich einzustufen. Liegt der ermittelte Zuverlässigkeitsindex dagegen unterhalb des Zielbereichs ist die Bemessung als unsicher zu bewerten.

Abbildung 27: Zuverlässigkeitsindex druckbeanspruchten Lehm-mauerwerks in Abhängigkeit der Wandschlankeit für verschiedene Anwendungsfälle und unterschiedliche lichte Deckenspannweiten



Bei Betrachtung der Ergebnisse fällt auf, dass eine Änderung der lichten Deckenspannweite innerhalb eines Wertebereichs von $l_f = 2 \text{ m} - 4 \text{ m}$ keinerlei Einfluss auf den resultierenden Zuverlässigkeitsindex hat. Dies begründet sich darin, dass bei kleinen Deckenspannweiten der Stabilitätsnachweis in Wandhöhenmitte maßgebend wird, welcher im Rahmen des normativen Nachweisverfahrens gemäß DIN 18940 [13] nicht von der Deckenspannweite, sondern ausschließlich von der Wandschlankheit beeinflusst wird. Erst bei einer lichten Deckenspannweite von $l_f = 5 \text{ m}$ in Kombination mit Wandschlankheiten von $h_{ef}/t \leq 10$ oder bei einer Deckenspannweite von $l_f = 6 \text{ m}$ in Verbindung mit beliebigen Wandschlankheiten wird bei Außenwänden der Querschnittsnachweis am Wandkopf und -fuß maßgebend. Da die Wandschlankheit bei der Nachweisführung an den Wandenden keinen Einfluss auf die resultierende Traglast hat, weist der Zuverlässigkeitsindex bei Wechsel der maßgebenden Nachweisstelle zunächst eine Unstetigkeit auf und verläuft im Fall von Querschnittsversagen am Wandkopf und -fuß konstant. Da bei Innenwänden gemäß DIN 18940 [13] immer der Stabilitätsnachweis in Wandhöhenmitte maßgebend ist, tritt dieses Phänomen jedoch nur bei Außenwänden auf.

Weiterhin lässt sich im Fall von Stabilitätsversagen beobachten, dass der Zuverlässigkeitsindex bei steigender Wandschlankheit kontinuierlich abfällt. Da das Verformungsverhalten bei schlankeren Lehm-mauerwerkswänden auf Grund der Zunahme der Effekte nach Theorie II. Ordnung einen größeren Einfluss als bei gedrungenen Wänden auf die resultierende Tragfähigkeit hat, wirkt sich die im Vergleich zur Mauerwerksdruckfestigkeit höhere Streuung des Elastizitätsmoduls zunehmend stärker auf den Zuverlässigkeitsindex aus. Der bei steigender Wandschlankheit erhöhte Einfluss des Verformungsverhaltens hat daher zur Folge, dass die Tragfähigkeit schlankerer Wände einer stärkeren Streuung unterliegt, was wiederum in einem abfallenden Zuverlässigkeitsindex resultiert.

Bei Betrachtung der unterschiedlichen Anwendungsfälle lässt sich feststellen, dass der Zuverlässigkeitsindex bei Außenwänden mit kapillarinaktivem Wärmedämmverbundsystem (Anwendungsfall 3), bei Außenwänden mit Innendämmung (Anwendungsfall 4) sowie bei Innenwänden (Anwendungsfall 5) stets in einem Bereich von $\beta = 3,7 - 4,2$ liegt und damit der angestrebte Zielzuverlässigkeitsindex zutreffend angenähert wird. Durch den effektiven Schlagregenschutz im Fall eines kapillarinaktiven Wärmedämmverbundsystems, welcher beispielsweise durch die Verwendung eines wasserabweisenden Außenputzes oder die Verwendung eines wasserundurchlässigen Dämmstoffes erreicht werden kann, ist die zu erwartende Materialfeuchte innerhalb des Lehm-mauerwerks vorrangig vom Innenraumklima abhängig. Aus diesem Grund spiegelt die Nutzungsklasse 1 mit einem Umgebungsfeuchtefaktor von $M = 0,80$ gemäß DIN 18940 [13] den Feuchteinfluss auf die resultierende Wandtragfähigkeit adäquat wieder und führt zu einer zuverlässigen Bemessung. Bei einer Außenwand mit innenliegender Wärmedämmung sind im Vergleich deutlich höhere Materialfeuchten innerhalb des Lehm-mauerwerks zu erwarten, diese werden jedoch durch die Einordnung von Außenwänden mit Innendämmung in Nutzungsklasse 2 durch den zugehörigen Umgebungsfeuchtefaktor von $M = 0,55$ im Zuge der Nachweisführung nach DIN 18940 [13] zutreffend berücksichtigt, weshalb auch in diesem Anwendungsfall von einer zuverlässigen Bemessung ausgegangen werden kann.

Im Fall einer Außenwand mit kapillaraktivem Wärmedämmverbundsystem ist das tragende Lehmmauerwerk nicht vollständig vor einwirkendem Schlagregen geschützt, was zu einer erhöhten Materialfeuchte innerhalb der Wand führt. Bei geringer Schlagregenbeanspruchung (Anwendungsfall 1) sowie Zuordnung des Bauteils in Nutzungsklasse 1 gemäß DIN 18940 [13] führt das gegenüber den bisher beschriebenen Anwendungsfällen bereits zu einem leicht reduzierten Zuverlässigkeitsindex von $\beta = 3,6 - 3,9$. Trotz des gesteigerten Feuchteinflusses liegt dieser Wertebereich jedoch noch innerhalb des definierten Wertekorridors und nähert die Zielzuverlässigkeit sehr zutreffend an. Bei starker Schlagregenbeanspruchung (Anwendungsfall 2) sowie Zuordnung des Bauteils in Nutzungsklasse 1 gemäß DIN 18940 [13] beträgt der Zuverlässigkeitsindex jedoch nur noch $\beta = 2,6 - 2,9$ und unterschreitet somit deutlich die angestrebte Zielzuverlässigkeit. Um eine unsichere Bemessung von Lehmmauerwerk zu vermeiden, sollte daher bei Ansatz der Nutzungsklasse 1 stets ein ausreichender Schlagregenschutz durch Verwendung eines wasserabweisenden Außenputzes oder eines kapillarinaktiven und außenliegenden Dämmmaterials vorgeschrieben werden. Kann der Schlagregenschutz bei Außenwänden aus Lehmmauerwerk nicht vollständig gewährleistet werden, sollte der zu erwartende gesteigerte Feuchtegehalt bei der Nachweisführung durch Zuordnung der entsprechenden Außenbauteile in Nutzungsklasse 2 berücksichtigt werden.

Weiterhin lässt sich basierend auf den dargestellten Ergebnissen festhalten, dass die Übertragung des semiprobabilistischen Sicherheitskonzepts für herkömmliches Mauerwerk in Anlehnung an DIN EN 1996/NA auf die Bemessung druckbeanspruchten Lehmmauerwerks möglich ist und zu einer zuverlässigen Bauteildimensionierung führt. Der Ansatz des im Mauerwerksbau üblichen materialeitigen Teilsicherheitsbeiwerts von $\gamma_M = 1,5$ führt dabei auch im Fall von Lehmmauerwerk zu einer zuverlässigen Bemessung.

6 Zusammenfassung und Fazit

Innerhalb des vorliegenden Forschungsberichts werden die Ergebnisse umfangreicher Zuverlässigkeitsanalysen für druckbeanspruchte Lehmmauerwerkswände unter expliziter Berücksichtigung des Einflusses der zu erwartenden Materialfeuchte und deren Streuungen dargelegt.

Vorbereitend wurden hierzu zunächst die Klimaabhängigkeit bemessungsrelevanter Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Lehmmauerwerk sowie seiner Einzelkomponenten experimentell analysiert und in Kapitel 2 beschrieben. Im Zuge der durchgeführten Versuchsreihe wurden die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen sowie die daraus ableitbaren Materialeigenschaften der untersuchten Lehmbaustoffe in verschiedenen Umgebungsklimata ermittelt und die zu beobachtende Klimaabhängigkeit evaluiert. Es konnte dabei festgestellt werden, dass Temperaturänderungen bei konstanter relativer Luftfeuchte keinen maßgebenden Einfluss auf die resultierenden Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Lehmmauerwerk haben. Im Gegensatz dazu führen Änderungen der relativen Luftfeuchte zu einer signifikanten Skalierung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung in Richtung der Spannungsachse und wirken sich somit erheblich auf die mechanischen Eigenschaften der untersuchten unstabilisierten Lehmbaustoffe aus. Auf Basis der experimentellen Untersuchungsergebnisse sowie unter Einbezug einer umfangreichen Literaturliteraturdatenbank konnte eine lineare Abhängigkeit zwischen der Druckfestigkeit bzw. des Elastizitätsmoduls und der Materialfeuchte unstabilisierter Lehmbaustoffe identifiziert werden.

Der damit quantifizierte Feuchteeinfluss auf die relevanten Festigkeits- und Verformungseigenschaften von unstabilisierten Lehmbaustoffen wurde in Kapitel 3 zur Entwicklung eines Traglastmodells verwendet, welches die Berechnung der Querschnitts- und Systemtragfähigkeit druckbeanspruchter Lehmmauerwerkswände unter Berücksichtigung beliebiger hygroskopischer Materialfeuchten erlaubt. Hierzu wurde zunächst ein Ansatz zur Modellierung der nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Beziehung von Lehmmauerwerk unter Einbezug einer über den Wandquerschnitt konstanten Materialfeuchteverteilung entwickelt. Die daraus resultierende Arbeitslinie bildete im Folgenden die Grundlage zur Modifizierung eines mauerwerkstypischen Traglastmodells zur Berechnung der Querschnitts- und Systemtragfähigkeit druckbeanspruchter Wände. Mit Hilfe dieses angepassten Berechnungsansatzes ist es möglich, die Tragfähigkeit druckbeanspruchter Lehmmauerwerkswänden unter Einbezug des materialspezifischen Festigkeits- und Verformungsverhaltens sowie unter Berücksichtigung verschiedener Materialfeuchten wirklichkeitsnah zu ermitteln.

Anschließend wurden in Kapitel 4 hygrothermische Analysen von Lehmmauerwerkswänden für Anwendungsfälle mit unterschiedlicher Feuchteexposition dargelegt. Hierzu wurde zunächst ein hygrothermisches Materialmodell für unstabilisiertes Lehmmauerwerk kalibriert und mit Hilfe von Literaturdaten validiert. Nach einer detaillierten Beschreibung der angesetzten Simulationsrandbedingungen wurden die Ergebnisse der instationären, hygrothermischen Simulationen für unterschiedliche Anwendungsfälle von tragenden Lehmmauerwerkswänden analysiert. Im Zuge der Simulationen wurden sowohl Außen- als auch Innenwände sowie verschiedene Wandaufbauten wie zum Beispiel Außenwände mit außen- oder innenliegender Wärmedämmung betrachtet. Die ermittelten

Materialfeuchten innerhalb des Lehmmauerwerks sowie deren Schwankungen wurden im Rahmen der Zuverlässigkeitsanalyse als Grundlage zur Kalibrierung von geeigneten Verteilungsfunktionen für den Feuchtegehalt von Lehmmauerwerkswänden verwendet.

Aufbauend auf den durchgeführten Voruntersuchungen wurden in Kapitel 5 Monte-Carlo-Simulationen zur Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit sowie dem daraus resultierenden Zuverlässigkeitsindex von tragenden Lehmmauerwerkswänden durchgeführt. Zunächst wurden die gewählte Vorgehensweise sowie die zugrunde liegenden Simulationsparameter beschrieben. Im Anschluss erfolgte die Darlegung der Modellierungsansätze für die streuenden Simulationsparameter, welche unter expliziter Berücksichtigung der materialspezifischen Besonderheiten von Lehmmauerwerk definiert wurden. Die darauf aufbauenden Zuverlässigkeitsanalysen erlaubten Rückschlüsse auf die Versagenswahrscheinlichkeit tragender Lehmmauerwerkswände, welche nach den normativen Regeln der DIN 18940 [13] bemessen wurden. Es wurde dabei sowohl der Einfluss variierender geometrischer Randbedingungen, wie beispielsweise unterschiedliche Wandschlankheiten oder Deckenspannweiten, sowie der Einfluss verschiedener Feuchteexpositionen untersucht. Die Ergebnisauswertung zeigte, dass das Nachweisverfahren gemäß DIN 18940 [13] eine zuverlässige Bemessung von tragendem Lehmmauerwerk ermöglicht. Insbesondere in Gebieten mit erhöhter Schlagregenbeanspruchung ist bei Außenbauteilen jedoch ein vollständiger Schlagregenschutz zu gewährleisten. Dieser kann beispielsweise durch die Verwendung eines wasserabweisenden Außenputzes oder den Einsatz außenliegender kapillarinaktiver Dämmstoffe erreicht werden. Bei einer Bemessung tragender Lehmmauerwerkswände nach DIN 18940 [13] ist der Schlagregenschutz durch entsprechende konstruktive Regelungen in allen Anwendungsfällen sichergestellt. Weiterhin zeigen die Forschungsergebnisse, dass eine semiprobabilistische Bemessung druckbeanspruchter Lehmmauerwerkswände unter Ansatz des mauerwerkstypischen, materialseitigen Teilsicherheitsbeiwerts in Höhe von $\gamma_M = 1,5$ für die untersuchten Anwendungsfälle zu einer hinreichenden Tragwerkszuverlässigkeit und einer sicheren Anwendung führt.

Die Erkenntnisse dieses Forschungsvorhabens flossen bereits während der Projektlaufzeit kontinuierlich in die Erarbeitung der Konstruktions-, Bemessungs- und Ausführungsnorm DIN 18940 [13] sowie in die Überarbeitung der Produktnormen für Lehmsteine DIN 18945 [50] und Lehmmauermörtel DIN 18946 [51] ein und leisteten somit einen Beitrag zur Weiterentwicklung der normativen Regelung von Lehmstoffen innerhalb Deutschlands. Das angestrebte Förderziel der normativen Implementierung eines semiprobabilistischen Sicherheitskonzepts zur Bemessung druckbeanspruchten Lehmmauerwerks, welches sowohl die üblichen Materialstreuungen als auch die Streuungen der zu erwartenden Bauteilfeuchte berücksichtigt, konnte somit vollumfänglich erfüllt werden. Ergänzend dazu konnte im Rahmen des Forschungsprojekts dargelegt werden, dass das geforderte Zuverlässigkeitsniveau innerhalb des normativen Anwendungsbereichs von tragenden Lehmmauerwerkswänden unter praxisrelevanten Randbedingungen erreicht werden kann und somit das nachhaltige und zuverlässige Bauen mit tragendem Lehmmauerwerk auf Grundlage der neuen normativen Regelungen möglich ist.

7 Mitwirkende

Autor

Dr.-Ing. Maximilian Brinkmann

BBF | Beck Brinkmann Förster Beratende Ingenieure PartG mbB

brinkmann@bbf-ing.de

www.bbf-ing.de

Weitere Mitwirkende

Dr.-Ing. Dominik Müller

RSP Rimmel + Sattler Ingenieurgesellschaft mbH

dominik.mueller@rsp-ingenieure.de

www.rsp-ingenieure.de

Dr.-Ing. Dominik Beck

BBF | Beck Brinkmann Förster Beratende Ingenieure PartG mbB

beck@bbf-ing.de

www.bbf-ing.de

Prof. Dr.-Ing. Valentin Förster

BBF | Beck Brinkmann Förster Beratende Ingenieure PartG mbB

foerster@bbf-ing.de

www.bbf-ing.de

Projektpartner und weitere Fördermittelgeber

Freunde des Instituts für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt e. V.

Franziska-Braun-Str. 3

64287 Darmstadt

8 Kurzbiographien



Dr.-Ing. Maximilian Brinkmann

2014 – 2019 Bauingenieurstudium an der Technischen Universität Darmstadt, Auszeichnung der Masterthesis mit dem „DVL Lehmbaupreis 2020“, 2019 – 2022 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt, seit 2022 Mitarbeiter im Normungsausschuss Lehm (NA 005-06-08), 2023 Promotion zum Thema „Tragverhalten druckbeanspruchten Lehmmauerwerks unter Berücksichtigung nichtlinearer Feuchteprofile“, seit 2023 Beratender Ingenieur der Ingenieurkammer Hessen und geschäftsführender Partner im Ingenieurbüro „Beck Brinkmann Förster Beratende Ingenieure PartG mbB“ in Darmstadt



Dr.-Ing. Dominik Müller

2009 – 2016 Bauingenieurstudium an der Technischen Universität Darmstadt, 2013 Tragwerksplaner bei Stantec Consulting Ltd. in Calgary Kanada, 2016 – 2021 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der TU Darmstadt, 2022 Promotion zum Thema „Probabilistic Assessment of Existing Masonry Structures“, seit 2021 Tragwerksplaner bei der RSP Rammel + Sattler Ingenieurgesellschaft mbH in Frankfurt am Main



Dr.-Ing. Dominik Beck

2013 – 2018 Bauingenieurstudium an der Technischen Universität Darmstadt mit Auszeichnung als bester Absolvent des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Darmstadt im 2. Abschlussjahr 2018, 2018 – 2019 Projektingenieur im Ingenieurbüro Gruber + Hartmann Ingenieurbüro für Baustatik, 2019 – 2022 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt, 2023 Promotion zum Thema „Bemessung von Betonfertigteilen mit vorgespannter Bewehrung aus Faserverbundkunststoff“, seit 2023 Beratender Ingenieur der Ingenieurkammer Hessen und geschäftsführender Partner im Ingenieurbüro „Beck Brinkmann Förster Beratende Ingenieure PartG mbB“ in Darmstadt

**Prof. Dr.-Ing. Valentin Förster**

2006 – 2012 Studium des Bauingenieurwesens (Dipl.-Ing. (FH) und M.Sc.) an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt und an der Technischen Universität Darmstadt. 2012 – 2017 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. Promotion zur Tragfähigkeit unbewehrter Beton- und Mauerwerksdruckglieder bei zweiachsig exzentrischer Beanspruchung im Jahr 2018. 2018 – 2012 Tragwerksplaner im Ingenieurbüro König und Heunisch Planungsgesellschaft in Frankfurt am Main. Seit 2022 Professor für Bauingenieurwesen im Dualen Studium der iu Internationalen Hochschule am Standort Frankfurt. Seit 2023 geschäftsführender Partner im Ingenieurbüro „Beck Brinkmann Förster Beratende Ingenieure PartG mbB“. Mitgliedschaften in mehreren Normungsgremien (Mauerwerksbau), der Initiative Praxisgerechte Regelwerke im Bauwesen (PRB) sowie im Forschungsbeirat des Deutschen Ausschusses für Mauerwerksbau (DAfM).

9 Literatur

- [1] United Nations Environment Programme (2022): Global Status Report for Buildings and Construction – Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector.
- [2] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050.
- [3] Lemke, M.; Pistol, K.; Schroeder, H.; Schulz, J.-U. (2022): Erarbeitung von Datengrundlagen und Muster-Umweltproduktdeklarationen für Lehmmauermörtel, Lehmsteine und Lehmplatten unter besonderer Berücksichtigung der Möglichkeiten des Recyclings. Forschungsbericht. Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), Aktenzeichen 35658/01, Projektlaufzeit 01.04.2020 - 31.08.2022.
- [4] Schroeder, H. (2019): Lehmbau – Mit Lehm ökologisch planen und bauen, Springer Vieweg, Wiesbaden.
- [5] Röhlen, U.; Ziegert, C. (2020): Lehmbau-Praxis – Planung und Ausführung, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [6] Arundel, A.V.; Sterling, E.M.; Biggin, J.H.; Sterling, T.D. (1986): Indirect health effects of relative humidity in indoor environments. In: Environmental Health Perspectives 65, S. 351-361.
- [7] Rempel, A.R.; Rempel, A.W. (2016): Intrinsic Evaporative Cooling by Hygroscopic Earth Materials. In: Geosciences 6, Heft 3.
- [8] Morton, T.; Stevenson, F.; Taylor, B.; Smith, N.C. (2005): Low cost earth brick construction – 2 Kirk Park, Dalguise : Monitoring & Evaluation: A Partners In Innovation research project final report, Communities Scotland, Edinburgh.
- [9] BBSR – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hrsg.): Wohnungsmarktprognose 2030, BBSR-Analysen kompakt, BBSR-Analysen Kompakt 07/2015, 2015.
- [10] Braun, R.; Fuchs, L. (2022): Wohnungsmarktprognose 2022/23 – Regionalisierte Prognose in drei Varianten mit Ausblick bis 2035, Empirica-Paper Nr. 263.
- [11] Deschermeier, P.; Henger, R.; Seipelt, B.; Voigtländer, M. (2017): Wohnungsmarkt: politische Implikationen des zukünftigen Baubedarfs. In: Perspektive 2035 - Wirtschaftspolitik für Wachstum und Wohlstand in der alternden Gesellschaft, S. 197-206.
- [12] Baldenius, T.; Kohl, S.; Schularick, M. (2020): Die neue Wohnungsfrage. Gewinner und Verlierer des deutschen Immobilienbooms. In: Leviathan 48, Heft 2, S. 195-236.
- [13] DIN 18940 (2023): Tragendes Lehmsteinmauerwerk – Konstruktion, Bemessung und Ausführung.
- [14] Aubert, J.E.; Fabbri, A.; Morel, J.C.; Maillard, P. (2013): An earth block with a compressive strength higher than 45 MPa! In: Construction and Building Materials 47, S. 366-369.

- [15] Ciancio, D.; Gibbings, J. (2012): Experimental investigation on the compressive strength of cored and molded cement-stabilized rammed earth samples. In: *Construction and Building Materials* 28, Heft 1, S. 294-304.
- [16] Illampas, R.; Ioannou, I.; Charmpis, D.C. (2014): Adobe bricks under compression: Experimental investigation and derivation of stress–strain equation. In: *Construction and Building Materials* 53, S. 83-90.
- [17] Illampas, R.; Ioannou, I.; Charmpis, D.C. (2017): Experimental assessment of adobe masonry assemblages under monotonic and loading–unloading compression. In: *Materials and Structures* 50, Heft 1, Article number 79.
- [18] Brinkmann, M.; Wiehle, P. (2023): Correlation between relative humidity and the strength and deformation characteristics of unstabilised earth masonry. In: *Construction and Building Materials* 366.
- [19] Heath, A.; Lawrence, M.; Walker, P. (2009): The compressive strength of modern earth masonry. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies*. Bath (United Kingdom), 6. - 9. September 2009.
- [20] Miccoli, L.; Fontana, P.; Müller, U. (2013): Charakterisierung von Lehmmauerwerk unter statischer Druck- und Schubbeanspruchung. In: *Mauerwerk Kalender 2013*. Ernst & Sohn, Berlin, S. 629-633.
- [21] Miccoli, L.; Garofano, A.; Fontana, P.; Müller, U. (2015): Experimental testing and finite element modelling of earth block masonry. In: *Engineering Structures* 104, S. 80-94.
- [22] Wiehle, P.; Brinkmann, M. (2020): Tragfähigkeit von Lehmmauerwerk – Eine experimentelle und numerische Analyse. In: *LEHM 2020 – Tagungsbeiträge der 8. Internationalen Fachtagung für Lehm*. Weimar, 30. Oktober - 1. November 2020.
- [23] Piani, T.L.; Krabbenborg, D.; Weerheijm, J.; Koene, L.; Sluijs, L.J. (2018): The Mechanical Performance of Traditional Adobe Masonry Components: An experimental-analytical characterization of soil bricks and mud mortar. In: *Journal of Green Building* 13, Heft 3, S. 17-44.
- [24] Müller, P.; Fontana, P.; Miccoli, L.; Ziegert, C. (2017): Versuchsgestützte Kalibrierung von Teilsicherheitsbeiwerten im Lehmmauerwerksbau – Empfehlung für die Erarbeitung eines Bemessungskonzepts. In: *Mauerwerk-Kalender 2017 – Befestigungen, Lehmmauerwerk*. Ernst & Sohn, Berlin, S. 181-194.
- [25] Hartmann, R. (2019): Planungsgrundsätze im modernen Lehmmauerwerksbau – Für eine Breitenanwendung im Wohnungsbau unter Berücksichtigung klimatischer Bedingungen gemäßiger Zonen am Beispielstandort Deutschland, Technische Universität Dresden, Dissertation.
- [26] Brinkmann, M. (2023): Tragfähigkeit druckbeanspruchten Lehmmauerwerks unter Berücksichtigung nichtlinearer Feuchteprofile, Technische Universität Darmstadt, Dissertation.
- [27] Bui, Q.-B.; Morel, J.-C.; Hans, S.; Walker, P. (2014): Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth. In: *Construction and Building Materials* 54, S. 163-169.

- [28] Champiré, F.; Fabbri, A.; Morel, J.-C.; Wong, H.; McGregor, F. (2016): Impact of relative humidity on the mechanical behavior of compacted earth as a building material. In: *Construction and Building Materials* 110, S. 70-78.
- [29] El Fgaier, F.; Lafhaj, Z.; Chapiseau, C.; Antczak, E. (2016): Effect of sorption capacity on thermo-mechanical properties of unfired clay bricks. In: *Journal of Building Engineering* 6, S. 86-92.
- [30] Müller, U.; Ziegert, C.; Kaiser, C.; Röhlen, U. (2012): Eigenschaften industrieller Lehmbauprodukte für den Mauerwerksbau und Verhalten von Lehmsteinmauerwerk. In: *Mauerwerk* 16, Heft 1, S. 17-28.
- [31] Hansen, E.; Hansen, K.K. (2002): Unfired clay bricks - moisture properties and compressive strength. In: *Proceedings of the 6th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries*, S. 453-460. Trondheim (Norwegen), 17. - 19. Juni 2002.
- [32] Heath, A.; Walker, P.; Fourie, C.; Lawrence, M. (2009): Compressive strength of extruded unfired clay masonry units. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials* 162, Heft 3, S. 105-112.
- [33] Wiehle, P.; Brinkmann, M.; Thiele, M.; Graubner, C.-A.; Ziegert, C.: Schaffung von Bemessungsgrundlagen für Lehm-mauerwerk auf Basis von DIN EN 1996/NA mittels experimenteller und numerischer Untersuchungen. Forschungsbericht. Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), Aktenzeichen 34599/01, Projektlaufzeit: 01.05.2019 - 30.11.2022. Ausgabe 2022.
- [34] Brinkmann, M.; Wiehle, P.; Thiele, M.; Graubner, C.-A. (2023): Grundlagen zur Bemessung druckbeanspruchten Lehm-mauerwerks. In: *Mauerwerk-Kalender 2023 – Instandsetzung; Erdbeben; Lehm-bau*. Ernst & Sohn, Berlin.
- [35] Lustig-Rössler, U. (1992): Untersuchungen zum Feuchteverhalten von Lehm als Baustoff, Gesamthochschule Kassel, Dissertation.
- [36] Minke, G. (2007): Lehm-Mauerwerk. In: *Mauerwerk-Kalender 2007*. Ernst & Sohn, Berlin.
- [37] Krause, F.; Schmidt, G.; Bier, T.A. (2012): Feuchtespeicherfunktion und Feuchtetransport verschiedener Lehme und Lehm-baustoffe. In: *LEHM 2012 – Tagungsbeiträge der 6. Internationalen Fachtagung für Lehm-bau*, S. 268-271. Weimar, 5. - 7. Oktober 2012.
- [38] Liuzzi, S.; Hall, M.R.; Stefanizzi, P.; Casey, S.P. (2013): Hygrothermal behaviour and relative humidity buffering of unfired and hydrated lime-stabilised clay composites in a Mediterranean climate. In: *Building and Environment* 61, S. 82-92.
- [39] Cagnon, H.; Aubert, J.E.; Coutand, M.; Magniont, C. (2014): Hygrothermal properties of earth bricks. In: *Energy and Buildings* 80, S. 208-217.
- [40] Dubois, S.; McGregor, F.; Evrard, A.; Heath, A.; Lebeau, F. (2014): An inverse modelling approach to estimate the hygric parameters of clay-based masonry during a Moisture Buffer Value test. In: *Building and Environment* 81, S. 192-203.

- [41] McGregor, F.; Heath, A.; Shea, A.; Lawrence, M. (2014): The moisture buffering capacity of unfired clay masonry. In: *Building and Environment* 82, S. 599-607.
- [42] Miccoli, L.; Müller, U.; Fontana, P. (2014): Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob. In: *Construction and Building Materials* 61, S. 327-339.
- [43] Ruzicka, J.; Divis, J.; Stanek, K.; Richter, J. (2016): Der Einfluss natürlicher Lehmstoffe und Lehmweisen auf die relative Luftfeuchtigkeit im Innenraum Mikroklima. In: *LEHM 2016 – Tagungsbeiträge der 7. Internationalen Fachtagung für Lehm, S. 1-6. Weimar, 12. - 14. November.*
- [44] Soudani, L.; Fabbri, A.; Morel, J.-C.; Woloszyn, M.; Chabriac, P.-A.; Wong, H.; Grillet, A.-C. (2016): Assessment of the validity of some common assumptions in hygrothermal modeling of earth based materials. In: *Energy and Buildings* 116, S. 498-511.
- [45] Gomes, M.I.; Gonçalves, T.D.; Faria, P. (2016): Hydric Behavior of Earth Materials and the Effects of Their Stabilization with Cement or Lime: Study on Repair Mortars for Historical Rammed Earth Structures. In: *Journal of Materials in Civil Engineering* 28, Heft 7.
- [46] Minke, G. (2017): *Handbuch Lehm – Baustoffkunde, Techniken, Lehmarchitektur, Ökobuch, Staufen.*
- [47] Volhard, F.; Röhlen, U. (2009): *Lehmregeln – Begriffe - Baustoffe - Bauteile. Dachverband Lehm e. V., Vieweg + Teubner, Wiesbaden.*
- [48] DIN 4108-4 (2017): *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte.*
- [49] Rischaneck, A. (2009): *Sicherheitskonzept für den Lehmsteinbau, Technische Universität Wien, Dissertation.*
- [50] E DIN 18945 (2023): *Lehmsteine – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung (Entwurf).*
- [51] E DIN 18946 (2023): *Lehmmauermörtel – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung (Entwurf).*
- [52] DIN EN 1990/NA (2010): *Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung.*
- [53] Brinkmann, M.; Wiehle, P. (2023): Correlation between relative humidity and the strength and deformation characteristics of unstabilised earth masonry. In: *Construction and Building Materials* 366.
- [54] DIN 18945 (2018): *Lehmsteine – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung.*
- [55] DIN 18946 (2018): *Lehmmauermörtel – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung.*
- [56] DIN EN 1996-1-1/NA (2019): *Nationaler Anhang - Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk.*
- [57] DIN EN ISO 12571 (2013): *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften.*

- [58] Xu, L.; Champiré, F.; Fabbri, A.; Wong, H.; Branque, D. (2017): Hydro-Mechanical Triaxial Behaviour of Compacted Earth at Different Temperatures. In: Poromechanics VI, S. 164-171. Paris, France, July 9–13, 2017.
- [59] Feng, C.; Janssen, H. (2016): Hygric properties of porous building materials (II): Analysis of temperature influence. In: Building and Environment 99, S. 107-118.
- [60] Fabbri, A.; McGregor, F.; Costa, I.; Faria, P. (2017): Effect of temperature on the sorption curves of earthen materials. In: Materials and Structures 50, Heft 6.
- [61] Colinart, T.; Glouannec, P. (2017): Temperature dependence of sorption isotherm of hygroscopic building materials. Part 1: Experimental evidence and modeling. In: Energy and Buildings 139, S. 360-370.
- [62] DIN EN 1992-1-1/NA (2013): Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.
- [63] Glock, C. (2004): Traglast unbewehrter Beton- und Mauerwerkswände: nichtlineares Berechnungsmodell und konsistentes Bemessungskonzept für schlanke Wände unter Druckbeanspruchung, Technische Universität Darmstadt, Dissertation.
- [64] WTA Merkblatt 6-1 (2002): Leitfaden für hygrothermische Simulationsberechnungen.
- [65] WTA Merkblatt 6-2 (2014): Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse.
- [66] DIN EN 15026 (2007): Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation.
- [67] DIN V 18599-2 (2018): Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen.
- [68] Hansen, K.K. (1986): Sorptions isotherms – A catalogue. Technical University of Denmark.
- [69] Jäger, W.; Hartmann, R. (2019): Lehmmauerwerk: Entwurfs- und Konstruktionsgrundsätze für eine Breitenanwendung im Wohnbau unter Berücksichtigung klimatischer Bedingungen gemäßiger Zonen am Beispielstandort Deutschland – Abschlussbericht, Forschungsinitiative Zukunft Bau, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- [70] Zirkelbach, D.; Schöner, T. (2016): Energieoptimiertes Bauen: Klima- und Oberflächenübergangsbedingungen für die hygrothermische Bauteilsimulation. Forschungsbericht. Fraunhofer Institut für Bauphysik.
- [71] DIN EN ISO 15927-3 (2009): Wärme- und feuchteschutztechnisches Verhalten von Gebäuden – Berechnung und Darstellung von Klimadaten – Teil 3: Berechnung des Schlagregenindex für senkrechte Oberflächen aus stündlichen Wind- und Regendaten.

[72] DIN 4108-3 (2018): Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz - Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung.

[73] Künzel, H.M. (2012): Regenschutz durch wasserabweisende Außenputze. In: ausbau+fassade 05/2012, S. 42-44.

[74] DIN EN 13914-1 (2016): Planung, Zubereitung und Ausführung von Außen- und Innenputzen – Teil 1: Außenputze.

[75] DIN EN 13914-2 (2016): Planung, Zubereitung und Ausführung von Innen- und Außenputzen – Teil 2: Innenputze.

[76] DIN EN 1990 (2010): Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung.

[77] JCSS Probabilistic Model Code (2011) – Part 3: Resistance models - Masonry properties.

[78] Müller, D. (2022): Probabilistic Assessment of Existing Masonry Structures – The Influence of Spatially Variable Material Properties and a Bayesian Method for Determining Structure-Specific Partial Factors, Technische Universität Darmstadt, Dissertation.

[79] JCSS Probabilistic Model Code (2001) – Part 2: Load Models.

[80] Rackwitz, R. (1997): Einwirkungen auf Bauwerke. In: Der Ingenieurbau. Ernst & Sohn, Berlin.

[81] Glowienka, S. (2007): Zuverlässigkeit von Mauerwerkswänden aus großformatigen Steinen – Probabilistische Analyse von großformatigem Mauerwerk aus Kalksandstein und Porenbeton mit Dünnbettvermörtelung, Technische Universität Darmstadt, Dissertation.

[82] JCSS Probabilistic Model Code (2000) – Part 3: Resistance Models.

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verteilung der mittleren Druckfestigkeit sowie des mittleren Elastizitätsmoduls von Lehmmauerwerk bei einer relativen Luftfeuchte von $\varphi = 50 \%$ und einer Temperatur von $\Theta = 23 \text{ }^\circ\text{C}$ basierend auf Literaturdaten	12
Abbildung 2: Feuchteinfluss auf die Mauerwerksdruckfestigkeit und den Mauerwerkselastizitätsmodul gemäß [33].....	13
Abbildung 3: Verteilung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl sowie des Wasseraufnahmekoeffizienten von Lehmbaustoffen basierend auf Literaturdaten	13
Abbildung 4: Probekörper des Lehmstein II & Lehmstein I (a), Lehmmauermörtel (b), Lehmmauerwerk (c).....	18
Abbildung 5: Experimentell ermittelte Spannungs-Dehnungs-Beziehungen des Lehmsteins I bei variierender relativer Luftfeuchte φ und einer konstanten Temperatur von $\theta = 23 \text{ }^\circ\text{C}$	20
Abbildung 6: Normierte Mittelwerte der Festigkeits- und Verformungseigenschaften des Lehmsteins I bei variierender relativer Luftfeuchte φ und einer konstanten Temperatur von $\theta = 23 \text{ }^\circ\text{C}$	21
Abbildung 7: Experimentell ermittelte Spannungs-Dehnungs-Beziehungen des Lehmsteins II bei variierender relativer Luftfeuchte φ und einer konstanten Temperatur von $\theta = 23 \text{ }^\circ\text{C}$	21
Abbildung 8: Normierte Mittelwerte der Festigkeits- und Verformungseigenschaften des Lehmsteins II bei variierender relativer Luftfeuchte φ und einer konstanten Temperatur von $\theta = 23 \text{ }^\circ\text{C}$	22
Abbildung 9: Experimentell ermittelte Spannungs-Dehnungs-Beziehungen des Lehmmauermörtels bei variierender relativer Luftfeuchte φ und einer konstanten Temperatur von $\theta = 23 \text{ }^\circ\text{C}$	24
Abbildung 10: Normierte Mittelwerte der Festigkeits- und Verformungseigenschaften des Lehmmauermörtels bei variierender relativer Luftfeuchte φ und einer konstanten Temperatur von $\theta = 23 \text{ }^\circ\text{C}$	25
Abbildung 11: Dreisteinkörper inklusive Messtechnik (Maße in mm)	27
Abbildung 12: Experimentell ermittelte Spannungs-Dehnungs-Beziehungen des Lehmmauerwerks bei variierender relativer Luftfeuchte φ und einer konstanten Temperatur von $\theta = 23 \text{ }^\circ\text{C}$	28
Abbildung 13: Normierte Mittelwerte der Festigkeits- und Verformungseigenschaften des Lehmmauerwerks bei variierender relativer Luftfeuchte φ und einer konstanten Temperatur von $\theta = 23 \text{ }^\circ\text{C}$	28
Abbildung 14: Experimentell ermittelte Spannungs-Dehnungs-Beziehungen des Lehmmauerwerks bei variierender Temperatur θ und einer konstanten relativen Luftfeuchte von $\varphi = 50 \%$	30
Abbildung 15: Normierte Mittelwerte der Festigkeits- und Verformungseigenschaften des Lehmmauerwerks bei variierender Temperatur θ und einer konstanten relativen Luftfeuchte von $\varphi = 50 \%$	30

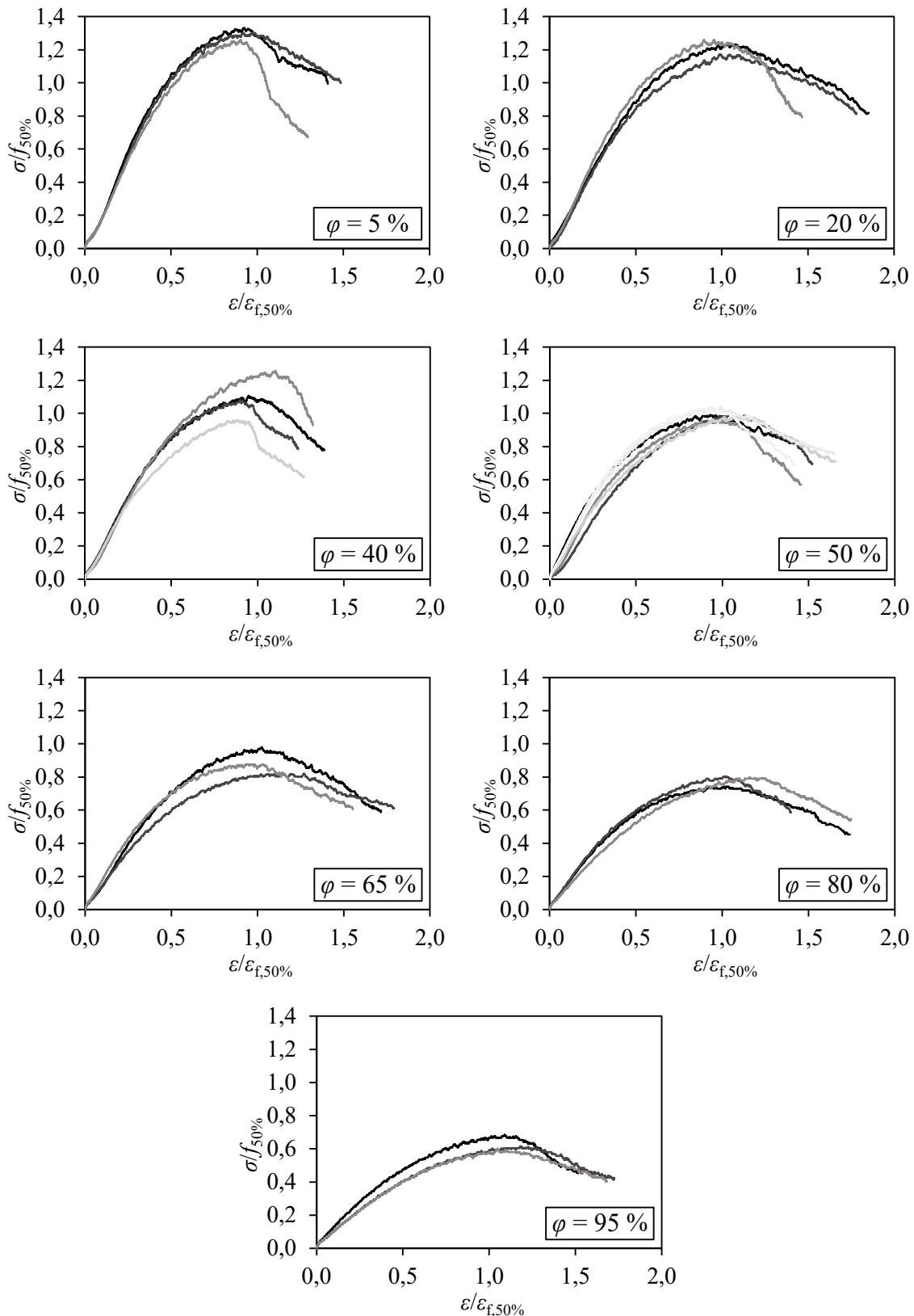
Abbildung 16: Lineare Approximation der bezogenen Druckfestigkeit $f/f_{50\%}$ für unstabilisierte Lehmstoffe	32
Abbildung 17: Verteilung des bezogenen Ursprungselastizitätsmoduls k von unstabilisiertem Lehmmauerwerk basierend auf Literaturdaten.....	34
Abbildung 18: Vergleich der experimentell ermittelten Spannungs-Dehnungs-Beziehungen von Lehmmauerwerk (vgl. Kapitel 2.4) mit dem feuchteabhängigen Werkstoffgesetz nach Gl. (2).....	35
Abbildung 19: Bezogene Querschnittstragfähigkeit von Lehmmauerwerk für verschiedene Materialfeuchten φ in Abhängigkeit der bezogenen Lastexzentrizität e/t	40
Abbildung 20: Bezogene Systemtragfähigkeit von Lehmmauerwerk für verschiedene Materialfeuchten φ sowie unterschiedliche bezogene Lastexzentrizitäten e/t in Abhängigkeit der Wandschlankheit h_{ef}/t ..	40
Abbildung 21: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Feuchtespeicherfunktionen von Lehmstein I, Lehmstein II und Lehmmörtel mit Feuchtespeicherfunktionen unstabilisierter Lehmstoffe aus der Literatur	45
Abbildung 22: Nummerierung und Aufbau der untersuchten Anwendungsfälle von Lehmmauerwerkswänden.....	49
Abbildung 23: Graphische Darstellung des Wandaufbaus für Anwendungsfall 1	49
Abbildung 24: Materialfeuchte des Lehmmauerwerks über den Jahresverlauf für verschiedene Anwendungsfälle.....	50
Abbildung 25: Ablaufschema der Zuverlässigkeitsanalyse.....	53
Abbildung 26: Wahrscheinlichkeitsfunktionen der Materialfeuchte	59
Abbildung 27: Zuverlässigkeitsindex druckbeanspruchten Lehmmauerwerks in Abhängigkeit der Wandschlankheit für verschiedene Anwendungsfälle und unterschiedliche lichte Deckenspannweiten	61

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Herstellerangaben der untersuchten Lehmsteine.....	17
Tabelle 2: Umfang der durchgeführten experimentellen Untersuchungen.....	19
Tabelle 3: Allgemeine Simulationsrandbedingungen.....	43
Tabelle 4: Hygrothermische Materialparameter der untersuchten Lehmstoffe	44
Tabelle 5: Vergleich der experimentell ermittelten hygrothermischen Materialeigenschaften von Lehmstein I mit Literaturdaten	46
Tabelle 6: Zusammenfassung der Simulationsparameter.....	55

12 Anlagen

Anlage 1 - Normierte Spannungs-Dehnungs-Beziehungen des Lehm-mauerwerks bei einer Temperatur von $\theta = 23\text{ °C}$



Anlage 2 - Gutachten zu den hygrothermischen Materialeigenschaften der untersuchten Lehmbaumstoffe des Instituts für Bauklimatik der TU Dresden



**Projekt: TU Darmstadt – Institut für Massivbau:
Materialuntersuchungen und hygrothermische Untersuchungen von
drei ungebrannten Lehmbaumstoffen**

Auftrags-Nr.: 15055-1 / 250401

Auftraggeber: TU Darmstadt – Institut für Massivbau
Maximilian Brinkmann
Franziska-Braun-Str. 3/L5 06 - 32
64287 Darmstadt

Auftragnehmer: GWT-TUD GmbH
Fachbereich Industrie
Freiberger Straße 33
64287 Darmstadt

Datum: Dresden, den 09.03.2022

Prof. Dr.-Ing. John Grunewald
Professur für Bauphysik
Institut für Bauklimatik (IBK) der TU Dresden
Kostenstellenleiter bei der GWT-TUD GmbH

Dipl.-Ing. (FH) Frank Meißner
Bearbeiter Labor
Institut für Bauklimatik (IBK) der TU Dresden

Das Dokument umfasst 11 Seiten (inkl. Deckblatt).

Das Dokument darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Eine gekürzte oder auszugsweise Vervielfältigung sowie eine Veröffentlichung in Druckschriften sind nur mit vorheriger schriftlicher Genehmigung des Verfassers zulässig.

Geschäftsführer
Prof. Dr. med. habil. Jacques Rohayem

Sitz der Gesellschaft
Dresden

Amtsgericht Dresden
HRB 13840
Ust-ID-Nr.: DE 182 302 853
Steuer-Nr.:203/109/03397

Bankverbindung
Commerzbank AG
BIC: DRES DE 33 33 0000
IBAN: DE40 8508 0000 0500 9777 00

Ein Unternehmen der TUDAG –
TU Dresden Aktiengesellschaft

Inhaltsverzeichnis

1.	Einführung.....	3
2.	Dargestellte Untersuchungen	3
2.1.	Wasseraufnahmeversuch	4
2.2.	Verdunstungsversuch	4
3.	Lehmstein – Anwendungsklasse Ib	6
4.	Lehmstein – Anwendungsklasse II	7
5.	Lehm-Mauermörtel schwer	8
Anhang		
	Zusammenstellung der Messergebnisse der drei Materialien	9

1. Einführung

Im Auftrag der GWT TUD GmbH hat das IBK Forschungs- und Entwicklungslabor der Technischen Universität Dresden drei verschiedene Lehmmaterialien der Firma Claytec hygrothermisch analysiert, sowie zwei weiterführende Versuche, und zwar den Wasseraufsaugversuch und den Verdunstungsversuch, durchgeführt.

2. Dargestellte Untersuchungen

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Versuche kurz beschrieben. Eine Tabelle mit Ergebniswerten folgt im Anhang.

2.1. Trockenraumdichte und Gesamtporosität

Die Bestimmung der Trockenraumdichte und der Gesamtporosität erfolgte über Ermittlung der Geometrie und Trockenmasse. Die Streuung der untersuchten Materialproben geben die Standardabweichung mit den Bereichsgrenzen Minimal- und Maximalwert wieder. Sie sind ein Indikator für die Homogenität der Eigenschaften.

2.2. Hygroskopische und überhygroskopische Feuchtespeicherung

Die Messergebnisse repräsentieren die mögliche Streubreite der Feuchtespeicherung. Zur Messung in den Apparaturen wurden die Proben in Unterkollektive aufgeteilt und anschließend in den Laborzyklus eingeschleust. Es wurde nur die Feuchtespeicherung im hygroskopischen Bereich in Form der Adsorptions-, nicht der Desorptionskurve durchgeführt.

Bei der Messung der Wasserretention in Druckplattenapparaturen (nur Desorptionsisotherme) bei sehr hoher Feuchte würden sich die Probekörper mutmaßlich auflösen.



Bild 1 Druckplattenapparatur (geöffnet) und Exsikkator zur Wassergehaltsmessung

2.3. Bestimmung der Diffusionsfähigkeit (Wasserdampfdiffusionswiderstand)

Diese erfolgt in Anlehnung an EN ISO 12572 mit Hilfe spezieller μ -Wert Gefäße und Deckelringen für die Probeaufnahme. Die Proben wurden in den Deckeln mit Paraffin fixiert, randlich abgedichtet und anschließend bei definierten relativen Luftfeuchten vorkonditioniert. Um den Einfluss von Ungleichgewichtsbedingungen auf die Dampfdiffusionsmessung zu verhindern, wurden die Proben bei bestimmten relativen Luftfeuchten für 30 Tage vorkonditioniert, für den hier durchgeführten Dry-cup-Versuch bei 23 % relativer Feuchte.

Zur Messung wurden die Gefäße mit einer gesättigten Salz-Wasserlösung befüllt und die Proben-deckel auf den Gefäßen luftdicht fixiert. Die eigentliche Messung erfolgte in einer Klimakammer mit einer definierten relativen Luftfeuchte bei einer Temperatur von 23°C. In der Regel werden die Experimente bei einer Luftfeuchtedifferenz von 5 und 32 % relativer Feuchte (Dry-cup-Versuch) realisiert.

2.4. Wasseraufnahmeversuch

Bei hoher relativer Luftfeuchte bzw. bei hohem Wassergehalt erfolgt der gesamte Feuchtetransport dominant in der Flüssigphase. Dieser Fall liegt beispielsweise vor, wenn ein Baustoff in Wasser getaucht oder auch durch Schlagregen stärker befeuchtet wird. Der Wasseraufnahmekoeffizient charakterisiert dabei die Eigenschaft eines weitgehend trockenen Baustoffes, Wasser von der Unterseite her aufzusaugen und flüssiges Wasser in den tiefer liegenden Porenraum zu transportieren. Während der Messung durchläuft die Materialprobe unterschiedliche Feuchtezustände. Folglich ändern sich die Transportgradienten, was zu kontinuierlich abnehmenden Flüssen führt.

Der Wasseraufnahmekoeffizient entspricht der Steigung der Wasseraufnahmekurve bezogen auf die Quadratwurzel der Zeit und wird üblicherweise in $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5})]$ oder $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0.5})]$ angegeben. Am Ende des Wasseraufnahmeexperimentes stellt sich in den Proben ein typischer Feuchtegehalt ein, der als kapillarer Wassergehalt θ_{cap} in $[\text{m}^3/\text{m}^3]$ bezeichnet wird.

Zur Abbildung des überhygroskopischen Feuchtebereiches des zu untersuchenden Materiales dient die Simulation des Aufsaugversuches (Abbildungen 2, 4 und 6). Dazu wird ein in seinen Abmessungen den Proben im Labor entsprechender Körper modelliert und an seiner Unterseite mit Wasser beaufschlagt. Die Wasseraufnahme wird über die Zeit ausgegeben und mit den Messdaten aus dem Labor verglichen. Die Leitfunktion wird dabei solange variiert, bis Messung und Rechnung die gewünschte Übereinstimmung zeigen.

2.5. Verdunstungsversuch

Der Grenzbereich zwischen hygroskopischem und überhygroskopischem Feuchtebereich wird durch die Simulation des Trocknungsverhaltens kalibriert. Bei Kenntnis der genauen Umgebungsbedingungen und der Möglichkeit der radialsymmetrisch-dreidimensionalen Simulation kann neben den Anfangs- und Übergangsbedingungen auch der Temperatureinfluss auf das Trocknungsverhalten berücksichtigt werden. Der Vergleich zwischen gemessenem und berechnetem Trocknungsverhalten ist in den Abbildungen 3, 5 und 7 dargestellt. Auch hier zeigt sich, dass mit der Anpassung nach schon wenigen Parametervariationen eine sehr gute Übereinstimmung erzielt werden kann.

2.6. Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte an jeweils ein bis zwei einzelnen Proben pro ausgewähltem Entnahmeort sowie unterschiedlichen, ebenen Flächen der getrockneten Probekörper. Die Messung fand unter folgenden Bedingungen statt:

- λ_{trocken} Heat-Puls-Technik mit Plattensensoren
- Messbereich 0,3 - 2,0 W/mK
- Umgebungstemperatur ca. 23°C

3. Lehmstein – Anwendungsklasse Ib

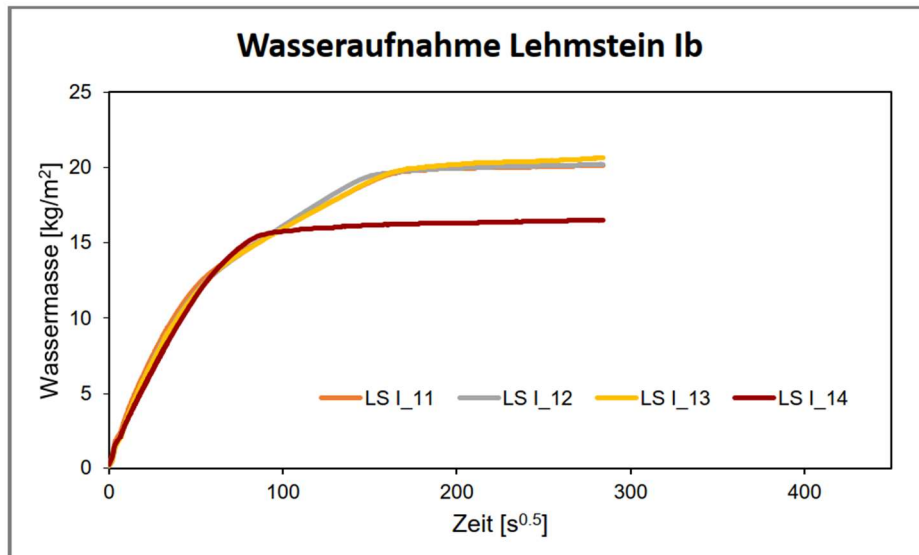


Bild 2 Diagramm Wasseraufnahme Lehmstein Ib

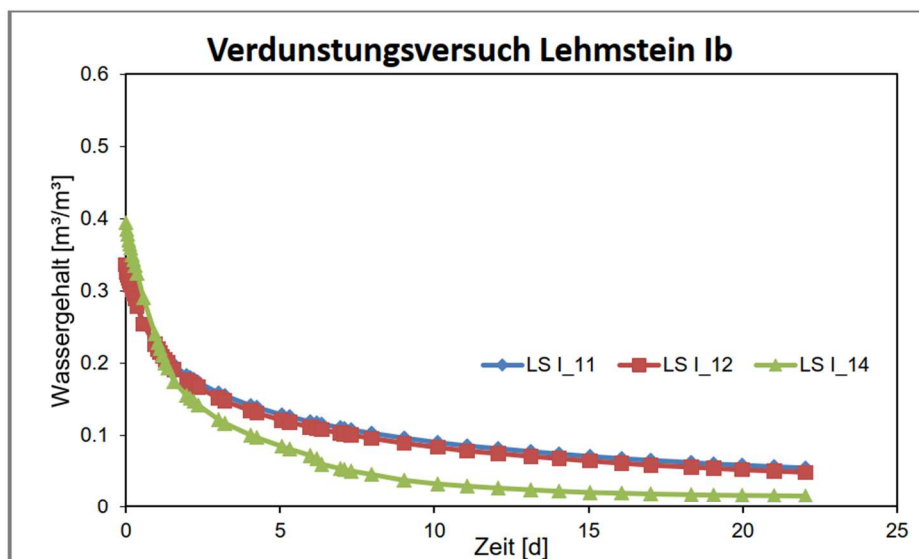


Bild 3 Diagramm Verdunstungsversuch Lehmstein Ib

4. Lehmstein – Anwendungsklasse II

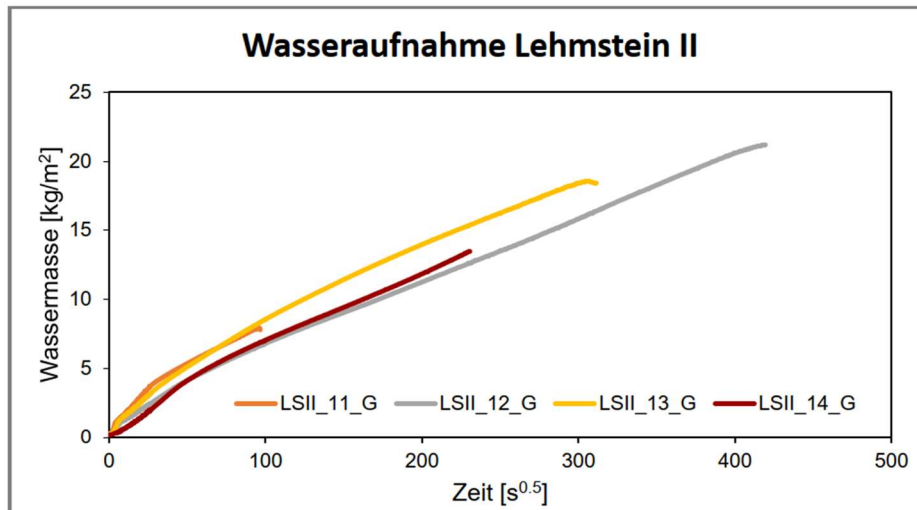


Bild 4 Diagramm Wasseraufnahme Lehmstein II

* Bei der Wasseraufnahme des Lehmsteines II kam es an den einzelnen Probekörpern nach unterschiedlichen Zeiten zu Materialabbrissen. Die Wasseraufnahmekurven enden deshalb zu unterschiedlichen Versuchszeitpunkten.

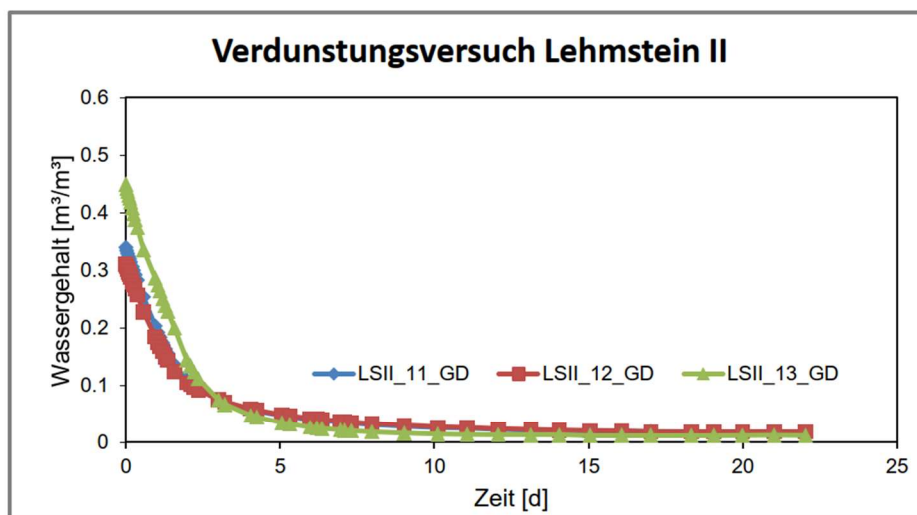


Bild 5 Diagramm Verdunstungsversuch Lehmstein II

5. Lehm-Mauermörtel schwer

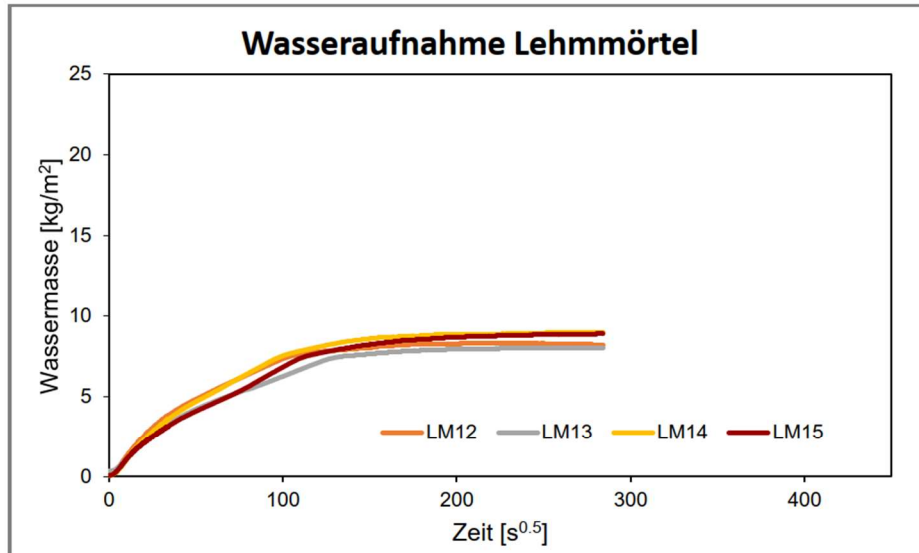


Bild 6 Diagramm Wasseraufnahme Lehmmörtel

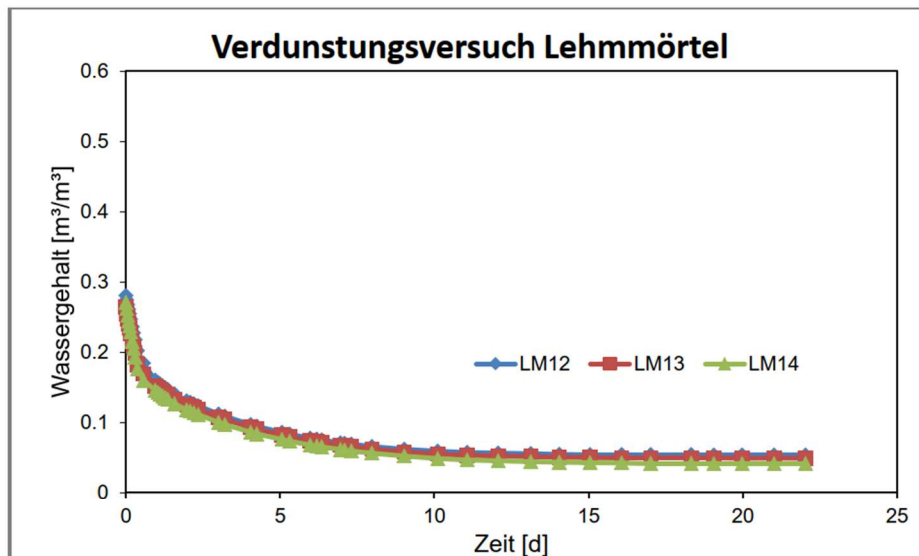


Bild 7 Diagramm Verdunstungsversuch Lehmmörtel



Material Information		
Identification	English	German
Material Name		Lehm-Mauermörtel schwer
Producer		Claytec
Investigator		GWT TUD
SampleID		LM
Sample Date		01.11.2021
Project		GWT 15055-1

Hygrothermal basic parameters							
			Mean	StdDev	Min	Max	Remarks
Porosity	Theta_por	[m³/m³]	0.3100	0.0238	0.2575	0.3520	
Bulk density	ρ	[kg/m³]	1828	63	1717	1968	
Specific heat capacity	c	[J/kgK]	801	34	761	836	
Thermal conductivity	Lambda_dry	[W/mK]	1.2641	0.0720	1.1658	1.3147	
Capillary saturation	Theta_cap	[m³/m³]	0.1596	0.0065	0.1508	0.1662	
Dry cup value	mew_dry	[--]	16.50	0.28	16.18	16.72	
Water absorption coefficient	Aw	[kg/m²s05]	0.0800	0.0076	0.0715	0.0870	

Water Retention (Desorption)						
pc	T	Theta in [m³/m³]				
[hPa]	[°C]	Mean	StdDev	Min	Max	Remarks
0.01						
bis						--- nicht gemessen ---
14000						

Sorptions Isotherm (Desorption)						
ϕ	T	Theta in [m³/m³]				
[%]	[°C]	Mean	StdDev	Min	Max	Remarks
97.40						
bis						--- nicht gemessen ---
32.90						

Sorptions Isotherm (Adsorption)						
ϕ	T	Theta in [m³/m³]				
[%]	[°C]	Mean	StdDev	Min	Max	Remarks
32.80	22.3	0.0070	0.0012	0.0054	0.0080	
43.20						
57.60	22.3	0.0081	0.0010	0.0069	0.0093	
75.20						
84.30	22.3	0.0154	0.0008	0.0142	0.0165	
90.00						
96.00	22.3	0.0175	0.0007	0.0163	0.0179	
96.90						

Water vapour permeability						
ϕ inside	ϕ outside	μ in [-]				
[%]	[%]	Mean	StdDev	Min	Max	Remarks
5.00	38.77	16.50	0.28	16.18	16.72	



Material Information		
Identification	English	German
Material Name		Lehmstein Anwendungskl. lb schwer
Producer		Claytec
Investigator		GWT TUD
SampleID		LS I
Sample Date		01.11.2021
Project		GWT 15055-1

Hygrothermal basic parameters							
			Mean	StdDev	Min	Max	Remarks
Porosity	Theta_por	[m³/m³]	0.3585	0.0248	0.2850	0.3841	
Bulk density	ρ	[kg/m³]	1700	66	1632	1895	
Specific heat capacity	c	[J/kgK]	834	20	817	860	
Thermal conductivity	Lambda_dry	[W/mK]	0.8792	0.0141	0.8608	0.8947	
Capillary saturation	Theta_cap	[m³/m³]	0.2714	0.0155	0.2616	0.2944	
Dry cup value	mew_dry	[--]	14.18	0.88	13.35	15.10	
Water absorption coefficient	Aw	[kg/m²s05]	0.2035	0.0011	0.2021	0.2046	

Water Retention (Desorption)						
pc	T	Theta in [m³/m³]				
[hPa]	[°C]	Mean	StdDev	Min	Max	Remarks
0.01						
bis						--- nicht gemessen ---
14000						

Sorption Isotherm (Desorption)						
ϕ	T	Theta in [m³/m³]				
[%]	[°C]	Mean	StdDev	Min	Max	Remarks
97.40						
96.00						--- nicht gemessen ---
32.90						

Sorption Isotherm (Adsorption)						
ϕ	T	Theta in [m³/m³]				
[%]	[°C]	Mean	StdDev	Min	Max	Remarks
32.80	22.3	0.0270	0.0007	0.0261	0.0279	
43.20						
57.60	22.3	0.0280	0.0010	0.0264	0.0290	
75.20						
84.30	22.3	0.0484	0.0019	0.0461	0.0502	
90.00						
96.00	22.3	0.0537	0.0007	0.0526	0.0544	
96.90						

Water vapour permeability						
ϕ inside	ϕ outside	μ in [-]				
[%]	[%]	Mean	StdDev	Min	Max	Remarks
5.00	38.77	14.18	0.88	13.35	15.10	



Material Information		
Identification	English	German
Material Name		Lehmstein Anwendungskl. II (Grünlinge)
Producer		Claytec
Investigator		GWT TUD
SampleID		LS II
Sample Date		01.11.2021
Project		GWT 15055-1

Hygrothermal basic parameters							
			Mean	StdDev	Min	Max	Remarks
Porosity	Theta_por	[m³/m³]	0.3200	0.0133	0.2839	0.3425	
Bulk density	ρ	[kg/m³]	1802	35	1742	1898	
Specific heat capacity	c	[J/kgK]	869	69	757	913	
Thermal conductivity	Lambda_dry	[W/mK]	0.8614	0.0321	0.8076	0.9024	
Capillary saturation	Theta_cap	[m³/m³]	0.1988	0.0644	0.1124	0.2659	
Dry cup value	mew_dry	[--]	14.88	0.33	14.52	15.15	
Water absorption coefficient	Aw	[kg/m²s05]	0.0713	0.0065	0.0629	0.0779	

Water Retention (Desorption)						
pc	T	Theta in [m³/m³]				
[hPa]	[°C]	Mean	StdDev	Min	Max	Remarks
0.01						
bis						--- nicht gemessen ---
14000						

Sorptions Isotherm (Desorption)						
ϕ	T	Theta in [m³/m³]				
[%]	[°C]	Mean	StdDev	Min	Max	Remarks
97.40						
96.00						--- nicht gemessen ---
32.90						

Sorptions Isotherm (Adsorption)						
ϕ	T	Theta in [m³/m³]				
[%]	[°C]	Mean	StdDev	Min	Max	Remarks
32.80	22.3	0.0128	0.0010	0.0114	0.0136	
43.20						
57.60	22.3	0.0161	0.0006	0.0154	0.0170	
75.20						
84.30	22.3	0.0327	0.0014	0.0304	0.0339	
90.00						
96.00	22.3	0.0398	0.0021	0.0373	0.0432	
96.90						

Water vapour permeability						
ϕ inside	ϕ outside	μ in [-]				
[%]	[%]	Mean	StdDev	Min	Max	Remarks
5.00	38.77	14.88	0.33	14.52	15.15	