

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
Fachbereich 7.2 Ingenieurbau

Technische Universität Darmstadt
Institut für Massivbau

ZRS Ingenieure GmbH

**Schaffung von Bemessungsgrundlagen für Lehm-mauerwerk
auf Basis von DIN EN 1996/NA mittels experimenteller und
numerischer Untersuchungen**

Abschlussbericht über das Verbundforschungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 34599/01 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Philipp Wiehle, Maximilian Brinkmann, Marc Thiele, Christof Ziegert und
Carl-Alexander Graubner

Februar 2023

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	II
Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis.....	V
1 Zusammenfassung	1
1.1 Durchgeführte Untersuchungen	1
1.2 Ergebnisse	1
1.3 Empfehlungen für das weitere Vorgehen	1
1.4 Kooperationspartner und Förderung.....	1
2 Einleitung	2
3 Hauptteil	4
3.1 Experimentelle Untersuchungen.....	4
3.1.1 Materialien, Konditionierungsklimate und Versuchsumfang	4
3.1.2 Probekörperherstellung und Versuchsdurchführung	6
3.2 Auswertung und Vergleich der Versuchsergebnisse.....	12
3.2.1 Einfluss der Feuchte auf Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul.....	12
3.2.2 Kriechverhalten von Steinen und Mauerwerk.....	17
3.2.3 Tragverhalten schlanker Lehm-mauerwerkswände.....	18
3.3 Zusammenfassung.....	19
3.4 Numerische und analytische Traglastberechnung.....	21
3.4.1 Allgemeines.....	21
3.4.2 Materialmodellierung	21
3.4.3 Numerische Berechnung der Traglast.....	24
3.4.4 Analytische Berechnung der Traglast.....	28
3.4.5 Validierung der Traglastmodelle.....	28
3.4.6 Parameterstudien.....	32
3.5 Bemessungsvorschlag für druckbeanspruchtes Lehm-mauerwerk.....	33

3.5.1	Allgemeines	33
3.5.2	Semiprobabilistisches Sicherheitskonzept	34
3.5.3	Ermittlung der charakteristischen Lehm-mauerwerksdruckfestigkeit	36
3.5.4	Berücksichtigung der Materialfeuchte.....	37
3.5.5	Ermittlung der Traglastfaktoren	39
3.6	Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung	42
3.7	Verbreitung der Vorhabensergebnisse.....	43
4	Fazit.....	45
5	Literaturverzeichnis	47

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Formgeschlagener Lehmstein im Normalformat (A), stranggepresster Lehmstein im Format 3DF (B), Lehm-mauermörtel M2 (C) und M3 (D)	4
Abbildung 2:	Lehmsteinprobekörper zur Ermittlung der Druckfestigkeit sowie der Verformungen: halbiertes, aufeinander gemauertes NF-Stein (A), ganzer NF-Stein (B), und ganzer 3DF-Stein(C) zur Bestimmung der Druckfestigkeit sowie 3-Stein-Probekörper aus NF-Steinen (D) und 3DF-Steinen (E) zur Verformungsmessung	7
Abbildung 3:	Kleinprisma zur Ermittlung der Mörteldruckfestigkeit (A) und Großprisma zur Ermittlung der Verformungskenngrößen (B).....	8
Abbildung 4:	Prüfkörpergeometrie mit Anordnung der Messstrecken (oben) und Mauerwerksprobekörper nach Einbau in den Versuchsstand (unten) jeweils für NF und 3DF Steinformate	9
Abbildung 5:	Obere (A) und untere (B) Lasteinleitung der exzentrischen Mauerwerksdruckversuche sowie Probekörper aus 3DF-Steinen nach Einbau im Versuchsstand (C)	10
Abbildung 6:	Geschosshohe Wandprüfkörper während der Lagerung in der Prüfhalle inklusive seitlicher Einfassung der Probekörper aus NF-Steinen	11
Abbildung 7:	Skizze des Versuchsaufbaus der geschosshohen Wandprüfkörper mit zentrischer und exzentrischer Lasteinleitung sowie Wandprüfkörper nach Einbau im Versuchsstand	12
Abbildung 8:	Rissbilder der Mauerwerksprobekörper nach Prüfung; Längs (A)- und Stirnseite (B) der 3DF- Probekörper sowie Längs (C) und Stirnseite (D) der NF-Probekörper	15

Abbildung 9: Spannungs-Dehnungs-Linien der Mauerwerksprobekörper aus NF-Steinen (links) und 3DF-Steinen (rechts) in Abhängigkeit des Konditionierungsklimas	15
Abbildung 10: Exemplarisches Rissbild eines Mauerwerksprobekörpers aus 3DF-Steinen nach Prüfung bei $e = t/4$; klaffender, horizontaler Riss in der Lagerfuge auf Biegezugseite (A), Stirnseite mit schalenartiger Abplatzung auf Biegedruckseite und klaffendem Riss auf Biegezugseite (B) und großflächige Abplatzungen der Steine auf Biegedruckseite (C).....	17
Abbildung 11: Verlauf der Kriechdehnungen für NF (links) und 3DF Mauerwerk (rechts) in Abhängigkeit der RLF mit prognostiziertem Verlauf bis zum Zeitpunkt $t = 365$ Tage	17
Abbildung 13: Geschosshoher Wandprüfkörper nach zentrischem Druckversuch mit vertikalen Rissen im Randbereich (A), Verformungsfigur eines exzentrischen Druckversuches (B) und klaffender Riss in der Lagerfuge nach exzentrischer Prüfung (C).....	19
Abbildung 13: Feuchtebedingte Reduktion von Druckfestigkeiten (A) und Elastizitätsmoduln (B) von Lehm-mauerwerk bezogen auf die bei Standardklimakonditionen ermittelten Werte.....	19
Abbildung 15: Approximation der experimentell ermittelten Spannungs-Dehnungs-Beziehungen von Lehm-mauerwerk aus NF und 3DF Steinen mit Hilfe des gewählten Materialmodells.....	23
Abbildung 16: Vorder- und Seitenansicht sowie Isometrie des numerischen Modells eines RILEM-Prüfkörpers aus normalformatigen Lehmsteinen	25
Abbildung 17: Ergebnis der Konvergenzstudie zur optimalen Anzahl der Netzelemente pro Volumenelement	27
Abbildung 18: Diskretisierung des Finite-Element-Modells	27
Abbildung 19: Gegenüberstellung der bei verschiedenen Lastexzentrizitäten und Konditionierungsklimata experimentell, numerisch und analytisch ermittelten Traglastfaktoren für die RILEM-Prüfkörper	29
Abbildung 20: Gegenüberstellung der für verschiedene Lastexzentrizitäten experimentell, numerisch und analytisch ermittelten Traglasten geschosshoher Lehm-mauerwerkswände	31
Abbildung 21: Gegenüberstellung der numerisch und analytisch ermittelten Tragfähigkeit druckbeanspruchten Lehm-mauerwerks für verschiedene Lastexzentrizitäten.....	32
Abbildung 22: Gegenüberstellung der Tragfähigkeit druckbeanspruchten Lehm-mauerwerks für verschiedene Lastexzentrizitäten und unterschiedliche relative Luftfeuchten	33

Abbildung 23: Gegenüberstellung des Traglastfaktors in Wandhöhenmitte gemäß DIN EN 1996-3/NA [22] mit der analytisch ermittelten Systemtragfähigkeit von Lehmmauerwerk.....	41
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick der Versuche an Steinen und Mörteln.....	5
Tabelle 2: Überblick der Versuche an kleinformatischen Mauerwerksprobekörpern (RILEM) 6	
Tabelle 3: Überblick der Versuche an geschosshohen Wänden	6
Tabelle 4: Ergebnisse der statischen Druckversuche an Lehmsteinen in Abhängigkeit des Konditionierungsklimas.....	13
Tabelle 5: Ergebnisse der statischen Druckversuche an Lehmmauermörteln in Abhängigkeit des Konditionierungsklimas.....	13
Tabelle 6: Ergebnisse der zentrischen Mauerwerksdruckversuche in Abhängigkeit des Konditionierungsklimas und der Stein-Mörtel-Kombination	14
Tabelle 7: Ergebnisse der exzentrischen Druckversuche an Mauerwerksprobekörpern in Abhängigkeit der Lastexzentrizität und des Konditionierungsklimas	16
Tabelle 8: Ergebnisse der Druckversuche an geschosshohen Wandprüfkörpern in Abhängigkeit der Lastexzentrizität und Schlankheit h/t	18
Tabelle 9: Vergleich der mechanischen Kenngrößen des untersuchten Lehmmauerwerks mit den entsprechenden Wertebereichen von Porenbeton- und Kalksandsteinmauerwerk	20
Tabelle 10: Vergleich der nach DIN EN 1996-1-1/NA [45] berechneten und der auf Basis der Versuchsergebnisse statistisch ermittelten charakteristischen Lehmmauerwerksdruckfestigkeit.....	37
Tabelle 11: Knicklängenbeiwert für zweiseitig gehaltene Lehmmauerwerkswände	41

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungen

Formelzeichen und Symbole

Lateinische Buchstaben

3DF	Dreifach-Dünnformat	
A	Querschnittsfläche	(m ²)
a	Auflagertiefe	(m ²)
b	Breite	(m)
e	Lastexzentrizität	(m)
E_0	Ursprungsmodul	(N/mm ²)
E_{33}	E-Modul bei einem Drittel der Bruchlast	(N/mm ²)
$E_{50\%}$	E-Modul bei 50 % RLF	(N/mm ²)
E_f	Sekantenelastizitätsmodul bei Erreichen der Druckfestigkeit	(N/mm ²)
f	Mauerwerksdruckfestigkeit	(N/mm ²)
f_b	Steindruckfestigkeit	(N/mm ²)
$f_{b, 50\%}$	Steindruckfestigkeit bei 50 % RLF	(N/mm ²)
$f_{b, norm}$	Normierte Steindruckfestigkeit	(N/mm ²)
$f_{b,t}$	Steinzugfestigkeit	(N/mm ²)
f_d	Bemessungswert der Mauerwerksdruckfestigkeit	(N/mm ²)
f_k	Charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeit	(N/mm ²)
f_m	Mörteldruckfestigkeit	(N/mm ²)
$f_{m, 50\%}$	Mörteldruckfestigkeit bei 50 % RLF	(N/mm ²)
f_{st}	Steindruckfestigkeit gemäß DIN 18945	(N/mm ²)
f_t	Biegezugfestigkeit von Mauerwerk senkrecht zur Lagerfuge	(N/mm ²)
H, h	Höhe	(m, mm)
h_{ef}	Knicklänge	(m)
K	Konstante zur Berechnung der charakteristischen Mauerwerksdruckfestigkeit	(-)
k	Bezogener Ursprungsmodul	(-)
$k_{d,n}$	Fraktilefaktor für Bemessungswerte	(-)
k_n	Fraktilefaktor für charakteristische Werte	(-)
L, l	Länge	(m, mm)
l_f	Stützweite einer Geschossdecke	(m)

M	Umgebungsfeuchtefaktor	(-)
MW	Mittelwert	
NF	Normalformat	
N_R	Maximal aufnehmbare Normalkraft	(N)
q_{Ewd}	Bemessungswert der einwirkenden Windlast	(N/mm ²)
RLF	Relative Luftfeuchte	(%)
$s_{f,LN}$	Standardabweichung der logarithmierten Druckfestigkeit	(-)
t	Wanddicke	(mm)
T	Temperatur	(°C)
VK	Variationskoeffizient	

Griechische Buchstaben

α	Konstante zur Berechnung der charakteristischen Mauerwerksdruckfestigkeit	(-)
α_0	Völligkeitsgrad	(-)
β	Konstante zur Berechnung der charakteristischen Mauerwerksdruckfestigkeit; Knicklängenbeiwert	(-)
γ_M	Materialseitiger Teilsicherheitsbeiwert	(-)
γ_{Rd}	Beiwert zur Berücksichtigung von Modellunsicherheiten	(-)
ε	Dehnung	(mm/m)
ε_{el}	Elastische Dehnung	(mm/m)
ε_F	Dehnung bei Erreichen der Maximallast	(mm/m)
$\varepsilon_{k, \infty}$	Endkriechdehnung	(mm/m)
ε_{ult}	Maximale Dehnung	(mm/m)
ζ	Dauerstandsfaktor	(-)
η	Bezogene Dehnung	(-)
η_{ult}	Bezogene maximale Dehnung	(-)
ν_{33}	Querdehnzahl	(-)
ρ_2	Knicklängenbeiwert für zweiseitig gehaltene Wände	(-)
σ	Spannung	(N/mm ²)
σ_{cr}	Kriechspannung	(N/mm ²)
φ	Materialfeuchte	(%)
Φ	Traglastfaktor	(-)
φ_{∞}	Endkriechzahl	(-)

1 Zusammenfassung

1.1 Durchgeführte Untersuchungen

Im Rahmen experimenteller und numerischer Untersuchungen zum Drucktragverhalten von unstabilisiertem Lehmmauerwerk soll ein Bemessungsvorschlag in Anlehnung an das Nachweisverfahren für unbewehrtes Mauerwerk nach DIN EN 1996/NA erarbeitet werden. Insbesondere gilt es die materialspezifischen Besonderheiten des Baustoffs Lehm zu erfassen. Einerseits ist dabei die Reduktion der Druckfestigkeit sowie des Elastizitätsmoduls mit steigendem Feuchtegehalt qualitativ und quantitativ abzubilden und andererseits ist der vergleichsweise geringe Elastizitätsmodul in geeigneter Art und Weise bei der Bemessung zu berücksichtigen. Mittels umfangreicher Druckversuche an Lehmsteinen, Lehmmauermörteln und Mauerwerksprobekörpern wurden die mechanischen Parameter experimentell ermittelt. Anschließend erfolgte eine Kalibrierung und Validierung numerischer und analytischer Modelle, mit Hilfe derer eine Traglastanalyse durchgeführt wurde.

1.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse des Vorhabens sind direkt in den Normungsvorschlag der DIN 18940 für tragendes Lehmmauerwerk eingeflossen und stellen für diesen eine essentielle Grundlage dar. Dabei konnten die bestehenden Regelungen von DIN EN 1996-3/NA in vielen Bereichen unverändert übernommen werden, allerdings erforderten die Feuchteabhängigkeit der Festigkeits- und Verformungseigenschaften sowie der geringe Elastizitätsmodul punktuelle Anpassungen. Diese betreffen die Einführung eines Anpassungsfaktors M , welcher den Einfluss der Materialfeuchte im Bemessungsfall abdeckt, sowie eine modifizierte Gleichung zur Berechnung des Traglastfaktors in Wandhöhenmitte, welche den Einfluss des geringen Elastizitätsmoduls von Lehmmauerwerk berücksichtigt.

1.3 Empfehlungen für das weitere Vorgehen

Es müssen weitergehende Untersuchungen zur tatsächlichen Feuchteverteilung im Mauerwerksquerschnitt unter instationären Klimabedingungen erfolgen, um den Einfluss der Materialfeuchte auf die Wandtragfähigkeit präzise berücksichtigen zu können. Dabei sollte eine detaillierte Zuverlässigkeitsanalyse unter Einbezug der Materialfeuchtestreuung durchgeführt werden. Darüber hinaus ist das Langzeit-Tragverhalten unter wechselnder Feuchte tiefergehend zu analysieren und es gilt die Querkrafttragfähigkeit von Lehmmauerwerk zu untersuchen, um einen Nachweis der Gebäudeaussteifung führen zu können. Schließlich muss die Feuerwiderstandsdauer von Lehmmauerwerkswänden ermittelt werden, um auch eine Bemessung im Brandfall durchführen zu können.

1.4 Kooperationspartner und Förderung

Die Durchführung des Vorhabens erfolgte im Verbund der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Fachbereich 7.2 – Ingenieurbau mit der Technischen Universität Darmstadt, Institut für Massivbau sowie der ZRS Ingenieure GmbH und wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) unter dem Aktenzeichen Az.: 34599/01 gefördert.

2 Einleitung

Die Bauindustrie ist für 37 % des globalen CO₂ Ausstoßes verantwortlich [1] und verursacht 30 % des globalen Abfallaufkommens [2]. In der Bundesrepublik stammen gemäß Umweltbundesamt sogar ~55 % des gesamten Abfallaufkommens von Bau- und Abbruchabfällen [3]. Zwar wird ein erheblicher Teil dieser Abfälle verwertet, allerdings in der Regel in Form minderwertiger Materialien wie etwa Straßenunterbau o.ä. Insbesondere Sand geht dabei als Rohstoff unwiderruflich verloren, wobei bereits jetzt der bundesweite Bedarf an Sand über Importe gedeckt werden muss [4]. Bei Lehmbaustoffen kann aufgrund ihrer Wasserlöslichkeit einerseits eine vollständige Rückgewinnung der materialeigenen Bestandteile – insbesondere der Sandfraktion – erfolgen und andererseits können andere Materialien, die mit den Lehmbaustoffen verbunden waren, wie etwa Dämmstoffe, sortenrein abgetrennt werden. Die Rohstoffe können dann als reine Komponenten zur Herstellung hochwertiger Baustoffe wiederverwertet werden.

Der Bedarf an Wohnungsneubauten in Deutschland liegt derzeit zwischen 220.000 – 350.000 Wohneinheiten pro Jahr [5] - [8], laut Koalitionsvertrag der aktuellen Bundesregierung sollen in dieser Legislaturperiode jährlich sogar 400.000 Wohneinheiten errichtet werden [9]. Gemäß dem Statistischen Bundesamt werden 73 % aller Wohngebäude in Mauerwerksbauweise errichtet, wovon 70 % auf Gebäude mit maximal zwei Wohneinheiten und somit einer geringen Geschossanzahl entfallen [10]. In diesem Bereich stehen bauphysikalische Eigenschaften wie Brand- und Schallschutz im Vordergrund. Eine Verwendung von Baustoffen mit hohen Festigkeiten wie etwa Beton ist in der Regel aus statischen Gründen nicht erforderlich. Die Nutzung von Lehmmauerwerk stellt hier eine ressourcenschonende und klimaverträgliche Alternative dar. Neben der vollständigen Wiederverwertbarkeit benötigt die Herstellung von Lehmbaustoffen in der Regel deutlich weniger Primärenergie als andere Baustoffe. Um eine breite Anwendung von Lehmmauerwerk zu ermöglichen, gilt es allerdings, eine wissenschaftliche Datengrundlage zu erarbeiten, auf deren Basis die baurechtlichen Anforderungen erfüllt und aktualisierte Bemessungsvorschriften erarbeitet werden können. Bisher erfolgt die Bemessung von tagendem Lehmmauerwerk auf Grundlage der Lehmbau Regeln [11], die jedoch auf einem veralteten Sicherheitskonzept beruhen und aufgrund zahlreicher Restriktionen zu einer starken Einschränkung der Anwendung führen. Um die Leistungsfähigkeit moderner, industriell gefertigter Lehmmauerwerksmaterialien bei der Bemessung entsprechend zu berücksichtigen, sind umfangreiche Untersuchungen erforderlich. Dabei ist insbesondere der Einfluss der Feuchtigkeit auf die mechanischen Parameter zu berücksichtigen und im Rahmen der Bemessung adäquat abzubilden. Die mechanischen Eigenschaften von Lehmbaustoffen hängen von der Materialfeuchte ab. Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul verringern sich mit steigendem Feuchtegehalt. In der Baustoffmatrix von Lehm übernimmt die Tonfraktion die Aufgabe des Bindemittels, ähnlich wie der Zementleim im Beton. Allerdings sind die Bindekräfte im Lehmbaustoff elektrostatischer Natur und basieren auf den Ladungsunterschieden der Tonmineraloberflächen. Anders als beim Beton, wo es durch das hydraulische Abbinden zur Bildung von CSH-Phasen kommt oder bei gebrannten Baustoffen wie Ziegeln, wo eine Phasenumwandlung durch den Brennvorgang stattfindet, ist die Bindung der Tonminerale in der Lehmmatrix reversibel. Mit zunehmendem

Feuchtegehalt lagern sich Wassermoleküle schichtweise an den Oberflächen der Tonminerale an, wodurch der Abstand der Minerale untereinander und zu den anderen Körnern zunimmt und sich ihre Bindekräfte reduzieren. Bei ausreichender Zugabe von Flüssigwasser können Lehmbaumstoffe somit vollständig plastizieren. Der Feuchtegehalt von Lehmbaumstoffen wird während der Nutzungsphase – so wie bei allen anderen Baumstoffen – im Wesentlichen von der relativen Luftfeuchte der Umgebung bestimmt und unterliegt klimabedingten Schwankungen. Dieser Sachverhalt ist prinzipiell bekannt und im Rahmen zahlreicher Forschungsarbeiten evaluiert [12] - [18]. Im Hinblick auf Lehmmauerwerk liegen derzeit jedoch keine Erkenntnisse zum Einfluss der Feuchte auf das Tragverhalten vor. Vielmehr wird im Rahmen vorangegangener Forschungsarbeiten darauf verwiesen, dass das Tragverhalten von konventionellem Mauerwerk und Lehmmauerwerk zwar grundlegend ähnlich ist, die Feuchteabhängigkeit von Lehmmauerwerk jedoch zwingend geklärt werden muss, um eine breite Anwendung dieses Mauerwerksbaustoffs zu ermöglichen [19], [20].

Die Zielstellung dieses Forschungsvorhabens war es, Grundlagen für die Bemessung tragenden Lehmmauerwerks auf Basis des normativ verankerten, vereinfachten Bemessungsverfahrens für konventionelles Mauerwerk (DIN EN 1996-3/NA [21], [22]) zu erarbeiten und dabei den Einfluss der Feuchte auf das Tragverhalten adäquat abzubilden. Dazu wurden zunächst umfangreiche experimentelle Untersuchungen durchgeführt und ausgewertet. Im Wesentlichen umfassten diese die Ermittlung der Druckfestigkeit, des Elastizitätsmoduls, sowie des Langzeit-Tragverhaltens in Abhängigkeit der Bauteilfeuchte bzw. der relativen Luftfeuchte des Umgebungsklimas. Im ersten Schritt wurden die mechanischen Kenngrößen der Lehmsteine und Lehmmauermörtel ermittelt. Anschließend wurden kleinformartige Mauerwerksprobekörper unter zentrischer und exzentrischer Druckbeanspruchung geprüft. Um Rückschlüsse zur Systemtragfähigkeit ziehen zu können, wurden abschließend Druckversuche an geschosshohen Lehmmauerwerkswänden unterschiedlicher Schlankheit unter zentrischer sowie exzentrischer Lasteinleitung durchgeführt.

Auf Basis der experimentell gewonnenen Erkenntnisse wurde im Anschluss ein geeignetes Materialmodell kalibriert, welches die materialspezifische Spannungs-Dehnungs-Beziehung von Lehmmauerwerk unter Druckbeanspruchung zutreffend approximiert. Die Traglast von Lehmmauerwerk wurde schließlich auf dieser Grundlage sowohl anhand eines numerischen Finite-Elemente-Modells als auch unter Verwendung eines mauerwerkstypischen analytischen Berechnungsverfahrens ermittelt. Abschließend wurde beurteilt, inwiefern die vereinfachten Bemessungsmethoden für konventionelles Mauerwerk gemäß DIN EN 1996-3/NA [21], [22] unter Berücksichtigung der materialspezifischen Besonderheiten von Lehmmauerwerk für ebendieses angewandt werden können.

Die experimentellen Untersuchungen wurden an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Fachbereich 7.2 Ingenieurbau in Berlin durchgeführt, die numerischen und analytischen Untersuchungen erfolgten am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt (TUDa). Die ZRS Ingenieure GmbH stellt im Wesentlichen das Bindeglied zur Praxis und in die entsprechenden Gremien dar und leitet u.a. in Person von Prof. Ziegert als Obmann den Normungsausschuss Lehmbau (NA 005-06-08 AA).

3 Hauptteil

3.1 Experimentelle Untersuchungen

3.1.1 Materialien, Konditionierungsklimate und Versuchsumfang

Die Durchführung der Untersuchungen erfolgte an zwei Lehmsteinen unterschiedlicher Herstellungsart sowie zwei verschiedenen Lehmmauermörteln, die jeweils aus werkmäßiger Herstellung stammen. Eine breite Auswahl an tragenden Lehmsteinen ist derzeit am Markt noch nicht erhältlich. Es handelt sich um einen formgeschlagenen Vollstein im Normalformat ($240 \times 115 \times 71 \text{ mm}^3$) sowie einen stranggepressten Stein im Format 3DF ($240 \times 175 \times 113 \text{ mm}^3$). Der normalformatige Stein (NF) entspricht gemäß Herstellerangaben der Anwendungsklasse Ib, der Rohdichteklasse 1,8 und der Druckfestigkeitsklasse 2 nach DIN 18945 [23]. Bei dem stranggepressten Stein (3DF) handelt es sich aufgrund des geringen Lochanteils von weniger als 15 % nominell ebenfalls um einen Vollstein, der vom Hersteller speziell für dieses Vorhaben hergestellt wurde und somit keine Deklaration nach Norm besitzt. Die ermittelte Rohdichte des NF-Steins liegt mit 1789 kg/m^3 im Rahmen der normativen Angaben, der 3DF-Stein weist eine Rohdichte von 1874 kg/m^3 auf und ist somit der Rohdichteklasse 2,0 gemäß DIN 18945 [23] zuzuordnen. Die Lehmmauermörtel sind Werkrockenmörtel die gemäß Herstellerangaben der Rohdichteklasse 2,0 entsprechen, wohingegen ein Mörtel der Druckfestigkeitsklasse M3, der andere der Druckfestigkeitsklasse M2 nach DIN 18946 [24] zuzuordnen ist. Der M2 Mörtel weist eine Rohdichte von 1950 kg/m^3 auf, die Rohdichte des M3 Mörtels beträgt 1960 kg/m^3 . Beide Werte liegen damit sehr eng beieinander und entsprechen den normativen Angaben. Die beschriebenen Materialien sind in Abbildung 1 dargestellt.

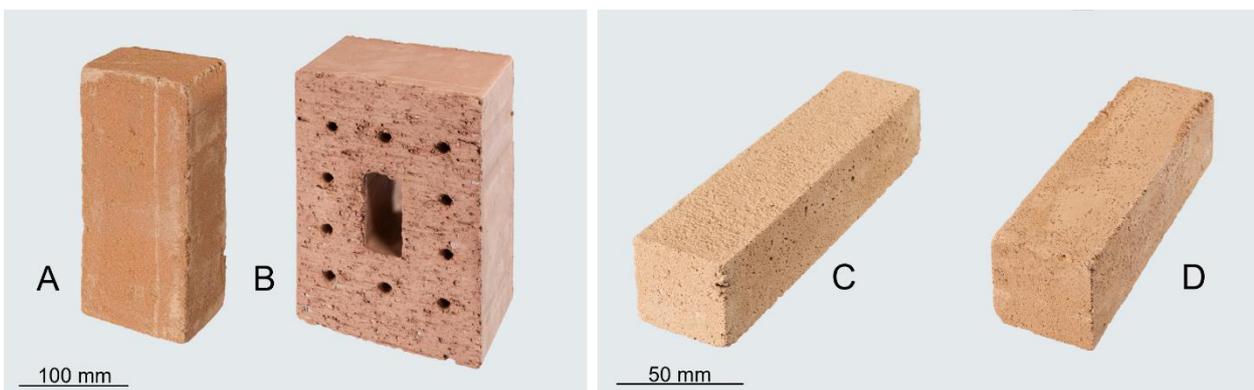


Abbildung 1: Formgeschlagener Lehmstein im Normalformat (A), stranggepresster Lehmstein im Format 3DF (B), Lehmmauermörtel M2 (C) und M3 (D)

Um den Einfluss des Feuchtegehaltes auf die mechanischen Parameter abbilden zu können, wurden drei Konditionierungsklimate mit relativen Luftfeuchten (RLF) im baupraktisch relevanten Bereich gewählt.

- 23 °C/50 % RLF (Standardkonditionierungsklima gemäß DIN 18945/46 [23], [24])
- 20 °C/65 % RLF
- 23 °C/80 % RLF

Alle Probekörper wurden im jeweiligen Klima gelagert, bis die Ausgleichsfeuchte erreicht ist. In Abweichung zu DIN 18945 [23] und DIN 18946 [24] galt diese als erreicht, wenn der Unterschied der Masseänderung bei zwei Wägungen im Abstand von 24 Stunden weniger als 0,1 Masseprozent bezogen auf den kleineren der beiden Messwerte betrug. Der geringfügige Temperaturunterschied bei 65 % RLF liegt in der Tatsache begründet, dass es sich dabei um die Standardklimakonditionen für Beton handelt und dadurch ausreichende und geräumige Klimatisierungsmöglichkeiten an der BAM zur Verfügung standen. Weiterhin kann der Einfluss der Temperatur auf den Feuchtegehalt im baupraktisch relevanten Bereich generell vernachlässigt werden [25]. In Abweichung zu den o.g. Klimaten wurden die Mörteldruckfestigkeiten nach Konditionierung in vier unterschiedlichen Klimaten (50 %, 60 %, 70 % und 80 % RLF) ermittelt, da dies aufgrund der kleinen Probekörper problemlos im Klimaschrank möglich war. Die Untersuchungen zum Langzeit-Tragverhalten fanden lediglich bei 50 % und 65 % RLF statt, da eine langanhaltende hohe RLF von 80 % eine Beschädigung der Messtechnik im Prüfstand zur Folge gehabt hätte.

Die Ermittlung der Druckfestigkeit erfolgte sowohl bei den Steinen als auch bei den Mörteln an je zehn Probekörpern pro Konditionierungsklima, die Verformungsmessungen wurden an je drei Probekörpern pro Klima durchgeführt. Die Kriechdehnungen der Steine wurden an je zwei Probekörpern pro Klima ermittelt, eine explizite Bestimmung der Kriechdehnungen der Mörtel erfolgte nicht. Eine Zusammenfassung des Versuchsumfanges der Prüfungen an Steinen und Mörteln kann Tabelle 1 entnommen werden. Im Falle der NF-Steine wurde die Druckfestigkeit sowohl am halbierten, aufeinander gemauerten Stein gemäß DIN 18945 [23] als auch am ganzen Stein gemäß DIN EN 772-1 [26] ermittelt. Damit wurde untersucht, inwiefern eine Angleichung des Prüfverfahrens von Lehmsteinen an das von konventionellen Mauersteinen valide Ergebnisse liefert.

Tabelle 1: Überblick der Versuche an Steinen und Mörteln

Probekörper		Kenngößen/Beschreibung	Serienumfang	Klimate	Materialien	Gesamt
Steine	ganze Steine	Druckfestigkeit	10	3	2	60
		Längs-, Querdehnungen	3	3	2	18
		Kriechverformungen	2	2	2	8
	NF halb	Druckfestigkeit	10	3	1	30
Mörtel	Kleinprisma	Druckfestigkeit	8	7	2	112
	Großprisma	Längs-, Querdehnungen	3	3	2	18

Aus den je zwei verschiedenen Steinen und Mörteln ergaben sich vier unterschiedliche Mauerwerks-Materialkombinationen. Die mechanischen Kenngößen des Lehm-mauerwerks wurden an kleinformatischen RILEM-Probekörpern (siehe Abbildung 4) unter zentrischer Lasteinleitung ermittelt, wobei je 3 Probekörper pro Klima und Materialkombination geprüft wurden. Da sich die mechanischen Kennwerte in Bezug auf die beiden Mörtel kaum unterscheiden (siehe Tabelle 6), fanden die Mauerwerksversuche mit exzentrischer Lasteinleitung lediglich unter Verwendung eines Mörtels pro Klima statt, wobei zwei Exzentrizitäten gewählt wurden. Insgesamt wurden somit 72 Druckversuche an RILEM-Probekörpern durchgeführt. Um die Systemtragfähigkeit von Lehm-mauerwerk evaluieren zu können, fanden außerdem zehn Druckversuche mit zentrischer und exzentrischer Lasteinleitung an geschosshohen Mauerwerkswänden unterschiedlicher

Schlankheit statt. Aufgrund der Probekörpergröße konnte hier allerdings keine gezielte Konditionierung stattfinden. Die Klimabedingungen (Laborlima) wurden deswegen ab Herstellung der Probekörper bis zur Prüfung kontinuierlich aufgezeichnet. Zur Überprüfung der Materialfeuchte fand eine Rücktrocknung von Bruchstücken nach der Versuchsdurchführung statt. Die Untersuchungen zum Kriechverhalten wurden wie bei den Steinen lediglich für zwei Klimate vorgenommen. Ein Überblick des Versuchsprogrammes an kleinformatischen Mauerwerksprobekörpern ist in Tabelle 2 enthalten, die Versuche an Geschosswänden sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 2: Überblick der Versuche an kleinformatischen Mauerwerksprobekörpern (RILEM)

Kenngrößen/ Beschreibung	Serienumfang	Klimate	Stein-Mörtel Kombinationen	Exzentrizitäten	Gesamt
Druckfestigkeit, Längs- und Querdehnungen unter zentrischer Belastung	3	3	4	-	36
Tragfähigkeit, Längs- und Querdehnungen unter exzentrischer Belastung	3	3	2	2	36
Kriechverformungen	2	2	4		16
				Summe	96

Tabelle 3: Überblick der Versuche an geschosshohen Wänden

Kenngrößen/Beschreibung	Schlankheit	Exzentrizität	Anzahl
Druckfestigkeit/Tragfähigkeit, Längs-, Querdehnungen und Verformungen senkrecht zur Wandebene	8,3	e = 0	2
		e = t/4	2
	11,5	e = 0	2
		e = t/4	2
	17,5	e = 0	2

3.1.2 Probekörperherstellung und Versuchsdurchführung

3.1.2.1 Steine und Mörtel

Die Ermittlung der Druckfestigkeit der Lehmsteine erfolgte gemäß der Lehmsteinnorm DIN 18945 [23], und im Falle der NF-Steine ebenfalls in Anlehnung an DIN EN 772-1 [26]. Der Grund hierfür ist, dass gemäß DIN 18945 [23] Steine mit einer Nennhöhe $h \leq 71$ mm zu halbieren und aufeinander zu mauern sind, wie es früher gemäß DIN V 105-1 [27] auch für gebrannte Ziegel üblich war. Nach der heute gültigen Prüfvorschrift für konventionelle Mauersteine DIN EN 772-1 [26] werden jedoch alle Mauersteine unabhängig ihrer Nennhöhe am ganzen Stein geprüft und anschließend mit einem Formfaktor normiert. Um zu prüfen, inwieweit die im Mauerwerksbau bewährten Prüfvorschriften auf Lehmsteine übertragbar sind und die Formfaktoren angewandt werden können, erfolgte die Prüfung der NF-Steine einerseits am halbierten, aufeinander gemauerten und andererseits am ganzen Stein. Für die Steine im 3DF-Format ergaben sich keine Unterschiede in Bezug auf die beiden Prüfvorschriften, so dass die Prüfung hier lediglich am ganzen Stein erfolgte.

Die Ermittlung der Längs- und Querdehnungen sowie des Kriechverhaltens wurde an sogenannten 3-Stein-Prüfkörpern, wie von Schubert [28] vorgeschlagen, durchgeführt. Eine explizite Prüfvorschrift zur Bestimmung der Verformungskenngrößen von Mauersteinen existiert nicht, es wird in DIN 18945 [23] lediglich ein Belastungsschema zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls angegeben. Die Verwendung der 3-Stein-Prüfkörper ermöglichte die

Messung der Längs- und Querdehnungen im mittleren Prüfkörperdrittel, welches weitestgehend frei von der Querdehnungsbehinderung der Lasteinleitungsplatten ist. Alle Probekörper wurden mit einer möglichst dünnen Schicht Gipsmörtel aufeinander gemauert und an den Lasteinleitungsflächen mit einer dünnen Schicht Gipsmörtel planparallel abgeglichen. Die Steinprobekörper sind in Abbildung 2 dargestellt.

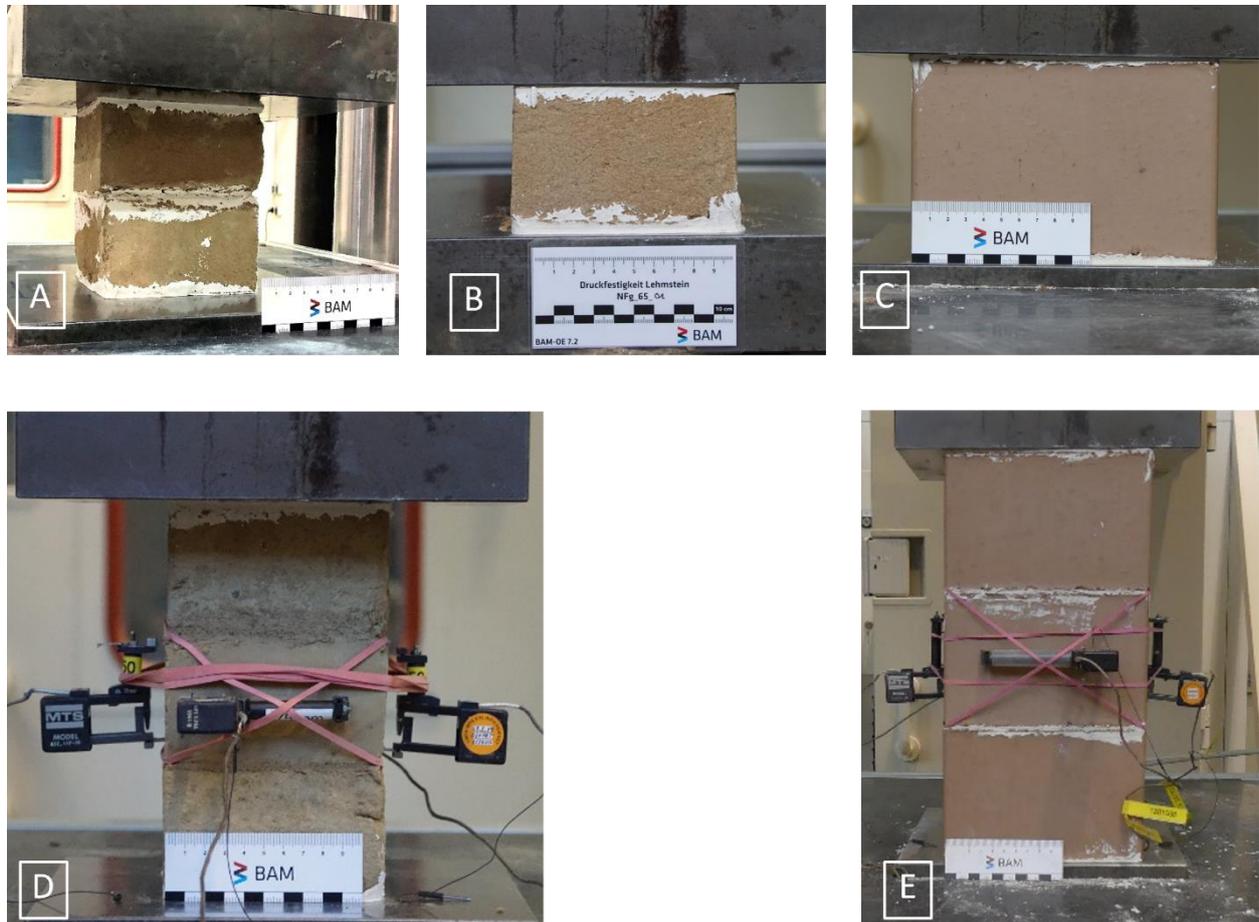


Abbildung 2: Lehmsteinprobekörper zur Ermittlung der Druckfestigkeit sowie der Verformungen: halbiertes, aufeinander gemauerter NF-Stein (A), ganzer NF-Stein (B), und ganzer 3DF-Stein (C) zur Bestimmung der Druckfestigkeit sowie 3-Stein-Probekörper aus NF-Steinen (D) und 3DF-Steinen (E) zur Verformungsmessung

Die Prüfung der Druckfestigkeit erfolgte kraftgesteuert mit einer Belastungsgeschwindigkeit die nach 30 – 90 Sekunden zum Bruch führt und mit steigendem Feuchtegehalt entsprechend reduziert wurde. Die Ermittlung der Verformungskenngrößen erfolgte gemäß dem in DIN 18945 [23] angegebenen Belastungsschema von drei Be- und Entlastungszyklen bis zu einem Drittel der Maximallast mit den zugehörigen Haltezeiten von 30 s. Längs- und Querdehnungen wurden mit je zwei Ansetz-Dehnungsmessern aufgezeichnet. Die Kriechdehnungen wurden analog gemessen, wobei hier induktive Wegaufnehmer anstelle der Ansetz-Dehnungsmesser zum Einsatz kamen. Es wurde eine Kriechspannung von $1,0 \text{ N/mm}^2$ für beide Klimate gewählt, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Die Lastaufbringung erfolgte mit einer Geschwindigkeit von $1,0 \text{ kN/s}$. Die Druckfestigkeit der Lehmmauermörtel wurde an halben Kleinprismen ($160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$) ermittelt. Die Mörtel wurden auf ein Ausbreitmaß von $175 \pm 5 \text{ mm}$ eingestellt und im Standardklima für mindestens 14 Tage getrocknet, davon gemäß DIN 18946 [24]

mindestens sieben Tage nach dem Ausschalen. Anschließend erfolgte die Konditionierung in den entsprechenden Klimaten, wobei die Mörtel wie o.g. in Abweichung zu den Steinen bei vier verschiedenen RLF konditioniert wurden. Zur Bestimmung der Verformungskenngrößen wurden Großprismen gemäß DIN 18555-4 [29] hergestellt. Bei diesen wurden die stirnseitigen Lasteinleitungsflächen, wie bei den Steinen, mit einer dünnen Gipschicht abgeglichen, da sie sich aufgrund des Trocknungsschwindens verkrümmten. Die Prüfung erfolgte in Abweichung zu DIN 18555-4 [29] mit dem in DIN 18945 [23] angegebenen zyklischen Belastungsschema. Grund hierfür ist, dass die in DIN 18555-4 [29] angegebene Belastungsdauer von 15- 20 Minuten bis zum Bruch einen gewissen Anteil zeitabhängiger Verformungen beinhaltet, der bei der zyklischen Prüfung der Steine gemäß DIN 18945 [23] nicht auftritt. Durch die Anpassung des Belastungsschemas ist die Vergleichbarkeit der Verformungskenngrößen von Steinen und Mörteln gegeben. Die Aufzeichnung der Längs- und Querdehnungen erfolgte analog zu den Steinen. In Abbildung 3 sind die beiden Mörtelprobekörper zu sehen.

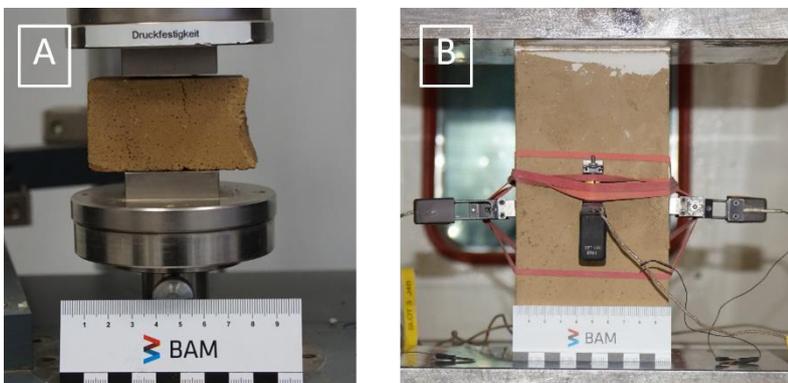


Abbildung 3: Kleinprisma zur Ermittlung der Mörteldruckfestigkeit (A) und Großprisma zur Ermittlung der Verformungskenngrößen (B)

3.1.2.2 Kleinformartige Mauerwerksprobekörper

Die Ermittlung der Festigkeits- und Verformungskenngrößen an Mauerwerksprobekörpern erfolgte gemäß DIN EN 1052-1 [30] im Druckversuch mit zentrischer Lasteinleitung. Die Probekörper wurden mit einer Lagerfugendicke von ~12 mm und vollständig vermörtelten Stoßfugen hergestellt, wobei die Steine an allen Fugenkontaktflächen vorgehäst wurden. Die unterste Reihe wurde mit einer dünnen Schicht Gips auf dem Lasteinleitungsbalken aufgesetzt. Nach dem Aufmauern wurde auf der Oberseite ebenfalls ein Lasteinleitungsbalken mit einer dünnen Gipschicht aufgesetzt und nivelliert, um eine planparallele Lasteinleitung zu gewährleisten. Die Durchführung der Versuche erfolgte weggeregelt mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,2 bis 0,3 mm/min, sodass der Bruch nach 15 bis 30 Minuten eintrat. Die Verformungen wurden mit je zwei induktiven Wegaufnehmern pro Seite in Lastrichtung und je einem induktiven Wegaufnehmer pro Seite in Querrichtung gemessen. Die Probekörpergeometrie mit Anordnung der Messstrecken ist in Abbildung 4 dargestellt.

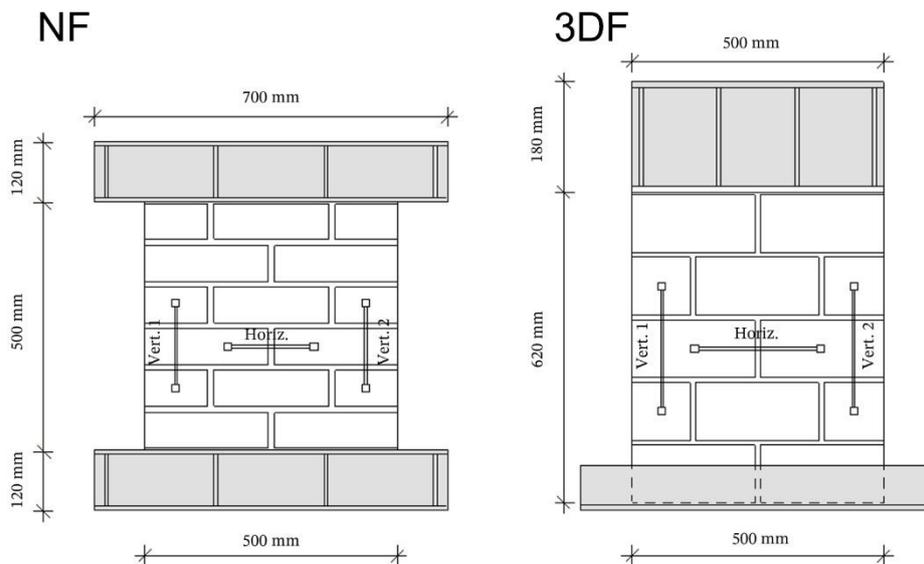


Abbildung 4: Prüfkörpergeometrie mit Anordnung der Messstreifen (oben) und Mauerwerksprobekörper nach Einbau in den Versuchsstand (unten) jeweils für NF und 3DF Steinformate

Für die Traglastversuche an den kleinformatischen Mauerwerksprobekörpern wurden zwei Exzentrizitäten gewählt. Zum einen eine planmäßige Exzentrizität von einem Zehntel der Wanddicke ($e = t/10$) und andererseits eine planmäßige Exzentrizität $e = t/4$, um sowohl den vollständig überdrückten als auch den gerissenen Querschnitt analysieren zu können. Die Lasteinleitung erfolgte dabei sowohl an Ober- als auch an Unterseite des Probekörpers über Halbwellen aus Stahl die in einer gefrästen Hohlkehle frei drehbar gelagert waren. Die Halbwelle wurde dabei am jeweiligen Lasteinleitungsbalken befestigt, wobei die Platte mit Hohlkehlenfräsung mittels Schablone am Probekörper exakt ausgerichtet werden konnte. Somit wurde die Exzentrizität präzise und für alle Probekörper identisch eingestellt. Im Falle der Probekörper aus normalformatigen Steinen war dies nur bedingt möglich, da die Steine wenig maßhaltig sind. Eine exemplarische Darstellung des Versuchsaufbaus und der Lasteinleitung kann Abbildung 5 entnommen werden.



Abbildung 5: Obere (A) und untere (B) Lasteinleitung der exzentrischen Mauerwerksdruckversuche sowie Probekörper aus 3DF-Steinen nach Einbau im Versuchsstand (C)

Die Kriechversuche wurden ebenfalls mit RILEM-Probekörpern durchgeführt, wobei die Anordnung und Messstreckenlänge den Kurzzeitversuchen entsprach (siehe Abbildung 4). Es kamen lediglich andere induktive Wegaufnehmer zum Einsatz. Die Kriechspannung wurde für beide Klimate zu $1,0 \text{ N/mm}^2$ gewählt, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Das entspricht in etwa einem Drittel der im Kurzzeitversuch ermittelten Mauerwerksdruckfestigkeit bei 65 % RLF. Die Lastaufbringung erfolgte mit einer Geschwindigkeit von 5 kN/s .

3.1.2.3 Geschosshohe Wände

Neben den Versuchen an kleinformatigen RILEM- Probekörpern wurden zehn geschosshohe Wände unterschiedlicher Schlankheit geprüft, um die Systemtragfähigkeit von Lehm-mauerwerk evaluieren zu können. Dabei wurden sechs Wände zentrisch und vier Wände mit einer planmäßigen Lastexzentrizität von $e = t/4$ belastet. Die Schlankheit wurde bei konstanter Wandhöhe ($h \approx 2\text{m}$) mittels Variation der Wandstärke entsprechend dem Steinformat eingestellt, wodurch sich jeweils ein Verhältnis aus Wandhöhe zu Wanddicke von $h/t = 8,3$ ($t = 24 \text{ cm}$), $11,4$ ($t = 17,5 \text{ cm}$) und $17,3$ ($t = 11,5 \text{ cm}$) ergab. Die Herstellung erfolgte analog zu den kleinformatigen Probekörpern, wobei eine gezielte Konditionierung aufgrund der Größe nicht möglich war. Die Wände wurden in der Prüfhalle errichtet und gelagert, wo das Klima ab dem Zeitpunkt der Herstellung bis zur Versuchsdurchführung

aufgezeichnet wurde. Die Wände aus den NF-Steinen wurden während der Lagerung aufgrund der hohen Schlankheit seitlich mit einer temporären Einfassung gesichert (siehe Abbildung 6)



Abbildung 6: Geschosshohe Wandprüfkörper während der Lagerung in der Prüfhalle inklusive seitlicher Einfassung der Probekörper aus NF-Steinen

Zu jedem geschosshohen Probekörper wurde zeitgleich ein RILEM-Probekörper hergestellt und bei gleichen Klimakonditionen in der Prüfhalle gelagert. Am Tag der Versuchsdurchführung wurde die Mauerwerksdruckfestigkeit sowie der Elastizitätsmodul des jeweiligen RILEM-Probekörpers im zentrischen Druckversuch ermittelt, um die Anbindung der Großversuche an die mechanischen Kenngrößen der RILEM-Probekörper zu gewährleisten. Die Probekörpermaße der Lehm-mauerwerkswände betragen $1,25\text{m} \times 2,0\text{m}$ (Länge \times Höhe). Zum Einbau in die Prüfmaschine wurden das obere und untere Profil an den Stirnseiten der Probekörper mit je zwei Gewindestangen verspannt und mit zwei Hallenkränen auf dem unteren Lasteinleitungsbalken ausgerichtet. Anschließend erfolgte eine möglichst exakte Nivellierung der oberen Lasteinleitung durch das Aufsetzen einer 2 cm starken Stahlplatte in ein Gipsbett auf dem oberen U-Profil, sodass der an der Prüfmaschine befestigte Lasteinleitungsbalken formschlüssig und eben auflag. Die Lasteinleitung der exzentrischen Druckversuche erfolgte analog zu den exzentrisch belasteten RILEM-Probekörpern mittels einer Halbwelle am unteren bzw. oberen Lasteinleitungsbalken. Bei den zentrischen Druckversuchen wurde auf die Anordnung einer Halbwelle verzichtet. Stattdessen wurden in diesem Fall sowohl die untere Lasteinleitungsplatte als auch der obere Lasteinleitungsbalken vollflächig aufgesetzt. Eine

3. Hauptteil

Ausnahme stellte dabei die Prüfung einer zentrisch belasteten Wand der Dicke $t = 0,115$ m dar, bei der die Lasteinleitung am Wandkopf ebenfalls mittels einer Halbwelle erfolgte. Hierdurch konnte die Einspannung in den Versuchsaufbau reduziert werden, was wiederum die effektive Wandschlankheit erhöhte. Die Messung der Längs- und Querverformungen erfolgte, wie bei den RILEM-Probekörpern, mit induktiven Wegaufnehmern, wobei die Messstrecken der geschosshohen Wände entsprechend größer gewählt wurden (Messstreckenlänge vertikal $\sim h/3$, Messstreckenlänge horizontal $\sim L/2$). Zusätzlich wurden die Verformungen in Querrichtung der Lehmmauerwerkswand in den Viertelpunkten mit drei Lasermessgeräten aufgezeichnet. Die Probekörpergeometrie mit Messstreckenordnung und der Versuchsaufbau sind beispielhaft in Abbildung 7 dargestellt.

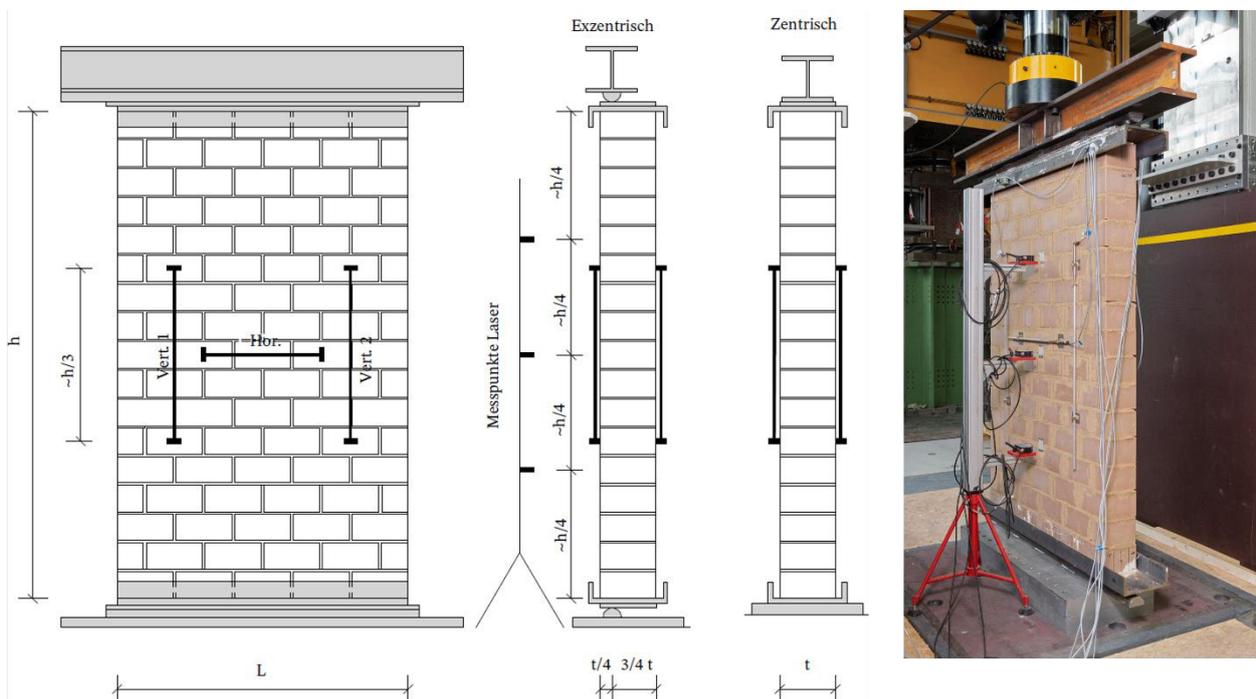


Abbildung 7: Skizze des Versuchsaufbaus der geschosshohen Wandprüfkörper mit zentrischer und exzentrischer Lasteinleitung sowie Wandprüfkörper nach Einbau im Versuchsstand

3.2 Auswertung und Vergleich der Versuchsergebnisse

3.2.1 Einfluss der Feuchte auf Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul

3.2.1.1 Steine und Mörtel

Sowohl Druckfestigkeit als auch Elastizitätsmodul der untersuchten Steine und Mörtel nehmen mit steigender relativer Luftfeuchte des Konditionierungsklimas ab. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse als Mittelwerte (MW) mit Angabe der Variationskoeffizienten (VK) ist in Tabelle 4 und Tabelle 5 enthalten. Die umgerechnete Steindruckfestigkeit $f_{b,norm}$ wurde dabei unter Verwendung des zugehörigen Formfaktors gemäß DIN EN 772-1 [26] aus den Prüfergebnissen der ganzen Steine bestimmt. Anhand dieser Werte sind beide Lehmsteine im Standardklima von 50 % RLF der

Druckfestigkeitsklasse 3 zuzuordnen. Die Lehmörtel sind gemäß DIN 18946 [24] in die Druckfestigkeitsklasse 4 einzuordnen.

Tabelle 4: Ergebnisse der statischen Druckversuche an Lehmsteinen in Abhängigkeit des Konditionierungsklimas

Bezeichnung	Prüfklima	Druckfestigkeit f_b		normierte Druckfestigkeit $f_{b, norm}$ (N/mm ²)	E-Modul E_{33}		Querdehnzahl v_{33}
		MW (N/mm ²)	VK (%)	MW (N/mm ²)	MW (N/mm ²)	VK (%)	MW (-)
NF _{halb} NF _{ganz}	23/50	4,38 5.26	5.9 1.6	4,57	2725	8,0	0,17
	20/65	4,03 4.88	3.6 3.7	4,23	2167	4,4	0,13
	23/80	3,30 4.19	3.5 2.4	3,63	1629	4,2	0,10
3DF	23/50	5,38	3,3	4,98	3222	20,5	0,44
	20/65	4,30	1,5	3,98	3017	2,7	0,52
	23/80	3,55	3,0	3,28	1598	3,8	0,19

Die ermittelten Querdehnzahlen beider Steine lassen erkennen, dass zumindest beim Vergleich der bei 50 % und 80 % RLF ermittelten Werte eine eindeutige Abhängigkeit von der Materialfeuchte besteht. Die Querdehnzahlen der Lehmmauermörtel hingegen sind weitestgehend unabhängig von der Materialfeuchte. Ein Vergleich der gemäß DIN 18945 ermittelten Steindruckfestigkeit f_b mit der normierten Steindruckfestigkeit $f_{b, norm}$ zeigt, dass die Formfaktoren für konventionelle Mauersteine gemäß DIN EN 772-1 [26] prinzipiell auf Lehmsteine übertragbar sind. Für die Ermittlung der Druckfestigkeit gemäß DIN 18945 [23] wird deswegen die Prüfung am ganzen Stein auch für Formate mit einer Nennhöhe ≤ 71 mm empfohlen.

Tabelle 5: Ergebnisse der statischen Druckversuche an Lehmmauermörteln in Abhängigkeit des Konditionierungsklimas

Bezeichnung	Prüfklima	Druckfestigkeit f_m		E-Modul E_{33}		Querdehnzahl v_{33}
		MW (N/mm ²)	VK (%)	MW (N/mm ²)	VK (%)	MW (-)
M2	23/50	4,13	8,7	5699	4,8	0,10
	23/60	3,71	7,3	4421*	6,0	0,11*
	23/70	3,42	7,3			
	23/80	2,94	7,8	3028	32,4	0,1
M3	23/50	3,99	5,3	5419	4,8	0,13
	23/60	3,35	9,3	5139*	3,3	0,12*
	23/70	3,04	7,9			
	23/80	2,86	6,6	4112	12,7	0,14

* Werte bestimmt bei 20 °C/65 % RLF

Eine mögliche Ursache für die auffällig hohen Querdehnzahlen der 3DF-Steine ist die herstellungsbedingte Vorzugsorientierung der Tonmineralplättchen. Beim Strangpressen ordnen sich diese weitestgehend parallel zur Extrusionsrichtung und somit auch zur Lastrichtung. Dadurch kann es bei Belastung zu einem einfacheren Abscheren der Verbindung zwischen den Mineralplättchen kommen, woraufhin diese leichter aneinander vorbeigleiten können und ein Auffächern der Struktur (Delaminierung) bewirken. Dieser Mechanismus führt zu ausgeprägten Querdehnungen der stranggepressten Steine. Bei 80 %

RLF kam dieser Effekt durch die feuchtebedingt steigenden Längsdehnungen weniger zum Tragen.

3.2.1.2 Mauerwerk unter zentrischer Druckbeanspruchung

Ähnlich wie bei Steinen und Mörteln zeigte sich auch bei der RILEM-Probekörpern eine ausgeprägte Abhängigkeit der Druckfestigkeit und des Elastizitätsmoduls von der Materialfeuchte. Eine ausgeprägte Abhängigkeit der Querdehnzahl von der Materialfeuchte ist nicht erkennbar. Weiterhin wird deutlich, dass die beiden Lehmmauermörtel aufgrund ihrer sehr ähnlichen mechanischen Kenngrößen nur einen geringen Einfluss auf die Materialparameter des Lehmmauerwerks haben. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 in Abhängigkeit des Konditionierungsklimas und der Materialkombination zusammengefasst. Eine Übersicht der Ergebnisse je Prüfserie ist in Tabelle A- 1 bis Tabelle A- 12 in Anlage A enthalten.

Tabelle 6: Ergebnisse der zentrischen Mauerwerksdruckversuche in Abhängigkeit des Konditionierungsklimas und der Stein-Mörtel-Kombination

Probekörper	RLF (%)	Anzahl (-)	Druckfestigkeit f		Elastizitätsmodul E_{33}		Querdehnzahl v_{33}
			MW (N/mm ²)	VK (%)	MW (N/mm ²)	VK (%)	MW (-)
NF/M2	50	3	3,72	3,8	1656	6,9	0,18
	65	3	3,12	3,2	1454	28,2	0,14
	80	3	2,51	3,2	1093	10,9	0,13
NF/M3	50	3	3,66	6,3	1399	3,9	0,10
	65	3	3,02	4,3	1528	3,3	0,14
	80	3	2,43	4,5	1225	12,0	0,11
3DF/M2	50	3	3,58	0,3	878	8,9	0,12
	65	3	2,71	0,4	712	23,7	0,12
	80	2	2,36	3,4	597	1,3	0,10
3DF/M3	50	3	3,56	3,4	807	18,8	0,04
	65	3	2,65	0,8	642	10,4	0,03
	80	2	2,27	1,3	592	13,0	0,15

Die Rissbilder im Versagenszustand weisen die für Mauerwerk typischen Charakteristika auf. Die Überschreitung der Steinzugfestigkeit führt zu Rissen im Bereich ober- und unterhalb der Stoßfugen. Zudem kommt es zu Mörtelabplatzungen in den Lagerfugen. Die fortschreitende Rissbildung führt zur Bildung kleiner Scheiben und Schalen im Gefüge des Mauersteins, die schließlich bei weiterer Laststeigerung nach außen knicken und wegbrechen. Dieses Versagensverhalten ist im Falle des Lehmmauerwerks aus den stranggepressten 3DF-Steinen aufgrund der Vorzugsorientierung der Tonmineralplättchen ausgeprägter und kann insbesondere an den Stirnseiten der Probekörper beobachtet werden (siehe Abbildung 8).

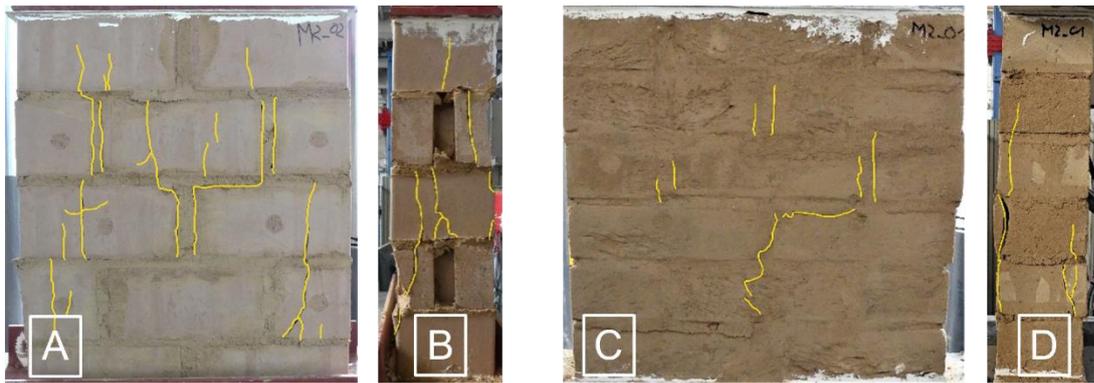


Abbildung 8: Rissbilder der Mauerwerksprobekörper nach Prüfung; Längs (A)- und Stirnseite (B) der 3DF- Probekörper sowie Längs (C) und Stirnseite (D) der NF-Probekörper

Da die Variation der innerhalb des Projekts untersuchten Mörtel - wie bereits erwähnt - keinen nennenswerten Einfluss auf die mechanischen Parameter des Mauerwerks hat, wurden im Rahmen der folgenden Betrachtungen die Ergebnisse je Steinart zusammengefasst und der unterschiedliche Mörtel vernachlässigt. Beide Mauerwerksarten – sowohl das aus NF-Steinen als auch das aus 3DF-Steinen hergestellte - weisen prinzipiell einen vergleichbaren Verlauf der Arbeitslinien auf (siehe Abbildung 9). Bis zu einem Drittel der Maximalspannung verlaufen die Kurven weitestgehend linear und gehen anschließend bis zum Bruch in eine ausgeprägt nichtlineare Phase über. Das Bruchverhalten ist duktil und geht mit einem ausgeprägten Entfestigungsverhalten im Nachbruchbereich einher. Die Dehnungen bei Erreichen der Druckfestigkeit beider Probekörperarten stiegen mit zunehmender relativer Luftfeuchte an. Auffällig ist die anfänglich gegenläufige Krümmung der Spannungs-Dehnungs-Linien der Probekörper aus 3DF-Steinen, die auf eine Verdichtung des Materials bis zu einem Lastniveau von ca. $0,5 \text{ N/mm}^2$ zurückzuführen ist.

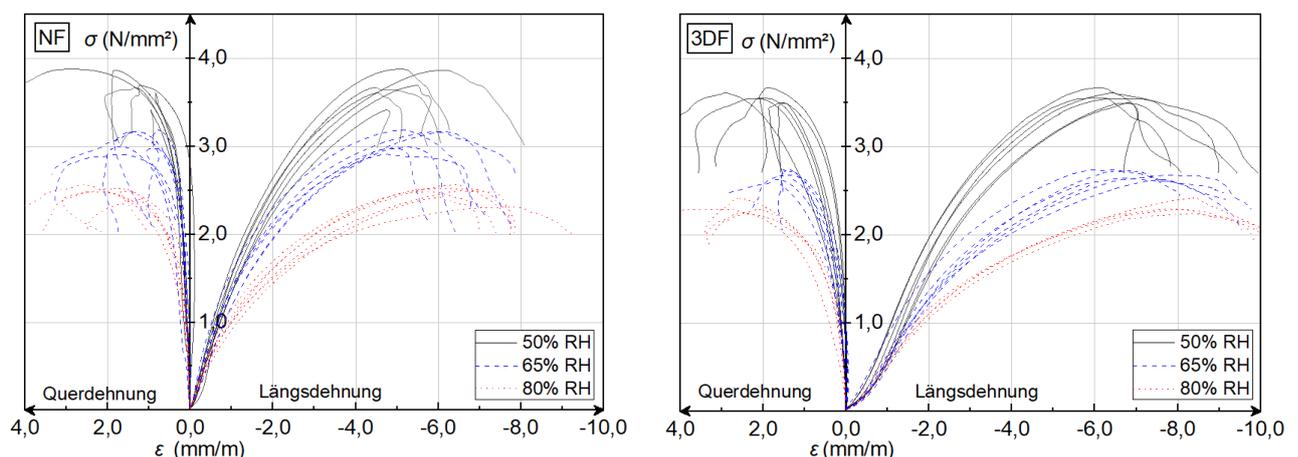


Abbildung 9: Spannungs-Dehnungs-Linien der Mauerwerksprobekörper aus NF-Steinen (links) und 3DF-Steinen (rechts) in Abhängigkeit des Konditionierungsklimas

Weiterhin ist zu erkennen, dass die Reduktion der Festigkeit sowie des Elastizitätsmoduls zwischen 50 % und 65 % RLF im Falle des Mauerwerks aus normalformatigen Lehmsteinen geringer ausfällt als bei den Prüfkörpern aus 3DF-Steinen. Bei der Steigerung der RLF von 65 % auf 80 % verhält es sich umgekehrt, hier weist das Mauerwerk aus NF-Steinen die größere Reduktion auf. Ursache für diesen Unterschied ist die Materialzusammensetzung

der Steine, die im Detail in [31] enthalten ist. Der höhere Tonmineralgehalt der 3DF-Steine führt zu einer erhöhten Wasseraufnahme, was wiederum zunächst zu einer stärkeren Reduktion der Druckfestigkeit im niedrigeren Feuchtebereich führt. Im Bereich höherer Feuchten kommt schließlich der deutlich höhere Anteil an feinen organischen Fasern des 3DF-Steins zum Tragen, welcher dann einen festigkeitssteigernden Bewehrungseffekt hat.

3.2.1.3 Mauerwerk unter exzentrischer Druckbeanspruchung

Die ermittelten Traglasten der RILEM-Probekörper weisen erwartungsgemäß sowohl eine Abhängigkeit von der Lastexzentrizität als auch von den Konditionierungsklimaten auf. Die Ergebnisse sind in Abhängigkeit der Lastexzentrizität und des Konditionierungsklimas in Tabelle 7 zusammengefasst. Eine Übersicht der einzelnen Prüfserien kann Tabelle A- 13 bis Tabelle A- 18 in Anlage A entnommen werden.

Tabelle 7: Ergebnisse der exzentrischen Druckversuche an Mauerwerksprobekörpern in Abhängigkeit der Lastexzentrizität und des Konditionierungsklimas

Steinart	RLF (%)	Anzahl		Traglast F_{\max} (kN)			
				$e = t/10$		$e = t/4$	
		$e = t/10$	$e = t/4$	MW (kN)	VK (%)	MW (kN)	VK (%)
NF	50	3	3	187,51	9,3	101,98	13,7
	65	3	3	153,81	6,7	92,49	6,8
	80	2	4	134,03	0,2	76,85	8,2
3DF	50	3	3	199,93	2,4	136,23	1,3
	65	3	3	160,03	2,7	135,72	15,2
	80	3	3	151,37	2,0	103,32	3,4

Die Mauerwerksprobekörper aus 3DF-Steinen versagten dabei sowohl bei der kleineren als auch bei der größeren Exzentrizität äußerst duktil, wohingegen die Probekörper aus NF-Steinen bei der Exzentrizität $e = t/4$ im Bereich hoher RLF eher spröde versagten. Im Bereich der Maximallast traten bei beiden Mauerwerksarten auf der Biegedruckseite sichtbare Risse in den Steinen ober- und unterhalb der Stoßfugen auf und es kam zu großformatigen schalenförmigen Abplatzungen der Steine im mittleren Probekörperbereich. Bei einer Lastexzentrizität von $e = t/4$ trat auf der Biegezugseite meist ein durchgehender horizontaler Riss in der Lagerfuge ober- bzw. unterhalb der mittleren Steinreihe auf. Im Fall einer Exzentrizität von $e = t/10$ entstanden dagegen auf Grund des vollständig überdrückten Querschnitts keine sichtbaren horizontalen Risse. Das Versagen bei Erreichen der Maximallast erfolgte bei der geringeren Lastexzentrizität analog zu den zentrischen Druckversuchen. Bei den Probekörpern mit $e = t/4$ konnte im Nachbruchbereich ein Ausknicken durch die zunehmende Längsverformung beobachtet werden. Dies ist exemplarisch anhand eines Mauerwerksprobekörpers aus 3DF-Steinen nach Prüfung bei einer Exzentrizität von $e = t/4$ in Abbildung 10 dargestellt.

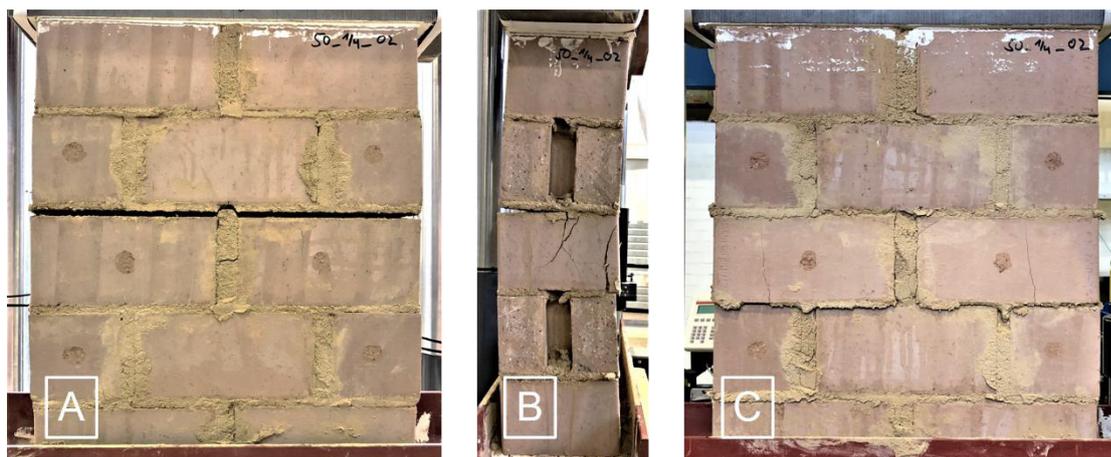


Abbildung 10: Exemplanisches Rissbild eines Mauerwerksprobekörpers aus 3DF-Steinen nach Prüfung bei $e = t/4$; klaffender, horizontaler Riss in der Lagerfuge auf Biegezugseite (A), Stirnseite mit schalenartiger Abplatzung auf Biegedruckseite (B) und klaffendem Riss auf Biegezugseite (B) und großflächige Abplatzungen der Steine auf Biegedruckseite (C)

3.2.2 Kriechverhalten von Steinen und Mauerwerk

Die Kriechkurven des Lehm-mauerwerks weisen einen für mineralische Baustoffe typischen Verlauf auf. Die Zunahme der Kriechverformung nimmt mit steigender Belastungsdauer ab. Die Kriechdehnungen nähern sich schließlich asymptotisch einem Endwert an. Die Untersuchungen bei 50 % RLF wurden über einen Zeitraum von insgesamt 82 Tagen durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass nach 21 Tagen $\sim 80 - 90\%$ der Endkriechverformung erreicht sind. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde die Standzeit der Versuche bei 65 % RLF auf 45 Tage verkürzt. Der Verlauf der Kriechdehnungen ist in Abbildung 11 getrennt für Mauerwerk aus NF-Steinen und 3DF-Steinen für die beiden Klimate dargestellt. Während sich bei dem Mauerwerk aus NF-Steinen bei 65 % RLF deutlich höhere Kriechverformungen als bei 50 % RLF einstellten, ist dies beim 3DF-Mauerwerk nicht der Fall. Hier verlaufen die Kriechdehnungen bis zu einer Belastungsdauer von etwa einer Woche deckungsgleich. Im Anschluss nehmen die Kriechdehnungen bei 65 % RLF mit zunehmender Belastungsdauer weniger stark zu als bei 50 % RLF. Eine Ursache hierfür ist

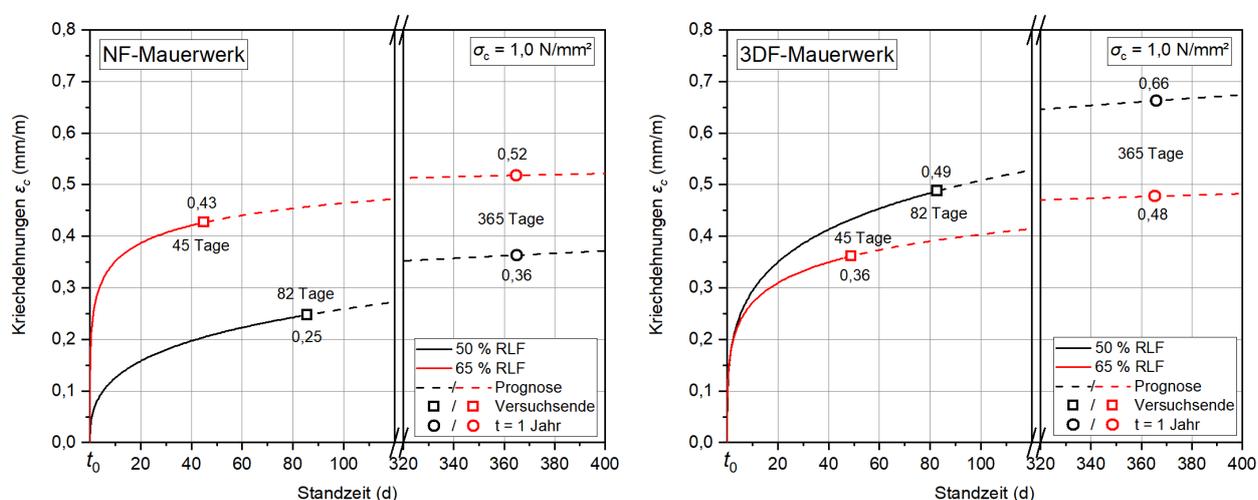


Abbildung 11: Verlauf der Kriechdehnungen für NF (links) und 3DF Mauerwerk (rechts) in Abhängigkeit der RLF mit prognostiziertem Verlauf bis zum Zeitpunkt $t = 365$ Tage

das Kriechverhalten der Steine, welches im Falle der 3DF-Steine nahezu unabhängig von der RLF ist wie in Abbildung A- 1 im Anhang ersichtlich ist.

Auf Grundlage der Endkriechmaße bei Versuchsende (siehe Abbildung 11) konnten die Endkriechdehnungen zum Zeitpunkt $t = \infty$ für das NF- Mauerwerk zu $\varepsilon_{c,\infty} = 0,36/0,52 \text{ ‰}$ (50 % RLF/65 % RLF) und für das 3DF Mauerwerk zu $\varepsilon_{c,\infty} = 0,66/0,48 \text{ ‰}$ (50 % RLF/65 % RLF) abgeschätzt werden.

Die Endkriechzahlen φ_{∞} des Lehm-mauerwerks wurden aus dem Quotienten der prognostizierten Endkriechdehnungen $\varepsilon_{c,\infty}$ und den elastischen Dehnungen ε_{el} ermittelt. Die elastischen Dehnungen wurden aus dem Verhältnis der Kriechspannung σ_c zum im Kurzzeitversuch bei der jeweiligen RLF ermittelten Elastizitätsmodul E_{33} bestimmt. Im Falle des Lehm-mauerwerks aus 3DF-Steinen ergibt sich somit eine Endkriechzahl von $\varphi_{\infty} = 0,56$ (50 % RLF) bzw. $\varphi_{\infty} = 0,36$ (65 % RLF). Für Mauerwerk aus NF-Steinen beträgt sie $\varphi_{\infty} = 0,55$ (50 % RLF) und $\varphi_{\infty} = 0,75$ (65 % RLF). Der obere Grenzwert zur Anwendbarkeit der vereinfachten Berechnungsmethoden gemäß DIN EN 1996-3/NA [17] von $\varphi_{\infty} = 2,0$ wird somit eingehalten.

3.2.3 Tragverhalten schlanker Lehm-mauerwerkswände

Die Normkrafttragfähigkeit der geschosshohen Wandprüfkörper ist in Tabelle 8 zusammengefasst. Die Klimaverhältnisse während des gesamten Konditionierungszeitraums waren weitestgehend konstant (Labor-klima). Die Aufzeichnung von Temperatur und relativer Luftfeuchte sowie der Prüfzeitpunkte kann Abbildung A- 2 in Anlage A entnommen werden. Die Rück-trockenproben sowie die zugehörigen RILEM Probekörper ergaben einen mittleren Feuchtegehalt, der weitestgehend mit der vorherrschenden RLF übereinstimmt.

Tabelle 8: Ergebnisse der Druckversuche an geschosshohen Wandprüfkörpern in Abhängigkeit der Lastexzentrizität und Schlankheit h/t

Probekörper	Prüfdatum	Exzentrizität e	Steinart	Wandstärke t (cm)	h/t	Traglast F_{\max} (kN)
GW_01	23.02.22	0	3DF	17,5	11,4	519,1
GW_02	25.02.22	0	3DF	17,5	11,4	542,2
GW_03	02.03.22	0	NF	11,5	17,3	468,7
GW_04	04.03.22	0	3DF	24	8,3	698,3
GW_05	05.03.22	0	3DF	24	8,3	672,1
GW_06	16.03.22	$t/4$	3DF	24	8,3	358,4
GW_07	18.03.22	$t/4$	3DF	24	8,3	349,6
GW_08	23.03.22	$t/4$	3DF	17,5	11,4	171,5
GW_09	29.03.22	$t/4$	3DF	17,5	11,4	213,2
GW_10	31.03.22	0	NF	11,5	17,3	395,0

Das Versagensbild der zentrisch belasteten Lehm-mauerwerkswände entspricht prinzipiell dem der RILEM-Probekörpern. Der Bruch erfolgte duktil und kündigte sich durch vertikale Risse in den Steinen und durch ein Abplatzen des Lagerfugenmörtels an. Im

Nachbruchbereich kam es vermehrt zu schalenförmigen Ausbrüchen der Steine in den seitlichen Randbereichen der Probekörper (siehe Abbildung 12 (A)). Bei den exzentrisch belasteten Probekörpern traten verhältnismäßig große Verformungen quer zur Wandebene ein (Abbildung 12 (B)), wobei ein Stabilitätsverlust durch Ausknicken der Probekörper erst nach dem Erreichen der Maximallast eintrat. Dabei stellte sich bei den Wandprüfkörpern mit 24 cm Wandstärke ein klaffender Riss im Bereich der mittleren Lagerfugen ein (Abbildung 12 (C)), wohingegen die schlankeren Probekörper der Wandstärke 17,5 cm komplett ausknickten.

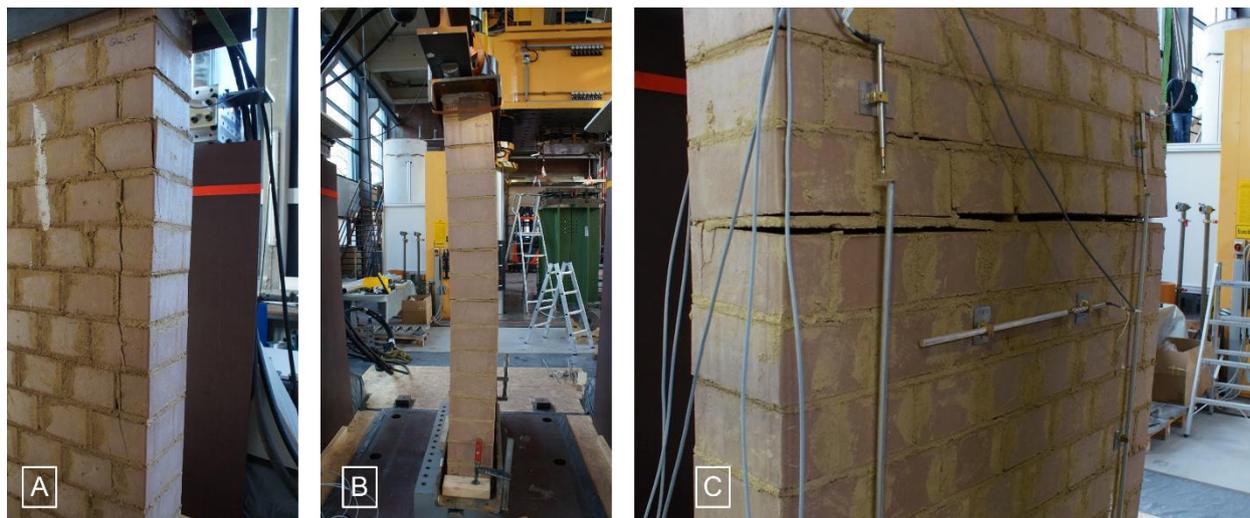


Abbildung 12: Geschosshoher Wandprüfkörper nach zentrischem Druckversuch mit vertikalen Rissen im Randbereich (A), Verformungsfigur eines exzentrischen Druckversuches (B) und klaffender Riss in der Lagerfuge nach exzentrischer Prüfung (C)

3.3 Zusammenfassung

Die Auswertungen der experimentellen Untersuchungen zeigen, dass der Einfluss der relativen Luftfeuchte auf Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul von Lehm-mauerwerk in guter Näherung als linear beschrieben werden kann. Bei gleichmäßiger Feuchteverteilung über den gesamten Querschnitt durch Konditionierung bis zum Erreichen der Massekonstanz reduzieren sich die beiden für druckbeanspruchtes Mauerwerk wesentlichen mechanischen Eigenschaften in linearer Abhängigkeit zur steigenden RLF.

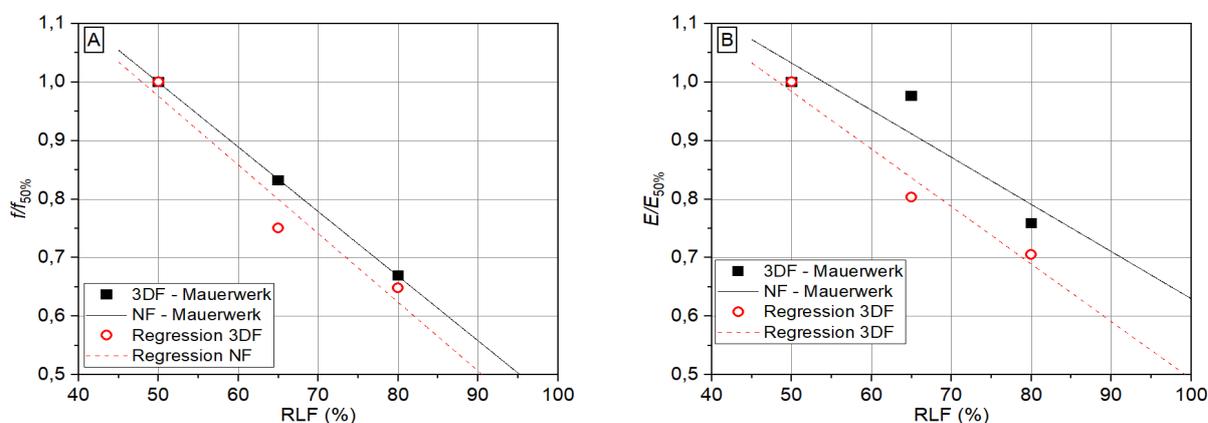


Abbildung 13: Feuchtebedingte Reduktion von Druckfestigkeiten (A) und Elastizitätsmodul (B) von Lehm-mauerwerk bezogen auf die bei Standardklimakonditionen ermittelten Werte

Um diesen Zusammenhang materialunabhängig darzustellen, sind die Druckfestigkeiten und Elastizitätsmoduln des Lehmmauerwerks in Abbildung 13 bezogen auf die bei Standardklimakonditionen (23 °C/50 % RLF) ermittelten Eigenschaften dargestellt. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass die relative Abnahme von Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul des Mauerwerks weitestgehend unabhängig von der hier untersuchten Steinart ist. So reduziert sich die Mauerwerksdruckfestigkeit bei einer Steigerung der RLF von 50 % auf 80 % um 33 % im Falle des NF-Mauerwerks und um 35 % bei dem Mauerwerk aus 3DF-Steinen. Der Elastizitätsmodul verringert sich um 24 % (NF) bzw. um 30 % (3DF). Der lineare Zusammenhang besteht ebenso in Bezug auf die Druckfestigkeiten und Elastizitätsmoduln der untersuchten Lehmsteine und Mörtel (siehe Abbildung A- 3 und Abbildung A- 4) und konnte im Rahmen weiterer Forschung mittels serieller Untersuchungen an Steinen und Mörteln bei sieben verschiedenen RLF im Bereich zwischen 40 % und 95 % RLF bestätigt werden [31]. Die Druckfestigkeiten des untersuchten Lehmmauerwerks liegen auch bei hoher RLF von 80 % mit Werten zwischen 2,27 – 2,51 N/mm² im Bereich von Porenbetonmauerwerk, wobei der Elastizitätsmodul des Mauerwerks aus den stranggepressten Steinen mit Werten zwischen 592 – 878 N/mm² vergleichsweise gering ausfällt. Demzufolge ist das Verhältnis von Elastizitätsmodul zu charakteristischer Mauerwerksdruckfestigkeit (E_{33}/f_k) deutlich geringer als bei konventionellem Mauerwerk. Allerdings ist es unabhängig von der Materialfeuchte, was eine wesentliche Vereinfachung bei der Bemessung bedeutet.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Tragverhalten und Versagensmechanismen vergleichbar mit denen von konventionellem Mauerwerk sind. Das Spannungs-Dehnungsverhalten ist wie bei Kalksandsteinmauerwerk nichtlinear mit einem ausgeprägten Entfestigungsbereich. Die Völligkeit der Spannungs-Dehnungslinien (α_0) liegt dementsprechend ebenso im Bereich von Kalksandsteinmauerwerk wie auch die Werte der Querdehnzahlen (ν_{33}). Die Endkriechzahl φ_∞ liegt in der Regel deutlich unterhalb des in DIN EN 1996-3 [21] verankerten Grenzwertes von 2,0 zur Anwendung des vereinfachten Verfahrens. Um die ermittelten und hier genannten Kennwerte besser einordnen zu können, ist in Tabelle 9 ein Vergleich zu den entsprechenden Werten konventionellen Mauerwerks enthalten. Die charakteristische Druckfestigkeit des Lehmmauerwerks wurde dabei gemäß DIN EN1052-1 [30] durch Division der Mittelwerte mit 1,2 ermittelt.

Tabelle 9: Vergleich der mechanischen Kenngrößen des untersuchten Lehmmauerwerks mit den entsprechenden Wertebereichen von Porenbeton- und Kalksandsteinmauerwerk

Mauerwerk	RLF (%)	E_{33}/f_k (-)	ν_{33} (-)	ε_f (mm/m)	α_0 (-)	φ_∞ (-)
Lehm (NF)	50	497	0,13	4,4	0,65	1,30
	65	583	0,14	5,2	0,70	2,0
	80	563	0,10	6,4	0,71	-
Lehm (3DF)	50	283	0,07	6,3	0,64	0,94
	65	303	0,02	7,0	0,66	0,75
	80	308	0,10	8,1	0,68	-
Porenbeton*	-	500 - 650	0,17 – 0,32	1,4 – 3,7	0,53 – 0,60	1,0 – 2,5
Kalksandstein*	-	800 - 1250	0,07 – 0,12	1,3 – 3,9	0,57 – 0,75	1,0 – 2,0

* Werte aus [32]

3.4 Numerische und analytische Traglastberechnung

3.4.1 Allgemeines

Aufbauend auf den zuvor dargestellten experimentellen Untersuchungsergebnissen wird nachfolgend eine detaillierte Analyse der Tragfähigkeit druckbeanspruchten Lehm-mauerwerks unter Variation verschiedener Parameter wie der Materialfeuchte, Wandschlankheit und Lastexzentrizität mittels numerischer und analytischer Berechnungsmethoden durchgeführt. Auf dieser Grundlage wird in Kapitel 3.5 ein Bemessungsvorschlag in Anlehnung an die bestehenden Regelungen des Eurocode 6 erarbeitet.

Die Grundlage einer wirklichkeitsnahen Traglastberechnung bildet die zutreffende Modellierung der materialspezifischen Spannungs-Dehnungs-Beziehung. Daher wird eingangs ein geeigneter Modellierungsansatz zur Approximation der nichtlinearen Arbeitslinie von Lehm-mauerwerk unter einaxialer Druckbeanspruchung vorgestellt. Die Kalibrierung des Materialmodells erfolgt anhand der in Kapitel 3.2.1.2 beschriebenen experimentellen Untersuchungsergebnisse an zentrisch beanspruchten Lehm-mauerwerksprobekörpern. Im Anschluss werden grundlegende Annahmen der numerischen Modellbildung, wie die Modellgeometrie, die Auflager- und Belastungsbedingungen sowie die gewählte Diskretisierung, erläutert. Neben der numerischen Analyse des Tragverhaltens wird zudem die Anwendbarkeit eines mauerwerksspezifischen analytischen Traglastmodells überprüft, welches es erlaubt die Tragfähigkeit druckbeanspruchten Mauerwerks geschlossen und ohne aufwändiges Iterationsverfahren wirklichkeitsnah zu ermitteln. Abschließend erfolgt sowohl eine Validierung des numerischen als auch des analytischen Traglastmodells anhand der in Kapitel 3.2.1.3 und Kapitel 3.2.3 dargelegten Versuchsergebnisse an Lehm-mauerwerk unter exzentrischer Druckbeanspruchung sowie variierender Wandschlankheit.

3.4.2 Materialmodellierung

Die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen von Mauerwerk unter Druckbeanspruchung können sowohl im Verfestigungs- als auch im Entfestigungsbereich deutliche materialspezifische Differenzen aufweisen [34]. In Abhängigkeit des betrachteten Mauerwerksbaustoffs ergeben sich daher Unterschiede des Festigkeits- und Verformungsverhaltens, welche sich signifikant auf die resultierende Tragfähigkeit auswirken können. Demzufolge ist es im Zuge einer wirklichkeitsnahen Traglastermittlung von Lehm-mauerwerk erforderlich, das Materialverhalten mit Hilfe eines geeigneten Modellierungsansatzes zutreffend abzubilden. Hierzu wurde das einaxiale Materialmodell nach Gl. (1) aus DIN EN 1992-1-1 [35] verwendet, welches sich flexibel an den Verlauf von Spannungs-Dehnungs-Beziehungen mineralischer Baustoffe anpassen lässt und somit eine geeignete Möglichkeit bietet, die ausgeprägte Nichtlinearität der Arbeitslinie sowie die das duktile Materialverhalten von Lehm-mauerwerk abzubilden.

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

Mit:

$$\eta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_f} \quad (2)$$

$$\eta_{\text{ult}} = \frac{\varepsilon_{\text{ult}}}{\varepsilon_f} \quad (3)$$

$$k = \frac{E_0}{E_f} = \frac{E_0}{f} \cdot \varepsilon_f \quad (4)$$

Die allgemeine Formulierung des Materialgesetzes erfolgt dabei anhand der auf die Druckfestigkeit bezogenen Spannung σ/f sowie der gemäß Gl. (2) normierten Dehnung η . Der nach Gl. (4) definierte Parameter k gibt den Grad der Nichtlinearität der Arbeitslinie an und bezeichnet gleichzeitig den bezogenen Ursprungselastizitätsmodul der Spannungs-Dehnungs-Beziehung. Dieser materialspezifische Eingangsparameter berechnet sich aus dem Verhältnis zwischen dem Tangentenmodul im Ursprung der Arbeitslinie E_0 und dem Sekantenmodul bei Erreichen der Druckfestigkeit E_f . Durch Variation des bezogenen Ursprungselastizitätsmoduls k lassen sich mit Hilfe des gewählten Materialgesetzes beliebige Nichtlinearitäten der zu modellierenden Spannungs-Dehnungs-Beziehung einstellen. Bei Ansatz des unteren Grenzwerts in Höhe von $k = 1$ ergibt sich aus Gl. (1) ein linearer Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Linie, wohingegen durch den theoretischen oberen Grenzfall von $k \rightarrow \infty$ starr-plastisches Materialverhalten modelliert werden kann. Beträgt $k = 2$ ist der Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Linie identisch zu einer quadratischen Parabel. Üblicherweise liegt der bezogene Ursprungselastizitätsmodul für mineralische Baustoffe in einem Bereich von $k \approx 1 - 3$. [36]

Darüber hinaus lässt sich mit Hilfe des Materialmodells nach Gl. (1) im bezogenen Dehnungsbereich von $1 < \eta < \eta_{\text{ult}}$ das ausgeprägte Entfestigungsverhalten von Lehm-mauerwerk abbilden. Analog zum Verfestigungsbereich wird die Nichtlinearität des Entfestigungsbereichs durch den bezogenen Ursprungselastizitätsmodul k determiniert. Der Grenzfall $k = 1$ entspricht dabei einem sofortigen Spannungsabfall nach Erreichen der Druckfestigkeit und stellt somit sprödes Versagen dar, wohingegen durch $k > 1$ eine duktile Entfestigung modelliert werden kann. Im Grenzfall $k \rightarrow \infty$ ergibt sich durch das damit induzierte starr-plastische Materialverhalten eine konstante Spannung bis zum Erreichen der bezogenen maximalen Dehnung η_{ult} . Ein Überschreiten von η_{ult} stellt in jedem Fall absolutes Materialversagen dar, woraufhin im zugehörigen Querschnittsbereich keinerlei Spannung mehr aufgenommen werden kann.

Da sich der Tangentenelastizitätsmodul im Ursprung der Arbeitslinie nicht unmittelbar aus den experimentellen Untersuchungsergebnissen bestimmen lässt, wurde der Modellierungsparameter k im Rahmen der hier dargestellten Analyse durch eine iterative Anpassung des Materialmodells an die experimentell ermittelten Spannungs-Dehnungs-Linien des untersuchten Lehm-mauerwerks mit Hilfe einer Minimierung der Fehlerquadrate

bestimmt. Da aus den experimentellen Untersuchungen hervorging, dass das Verhältnis aus Elastizitätsmodul zu Mauerwerksdruckfestigkeit E/f sowie die Dehnung bei Erreichen der Druckfestigkeit ε_f näherungsweise als feuchteunabhängig angenommen werden können, wurde auch der bezogene Ursprungsmodul k nicht von Änderungen der Materialfeuchte beeinflusst. Demzufolge konnte der bezogene Ursprungsmodul über alle Konditionierungsklimate gemittelt werden, was zu $k = 2,68$ für das untersuchte Lehm-mauerwerk aus NF-Steinen bzw. zu $k = 1,91$ für das untersuchte Lehm-mauerwerk aus 3DF-Steinen führte. Die jeweiligen Einzelwerte können in tabellarischer Form Anlage B entnommen werden. Hierbei sei angemerkt, dass dieser Materialparameter mit Variationskoeffizienten von 23 % (NF) bzw. 12 % (3DF) erhöhten Streuungen unterliegt. Zur allgemeinen Modellierung des Materialverhaltens unstabili-sierten Lehm-mauerwerks wurde im Rahmen der nachfolgenden Traglastanalysen ein abgerundeter Mittelwert in Höhe von $k = 2,2$ verwendet. Dem Modellierungsansatz lag dabei ein mittleres Verhältnis aus Elastizitätsmodul zu charakteristischer Mauerwerksdruckfestigkeit von $E_{33}/f_k \approx 440$ sowie einer durchschnittlichen absoluten Dehnung bei Erreichen der Druckfestigkeit von $\varepsilon_f \approx 5,5 \text{ ‰}$ zugrunde [37].

Weiterhin haben die in Kapitel 3.2 dargestellten Versuchsergebnisse gezeigt, dass das untersuchte Lehm-mauerwerk eine ausgeprägte Duktilität aufweist. Aus diesem Grund wurde das Entfestigungsverhalten im Rahmen der Traglastberechnung durch eine bezogene maximale Dehnung von $\eta_{ult} = 1,3$ berücksichtigt. Dieser Wert spiegelt die maximalen Dehnungen des Lehm-mauerwerks zutreffend wider und ermöglicht die vollständige Ausnutzung der traglaststeigernden Wirkung des Entfestigungsbereichs bei einer Spannungs-Dehnungs-Linie mit einem bezogenen Ursprungs-elastizitätsmodul von $k = 2,2$. In Abbildung 14 sind die für verschiedene Konditionierungsklimate experimentell ermittelten Spannungs-Dehnungs-Beziehungen von Lehm-mauerwerk mit dem nichtlinearen Materialmodell nach Gl. (1) unter Ansatz der erläuterten Randbedingungen gegenübergestellt.

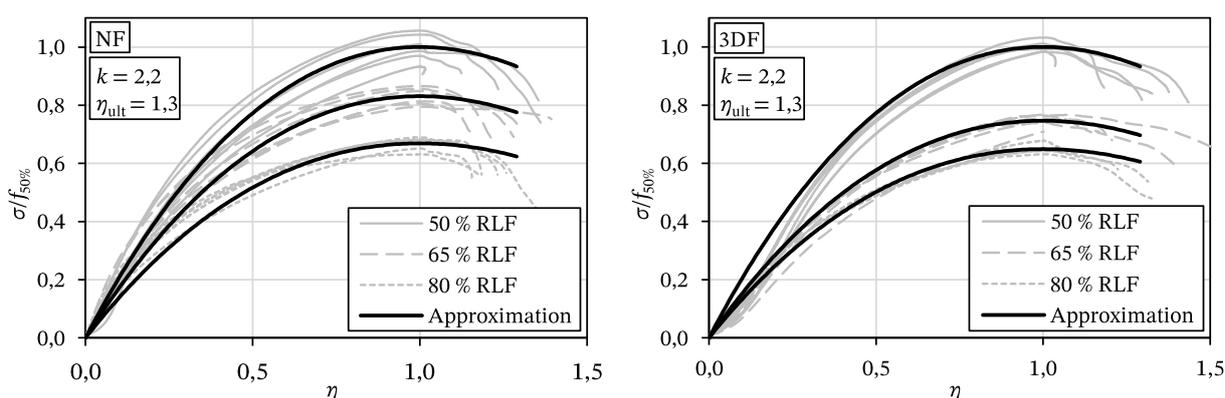


Abbildung 14: Approximation der experimentell ermittelten Spannungs-Dehnungs-Beziehungen von Lehm-mauerwerk aus NF und 3DF Steinen mit Hilfe des gewählten Materialmodells

Wie sich anhand des Vergleichs erkennen lässt, stellt das gewählte Materialmodell für jedes der untersuchten Konditionierungsklimate eine zutreffende Approximation der Spannungs-Dehnungs-Beziehung dar. Da sowohl der nichtlineare Verfestigungs- als auch

Entfestigungsbereich adäquat erfasst wurden, eignete sich der Modellierungsansatz für die weiterführende Analyse der Tragfähigkeit druckbeanspruchten Lehmmauerwerks.

3.4.3 Numerische Berechnung der Traglast

3.4.3.1 Modellierungsstrategie und Geometrie

Die numerische Modellierung des Lehmmauerwerks wurde mit Hilfe der Software DIANA FEA durchgeführt. Hierbei setzt sich das erzeugte Finite-Elemente-Modell aus einzelnen Kontinuumselementen zusammen, welche sich durch Rotations- und Translationsfreiheitsgrade innerhalb des Gesamtsystems bewegen können, allerdings untereinander mittels definierter Kontaktbedingungen verbunden sind. Im Gegensatz zu einer vollständig homogenen Modellierung der Mauerwerkswand ist bei diesem Ansatz der Zusammenhalt des Gesamtgefüges nicht als notwendiges Kriterium vorausgesetzt, wodurch sich Relativverschiebungen zwischen den einzelnen Modellierungselementen einstellen können. Diese Eigenschaft ist bei der numerischen Modellierung der Stein-Mörtel-Interaktion von Mauerwerk besonders bedeutsam, da sich somit eine realitätsnahe Näherung des tatsächlichen Verbundverhaltens generieren lässt.

Zur Analyse der globalen Tragfähigkeit von Lehmmauerwerk orientiert sich die nachfolgend vorgestellte Modellbildung am Ansatz der vereinfachten Mikromodellierung [38]. Hierbei werden die Mauersteine um die Hälfte der angrenzenden Mörtelfugen erweitert und als Volumenelemente modelliert. Im Fall der normalformatigen Lehmsteine führte dieser Ansatz zu Elementgrößen von $250 \times 115 \times 83 \text{ mm}^3$ und im Fall der Lehmsteine im Format 3DF ergaben sich Elementgrößen von $250 \times 175 \times 125 \text{ mm}^3$. Die Lagerfugen wurden dabei einheitlich mit einer Dicke von 12 mm und die Stoßfugen mit einer Dicke von 10 mm angenommen. Im Rahmen der Modellbildung wurde weiterhin von einem halbsteinigen Überbindemaß ausgegangen.

An der Ober- und Unterseite des Finite-Element-Modells wurden die Volumenelemente von Lasteinleitungsplatten eingefasst. Diese leiteten die aufgebrachte Vertikalbelastung flächig in die Mauerwerkswand ein und verhinderten somit Spannungssingularitäten infolge der linienförmigen Auflasten bzw. Lagerungsbedingungen (siehe Kapitel 3.4.3.2). Die Lasteinleitungsplatten wurden im Rahmen der Modellierung anhand einer massiven Stahlplatte mit einer Dicke von 50 mm idealisiert. In Abbildung 15 ist exemplarisch das numerische Modell eines RILEM-Prüfkörpers aus normalformatigen Lehmsteinen dargestellt.

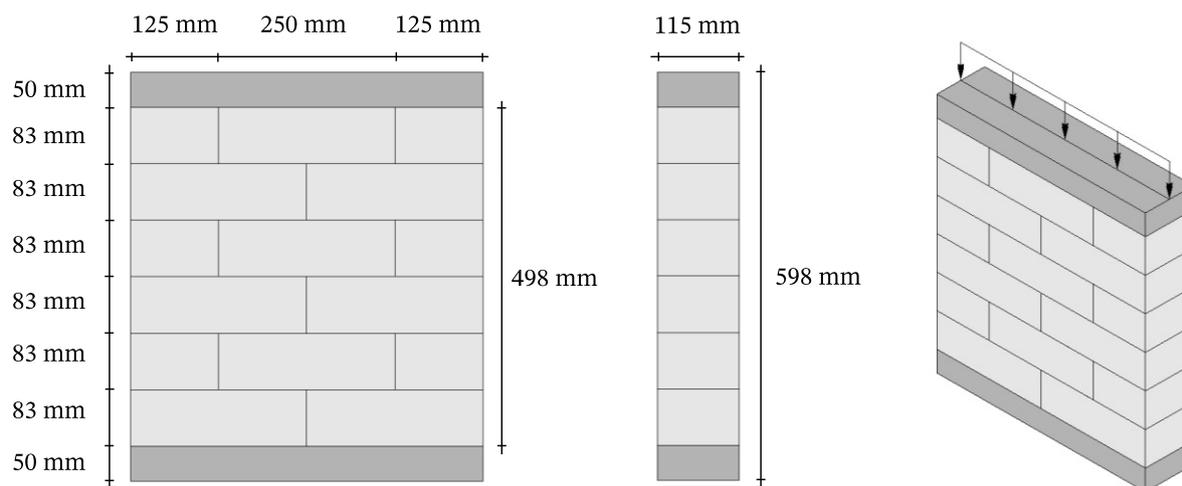


Abbildung 15: Vorder- und Seitenansicht sowie Isometrie des numerischen Modells eines RILEM-Prüfkörpers aus normalformatigen Lehmsteinen

Im Fall einer Druckbeanspruchung werden den einzelnen Volumenelementen die Eigenschaften des Mauerwerkverbunds mit Hilfe des in Kapitel 3.4.2 erläuterten Materialmodells zugewiesen. Der Einfluss der Querdehnungsinteraktion zwischen Stein und Mörtel auf die Gesamttragfähigkeit des Mauerwerks ist innerhalb des verwendeten Materialmodells bereits inkludiert und konnte daher im Rahmen der vereinfachten Mikromodellierung ohne detaillierte Modellierung der Einzelkomponenten erfasst werden. Im Fall eines nicht vollständig überdrückten Wandquerschnitts können zudem Zugspannungen innerhalb der Volumenelemente auftreten. Da die vertikale Biegezugfestigkeit von Mauerwerk jedoch in der Regel durch Verbund- bzw. Spannungsversagen des Mauermörtels innerhalb der Lagerfugen bestimmt wird, wurde den Volumenelementen vereinfachend die approximierte Zugfestigkeit der Mauersteine $f_{b,t}$ zugewiesen. Da diese Festigkeitseigenschaft nicht experimentell ermittelt wurde, wird $f_{b,t}$ unter Ansatz von Gl. (5) näherungsweise nach fib Model Code 2010 [39] aus der mittleren Steindruckfestigkeit f_b ermittelt. Weiterhin wurde die Spannungs-Dehnungs-Beziehung unter Zugbeanspruchung linear-elastisch ohne Entfestigungsbereich angenommen.

$$f_{b,t} = 0,3 \cdot f_b^{2/3} \quad (5)$$

Um das diskrete Aufreißen der Wand bei einem nicht vollständig überdrückten Querschnitt abbilden zu können, wurden innerhalb der Lagerfugen flächige Kontaktelemente ohne nominale Dicke angeordnet. Mit Hilfe der dort definierten Kontaktbedingungen ließ sich der Einfluss der vertikalen Biegezugfestigkeit von Lehmmauerwerk f_t in die numerische Traglastberechnung einbeziehen. Im Rahmen der nachfolgenden Untersuchungen wurde jedoch auf einen Ansatz der vertikalen Biegezugfestigkeit bewusst verzichtet ($f_t = 0$), da bezüglich dieser Festigkeitseigenschaft keine Datengrundlage vorhanden ist. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass die vertikale Biegezugfestigkeit von Lehmmauerwerk analog zu herkömmlichen Mauerwerksbaustoffen einer hohen material- und ausführungsbedingten Streuung unterliegt [40], [41], [42], weshalb deren Ansatz im Rahmen des zu entwickelnden Bemessungsvorschlags nicht empfohlen werden kann. Da Lehmmauerwerkskonstruktionen üblicherweise eine geringe Schlankheit ($h_{ef}/t < 12$) aufweisen und bei deren Planung im Allgemeinen eine möglichst zentrische Lasteinleitung

angestrebt wird, wirkte sich die Vernachlässigung der erhöhten effektiven Wandsteifigkeit infolge der vertikalen Biegezugfestigkeit in baupraktischen Anwendungsfällen nicht maßgeblich auf die Berechnungsergebnisse aus.

Weil im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ausschließlich Lehm-mauerwerkswände unter homogener Vertikalbeanspruchung ohne Querkrafteinwirkung analysiert wurden, ist idealisierend von einer gleichbleibenden Normalspannungsverteilung in Wandlängsrichtung auszugehen. Da die Kontaktbedingungen innerhalb der Stoßfugen in diesem Fall keinen Einfluss auf die Simulationsergebnisse haben, wurden im Zuge der nachfolgenden Modellierung keine Kontaktelemente in den vertikalen Mauerwerksfugen vorgesehen. Da das Verformungsverhalten des Lehm-mauerwerks bereits hinreichend durch das Materialmodell der Volumenelemente definiert ist, wurden elastische Deformationen der Kontaktelemente durch Ansatz hoher Steifigkeitskoeffizienten in vertikaler und horizontaler Richtung unterbunden.

3.4.3.2 Lagerungsbedingungen, Belastung und Diskretisierung

Das Finite-Elemente-Modell wird an der oberen bzw. unteren Seite der Lasteinleitungsplatten durch Linienlager gehalten. Das Auflager an der Unterseite verhindert dabei Translationen in alle drei Raumrichtungen, wohingegen die obere Lagerung ausschließlich Verschiebungen in Querrichtung des numerischen Modells blockiert. Die linienförmigen Lagerungen erlauben darüber hinaus freie Rotationen um die Längsachse der Wand, wodurch sich eine Verformungsfigur entsprechend des Eulerfalls II einstellen kann. Die resultierende Knicklänge h_{ef} ergab sich dabei näherungsweise aus dem vertikalen Auflagerabstand und beinhaltet folglich auch die Abmessungen der Lasteinleitungsplatten. Deren Einfluss konnte auf Grund der vergleichsweise geringen Plattendicke jedoch vernachlässigt werden.

Zur iterativen Ermittlung der Wandtragfähigkeit wurde die linienförmig aufgebrachte Belastung sukzessive gesteigert. Der Ausgangswert der Vertikallast wurde dabei so gewählt, dass bei zentrischer Aufbringung die vollplastische Querschnittstragfähigkeit der modellierten Lehm-mauerwerkswand erreicht wird. Diese Festlegung bietet den Vorteil, dass der im Zuge der Simulation maximal mögliche Laststeigerungsfaktor dem gesuchten Traglastfaktor entspricht und dieser somit direkt und ohne weitere Berechnungen aus den Simulationsergebnissen hervorgeht. Die vertikale Beanspruchung wurde im Rahmen der numerischen Analyse inkrementell mit einem Lastfaktor zwischen 0,0001 und 0,1 bis zum Erreichen der Wandtragfähigkeit gesteigert.

Um eine exzentrische Druckbeanspruchung zu simulieren, wurden sowohl die Linienlager als auch die linienförmige Belastung ausmittig aufgebracht. Hierdurch entstand anfänglich eine über die Höhe des numerischen Modells konstante Biegebeanspruchung in Plattenrichtung. Da die Simulationen ausnahmslos unter Einbezug geometrischer Nichtlinearitäten erfolgten, erhöhte sich die Momentenbeanspruchung im Zuge der Laststeigerung und der damit einhergehenden Querverformungen des Modells nach Theorie II. Ordnung, was schlussendlich zu einem nichtlinearen Momentenverlauf im Versagensfall führte.

Die Diskretisierung der Mauerwerksblöcke sowie der Lasteinleitungsplatten erfolgte mit Hilfe rechteckiger Netzelemente. Für die Generierung eines symmetrischen Netzes wurde

die Anzahl der Elemente pro Mauerwerksblock durch eine gleichmäßige Unterteilung in alle drei Raumrichtungen festgelegt. Um die Elementanzahl hinsichtlich der erforderlichen Simulationsdauer sowie -genauigkeit zu optimieren, erfolgte die Wahl der Netzfeinheit auf Basis von Ergebnissen einer Konvergenzstudie. Hierfür wurde die Traglast einer druckbeanspruchten Lehm-mauerwerkswand mit einer Schlankheit von $h_{ef}/t \sim 15$ und einer Lastausmitte von $e/t = 0,20$ unter Ansatz variierender Netzfeinheiten numerisch berechnet. Die genannten Randbedingungen stellten dabei sicher, dass die Diskretisierung auch unter Berücksichtigung von Effekten nach Theorie II. Ordnung zu einem effizienten Simulationsablauf sowie präzisen Ergebnissen führte. Die Konvergenzstudie ergab für den untersuchten Fall eine optimale Anzahl von 1000 Netzelementen pro Mauerwerksblock.

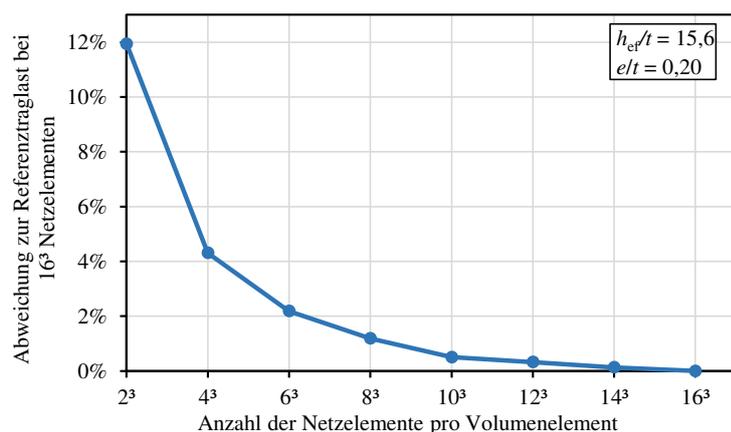


Abbildung 16: Ergebnis der Konvergenzstudie zur optimalen Anzahl der Netzelemente pro Volumenelement

Die Diskretisierung der Lasteinleitungsplatten an der Ober- und Unterseite des numerischen Modells orientierte sich in Längs- und Querrichtung zur Vermeidung von Unstetigkeiten an der Netzfeinheit der Mauerwerksblöcke. Auf Grund der geringen Dicke der Lasteinleitungsplatten erfolgte in vertikaler Richtung eine Unterteilung in vier Elemente. Die Diskretisierung des numerischen Modells ist in Abbildung 17 anhand einer isometrischen Ansicht veranschaulicht.

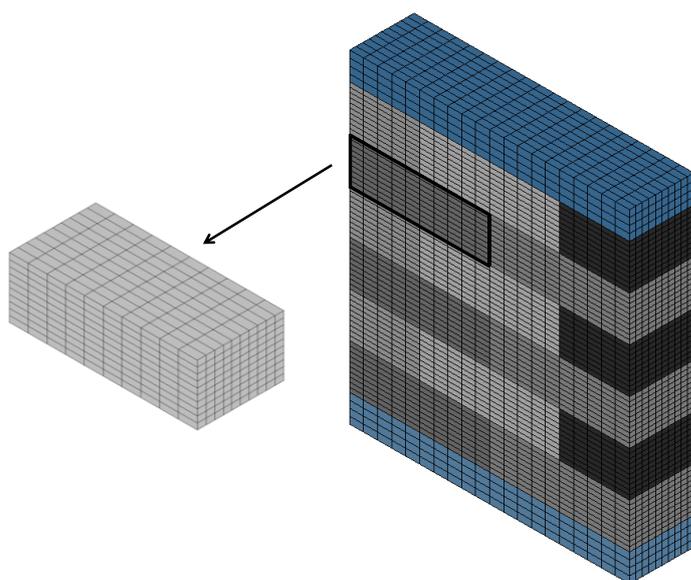


Abbildung 17: Diskretisierung des Finite-Element-Modells

3.4.4 Analytische Berechnung der Traglast

Alternativ zur numerischen Traglastberechnung unbewehrter Mauerwerkswände existieren diverse Traglastmodelle, welche es erlauben, die Systemtragfähigkeit vorwiegend druckbeanspruchter Mauerwerkswände analytisch und ohne iteratives Vorgehen zu ermitteln [36], [43], [44]. Da diese Modelle jedoch für herkömmliche Mauerwerksbaustoffe entwickelt wurden, galt es zu überprüfen, ob eine Übertragbarkeit auf den Lehm-mauerwerksbau gegeben ist. Hierzu musste sichergestellt sein, dass die materialspezifischen Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Lehm-mauerwerk mit Hilfe der bestehenden Berechnungsansätze zutreffend abgebildet werden können.

Da das Traglastmodell von Glock [36] auf demselben Materialmodell wie die bereits beschriebene numerische Modellierung basiert, war davon auszugehen, dass dieser Berechnungsansatz eine geeignete Möglichkeit zur Berücksichtigung der materialspezifischen Besonderheiten von Lehm-mauerwerk bieten könnte und zudem ähnliche Ergebnisse wie die numerische Traglastanalyse liefert. Weiterhin sind in die Entwicklung dieses analytischen Traglastmodells nur wenige Vereinfachungen des wirklichkeitsnahen Materialverhaltens druckbeanspruchten Mauerwerks eingeflossen, was präzise und für wissenschaftliche Zwecke geeignete Berechnungsergebnisse erwarten lässt. Aus den genannten Gründen wurde das analytische Traglastmodell nach Glock [36] in die nachfolgende Validierung der Berechnungsmodelle einbezogen, um dessen Anwendbarkeit zur Ermittlung der Querschnitts- und Systemtragfähigkeit von Lehm-mauerwerk zu überprüfen. Auf eine ausführliche Darlegung des umfangreichen Formelapparats wird an dieser Stelle verzichtet und stattdessen auf die Ursprungsquelle [36] verwiesen.

3.4.5 Validierung der Traglastmodelle

Die Anwendbarkeit der vorgestellten numerischen und analytischen Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Tragfähigkeit druckbeanspruchter Lehm-mauerwerkswände wurde anhand einer Nachrechnung der in Kapitel 3.2.1.3 und 3.2.3 dargestellten experimentellen Untersuchungsergebnisse überprüft. Hierbei wurden die für verschiedene Lastexzentrizitäten sowie variierende Wandschlankheiten experimentell ermittelten Traglasten mit den Ergebnissen der numerischen und analytischen Traglastmodelle gegenübergestellt. Die Traglasten wurden im Rahmen der Validierung gemäß Gl. (6) einheitlich auf die zentrische Querschnittstragfähigkeit des jeweiligen Konditionierungsklimas bezogen.

$$\Phi = \frac{N_R}{l \cdot t \cdot f} \quad (6)$$

Mit:

N_R	Aufnehmbare Normalkraft
l	Wandlänge
t	Wanddicke
f	Mittlere Mauerwerksdruckfestigkeit des jeweiligen Konditionierungsklimas

Zunächst wurden die Traglastversuche an den exzentrisch belasteten RILEM-Prüfkörpern (vgl. Kapitel 3.2.1.3) mit Hilfe der numerischen und analytischen Berechnungsmethoden nachgerechnet. Um ungewollte Ausmitten berücksichtigen zu können, wurden im Rahmen der Versuchsdurchführung aufgetretene Lastexzentrizitäten für jeden Prüfkörper anhand der aufgezeichneten Dehnungen an Vorder- und Rückseite bei einem Lastniveau von einem Drittel der maximal aufnehmbaren Normalkraft angenommen und als Eingangsgröße für die Berechnungsmodelle angesetzt. Hierdurch konnten versuchstechnische Abweichungen zur planmäßigen Lastexzentrizität im Rahmen der Validierung erfasst werden und wirkten sich nicht auf die resultierende Modellunsicherheit aus. Im Zuge der Berechnung der Lastexzentrizitäten wurde das nichtlineare Materialmodell gemäß Gl. (1) zugrunde gelegt. Die ermittelten Lastexzentrizitäten für jeden einzelnen Traglastversuch können Anlage B entnommen werden.

Die experimentell, analytisch und numerisch ermittelten Traglasten sind in Abbildung 18 gegenübergestellt. Die eingezeichneten Fehlerindikatoren kennzeichnen die Standardabweichung der experimentell ermittelten Traglasten. Bei Prüferien ohne ersichtliche Fehlerindikatoren ist die Standardabweichung des Traglastfaktors kleiner als 0,025.

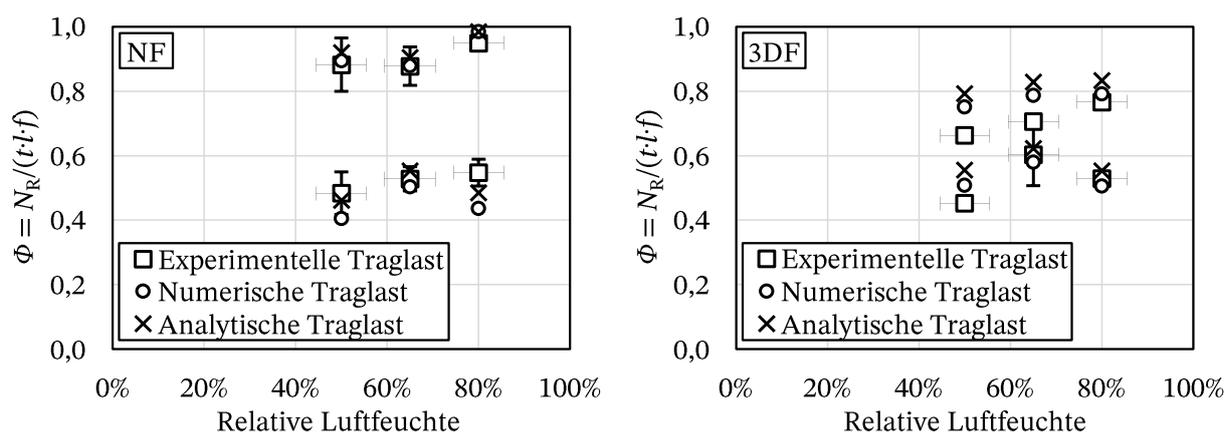


Abbildung 18: Gegenüberstellung der bei verschiedenen Lastexzentrizitäten und Konditionierungsklimata experimentell, numerisch und analytisch ermittelten Traglastfaktoren für die RILEM-Prüfkörper

Die im linken Diagramm gegenübergestellten Traglasten der RILEM-Prüfkörper aus normalformatigen Lehmsteinen zeigen bei jeder der untersuchten Kombinationen aus Konditionierungsklima und Lastexzentrizität eine hohe Übereinstimmung. Hierbei beträgt das mittlere Verhältnis aus numerisch und experimentell ermittelter Traglast $\Phi_{I,num}/\Phi_{I,exp} = 0,94$ und das Verhältnis aus analytisch und experimentell ermittelter Traglast $\Phi_{I,ana}/\Phi_{I,exp} = 1,00$, was auf eine zutreffende Näherung der Querschnittstragfähigkeit von Lehm-mauerwerk durch die vorgestellten Traglastmodelle schließen lässt.

Bei Betrachtung der im rechten Diagramm dargestellten Versuchsergebnisse der RILEM-Prüfkörper aus Lehmsteinen des Formats 3DF weisen die Prüferien bei relativen Luftfeuchten von 65 % sowie 80 % in Kombination mit der größeren Lastexzentrizität ebenfalls eine hinreichende Übereinstimmung mit den analytisch und numerisch ermittelten Traglasten auf. Bei den übrigen Prüferien werden jedoch erhöhte Diskrepanzen zwischen den Versuchsergebnissen und den Rechenmodellen ersichtlich. Die über alle Prüferien der 3DF-Probekörper gemittelten Traglastverhältnisse betragen $\Phi_{I,num}/\Phi_{I,exp} = 1,05$ und

$\Phi_{l,ana}/\Phi_{l,exp} = 1,13$, was eine durchschnittliche Überschätzung der experimentell ermittelten Tragfähigkeiten durch die Approximationsansätze indiziert. Eine mögliche Ursache für die Abweichungen könnte das mittige Griffloch der 3DF-Steine sein, welches eine Unstetigkeit darstellt und durch die gewählten Traglastmodelle nicht explizit berücksichtigt werden kann. Insbesondere bei exzentrischer Lasteinleitung können dadurch Diskrepanzen zwischen rechnerisch und experimentell ermittelter Querschnittstragfähigkeit hervorgerufen werden. Gegebenenfalls lassen sich die Differenzen auch auf Versuchs- bzw. Klimatisierungsstreuungen zurückführen. Der 3DF-Stein weist aufgrund seiner Materialzusammensetzung einen verlangsamten Feuchtetransport auf [31], so dass zum Zeitpunkt der Prüfung unter Umständen keine gleichmäßige Feuchteverteilung über den gesamten Querschnitt vorlag.

Um zu validieren, dass die analytische und numerische Berechnungsmethode neben der Berücksichtigung des Einflusses variierender Lastexzentrizitäten ebenfalls den Schlankheitseinfluss hinreichend erfasst, erfolgte in Abbildung 19 ein weiterer Traglastvergleich auf Basis der Untersuchungsergebnisse an geschosshohen Wänden (vgl. Kapitel 3.2.3). Analog zu den Nachrechnungen der RILEM Prüfkörper wurde hierbei das Materialmodell aus Kapitel 3.4.2 ohne Berücksichtigung der vertikalen Biegezugfestigkeit ($f_t/f = 0$) zugrunde gelegt. Um ungewollte Ausmitten berücksichtigen zu können, wurden die zu Beginn des Belastungsvorgangs aufgetretenen Lastexzentrizitäten anhand der auf Vorder- und Rückseite aufgezeichneten Dehnungen über die Querschnittsdicke abgeschätzt und als Eingangsgröße für die Berechnungsmodelle angesetzt (vgl. Anlage B). Die Darstellung der analytisch ermittelten Tragfähigkeit erfolgte dabei anhand zweier Traglastkurven, welche unter Ansatz einer mittleren bezogenen Lastexzentrizität von $e/t = 0,02$ für die planmäßig zentrisch belasteten und $e/t = 0,23$ für die planmäßig exzentrisch belasteten Lehm-mauerwerkswände berechnet wurden. Diese Werte ergaben sich aus dem Mittelwert der aus den Dehnungsebenen der planmäßig zentrisch bzw. exzentrisch belasteten Prüfkörpern rückgerechneten Lastexzentrizitäten.

Weiterhin wurden die Knicklängen der untersuchten Lehm-mauerwerkswände zur rechnerischen Berücksichtigung der Wandschlankheit gemäß Gl. (7) aus dem Produkt des Knicklängenbeiwerts β und der lichten Wandhöhe h ermittelt.

$$h_{ef} = \beta \cdot h \quad (7)$$

Verformungsmessungen senkrecht zur Wandebene zeigten, dass sich die Verdrehungen am Wandkopf der dickeren Wände ($t = 0,175$ m und $t = 0,24$ m) durch den an dieser Stelle nachgiebigeren Versuchsaufbau freier einstellen konnten als am vollflächig aufgelagerten Wandfuß. Infolgedessen wurde zur Berechnung der effektiven Wandschlankheit h_{ef}/t der zentrisch belasteten Probekörper mit erhöhter Wandstärke idealisierend eine einseitige Einspannung mit einem Knicklängenbeiwert von $\beta = 0,7$ (Eulerfall III) unterstellt. Die dünnere Wand mit einer Dicke von $t = 0,115$ m spannte sich dagegen stärker in den oberen Versuchsaufbau ein, weshalb hier eine beidseitige Einspannung mit einem Knicklängenbeiwert von $\beta = 0,5$ (Eulerfall IV) angesetzt wurde. Um die effektive Wandschlankheit im Rahmen der Versuchsdurchführung zu erhöhen, erfolgte die Lasteinleitung am Wandkopf bei einer der planmäßig zentrischen Druckprüfungen an einer Wand der Dicke von $t = 0,115$ m durch eine stählerne Halbwelle. Hiermit konnte eine

Einspannung des Wandkopfes vermieden werden, was für diesen Probekörper den Ansatz eines erhöhten Knicklängenbeiwerts von $\beta = 0,7$ (Eulerfall III) rechtfertigt. Bei den planmäßig exzentrisch belasteten Lehm-mauerwerkswänden erfolgte die Lasteinleitung sowohl am Wandkopf als auch am Wandfuß stets mittels stählerner Halbwellen, wodurch sich Verdrehungen an beiden Wandenden nahezu ungehindert einstellten. Aus diesem Grund wurde zur Ermittlung der rechnerischen Schlankheit der exzentrisch belasteten Lehm-mauerwerkswände einheitlich eine beidseitig gelenkige Lagerung mit einem Knicklängenbeiwert von $\beta = 1,0$ (Eulerfall II) angenommen. Die ermittelten Traglasten können Anlage B in tabellarischer Form entnommen werden.

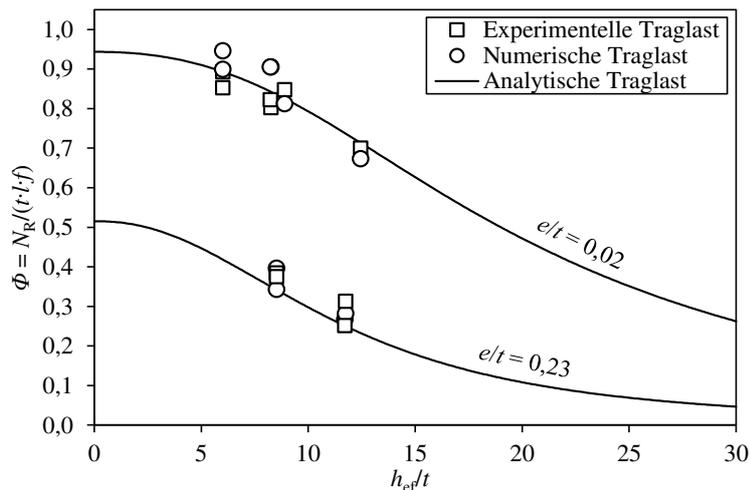


Abbildung 19: Gegenüberstellung der für verschiedene Lastexzentrizitäten experimentell, numerisch und analytisch ermittelten Traglasten geschosshoher Lehm-mauerwerkswände

Der in Abbildung 19 dargestellte Traglastvergleich zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen den experimentellen Traglasten, den numerisch berechneten Einzelwerten sowie den analytisch ermittelten Traglastkurven. Bei planmäßig zentrischer Lasteinleitung beträgt das Verhältnis aus numerischer zu experimentell ermittelter Traglast $\Phi_{II,num}/\Phi_{II,exp} = 1,04$ und das Verhältnis aus analytischer zu experimentell ermittelter Traglast $\Phi_{II,ana}/\Phi_{II,exp} = 1,02$. Bei planmäßig exzentrischer Lasteinleitung betragen die mittleren Verhältniswerte $\Phi_{II,num}/\Phi_{II,exp} = 0,98$ und $\Phi_{II,ana}/\Phi_{II,exp} = 0,90$.

Die durchgeführten Nachrechnungen der Traglastversuche zeigen, dass die Querschnitts- und Systemtragfähigkeit druckbeanspruchter Lehm-mauerwerkswände unter Berücksichtigung verschiedener Lastexzentrizitäten sowie variierender Wandschlankheiten mit Hilfe der erläuterten Finite-Element-Modellierung adäquat berechnet werden kann. Hierbei trat eine Modellabweichung von maximal 6 % auf.

Um die Anwendung eines aufwändigen numerischen Verfahrens zu vermeiden, kann alternativ das analytische Traglastmodell nach Glock [36] zur Traglastermittlung von Lehm-mauerwerkswänden verwendet werden. Im Vergleich zum numerischen Berechnungsverfahren sind jedoch in gewissen Anwendungsfällen erhöhte Modellabweichungen zu erwarten. Diese betrug im Zuge der durchgeführten Traglastvergleiche in Einzelfällen bis zu 13 %. Nichtsdestotrotz liefern sowohl das numerische als auch das analytische Traglastmodell weitgehend vergleichbare Ergebnisse. Beide Berechnungsmethoden eignen sich daher für die Analyse der Tragfähigkeit

druckbeanspruchten Lehm-mauerwerks und können als Grundlage für die Entwicklung eines aktualisierten Bemessungskonzepts herangezogen werden.

3.4.6 Parameterstudien

Um den Einfluss relevanter Eingangsparameter auf die Tragfähigkeit druckbeanspruchter Lehm-mauerwerks-wände zu analysieren, wurde die Wandtragfähigkeit mit Hilfe der erläuterten numerischen und analytischen Methoden für unterschiedliche Parameterkombinationen errechnet und gegenübergestellt. Hierbei wurde bei jedem Traglastvergleich die bezogene Normalkrafttragfähigkeit Φ gemäß Gl. (6) für unterschiedliche Wandschlankheiten h_{ef}/t dargestellt.

In Abbildung 20 sind zunächst die Traglasten für exemplarisch gewählte Verhältnisse aus Lastexzentrizität und Wanddicke e/t dargestellt.

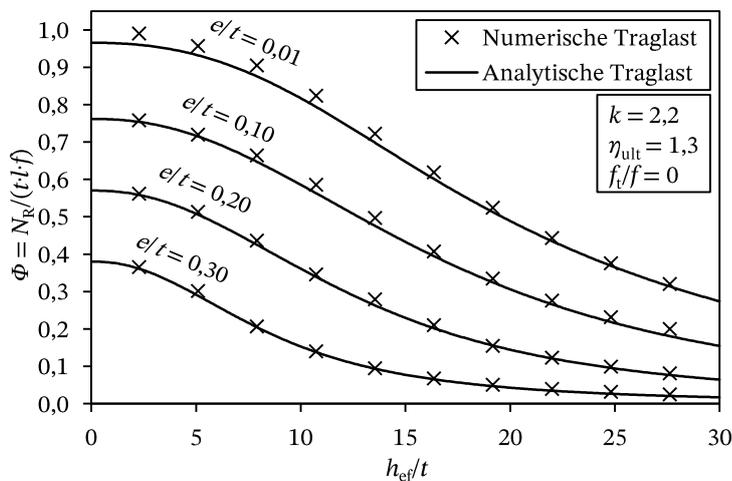


Abbildung 20: Gegenüberstellung der numerisch und analytisch ermittelten Tragfähigkeit druckbeanspruchten Lehm-mauerwerks für verschiedene Lastexzentrizitäten

Es lässt sich erwartungsgemäß ein deutlicher Einfluss der bezogenen Lastexzentrizität auf die Systemtragfähigkeit in allen Schlankheitsbereichen feststellen. Analog zu herkömmlichem Mauerwerk reduziert sich die resultierende Wandtragfähigkeit sowohl mit steigender Lastexzentrizität als auch mit steigender Schlankheit infolge des dadurch hervorgerufenen Momentenzuwachses nach Theorie II. Ordnung. Weiterhin lässt sich erkennen, dass das numerische und das analytische Traglastmodell im Rahmen der untersuchten Parameterkombinationen nahezu deckungsgleiche Ergebnisse liefern. Im Sinne einer guten Übersichtlichkeit werden in den nachfolgenden Traglastvergleichen daher ausschließlich die analytisch ermittelten Traglastkurven dargestellt.

In Abbildung 21 ist die errechnete Wandtragfähigkeit des Lehm-mauerwerks aus normalformatigen Steinen für die verschiedenen Konditionierungsklimate sowie für unterschiedliche bezogene Lastexzentrizitäten gegenübergestellt. Um den Einfluss der relativen Luftfeuchte veranschaulichen zu können, ist die Normalkrafttragfähigkeit N_R hierbei nicht auf die Mauerwerksdruckfestigkeit f des jeweiligen Konditionierungsklimas, sondern einheitlich auf die Mauerwerksdruckfestigkeit $f_{50\%}$ bei einer relativen Luftfeuchte von 50 % bezogen.

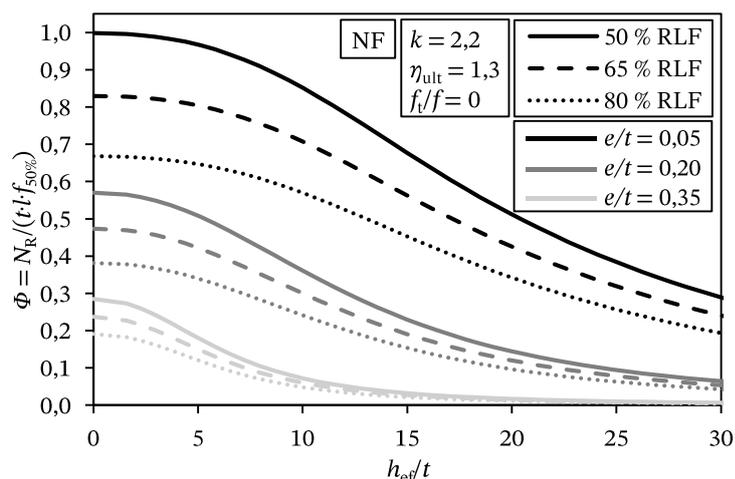


Abbildung 21: Gegenüberstellung der Tragfähigkeit druckbeanspruchten Lehm-mauerwerks für verschiedene Lastexzentrizitäten und unterschiedliche relative Luftfeuchten

Der Traglastvergleich zeigt, dass eine Erhöhung der relativen Luftfeuchte und die damit einhergehende Verringerung der Mauerwerksdruckfestigkeit einen erheblichen Einfluss auf die resultierende Wandtragfähigkeit ausübt. Dabei ist die absolute Reduktion der Tragfähigkeit bei kleinen Lastexzentrizitäten und geringen Wandschlankheiten am ausgeprägtesten. Die relative Traglastabminderung infolge höherer relativer Luftfeuchten ist jedoch für jede Kombination aus Lastexzentrizität und Wandschlankheit konstant und bestimmt sich direkt aus dem Verhältnis der im jeweiligen Konditionierungsklima ermittelten Mauerwerksdruckfestigkeiten. Ausgehend von den normativen Referenzklimabedingungen (50 % RLF) ergibt sich bei einer Erhöhung der relativen Luftfeuchte auf 65 % somit ein Verhältnis der bezogenen Normalkrafttragfähigkeit von $\Phi_{65\%}/\Phi_{50\%} = f_{65\%}/f_{50\%} = 0,83$. Das Traglastverhältnis bei einer Erhöhung von 50 % RLF auf 80 % RLF berechnet sich zu $\Phi_{80\%}/\Phi_{50\%} = f_{80\%}/f_{50\%} = 0,67$.

Es lässt sich festhalten, dass bei druckbeanspruchtem Lehm-mauerwerk analog zu herkömmlichen Mauerwerksbaustoffen eine deutliche Abhängigkeit der Traglast von der vorliegenden Lastexzentrizität sowie der Wandschlankheit vorliegt. Eine zutreffende Berücksichtigung dieser Einflussparameter ist im Rahmen des zu entwickelnden Bemessungsansatzes daher zwingend erforderlich. Zusätzlich wirkt sich auch die vorherrschende Materialfeuchte bzw. das jeweilige Umgebungsklima der nachzuweisenden Lehm-mauerwerkswand maßgeblich auf die Tragfähigkeit aus. Dieser Parameter ist bei der Nachweisführung von Lehm-mauerwerk in geeigneter Weise einzubeziehen.

3.5 Bemessungsvorschlag für druckbeanspruchtes Lehm-mauerwerk

3.5.1 Allgemeines

Im Rahmen der Neuentwicklung eines Bemessungskonzepts für druckbeanspruchtes Lehm-mauerwerk bietet es sich auf Grund des ähnlichen Tragverhaltens an, die etablierten Nachweisverfahren des herkömmlichen Mauerwerksbaus nach DIN EN 1996/NA als Ausgangspunkt heranzuziehen. Diese stellen hierzulande den aktuellen Stand der Technik zur Bemessung von Mauerwerk dar und haben sich darüber hinaus in der Praxisanwendung bewährt. Im Sinne einer gesteigerten Anwendungsfreundlichkeit wird nachfolgend eine

Bemessung von Lehm-mauerwerkswänden auf Grundlage der vereinfachten Berechnungsmethoden nach DIN EN 1996-3/NA [22] angestrebt. Durch den dort definierten Anwendungsbereich ergibt sich zusätzlich eine erhebliche Erweiterung der Verwendungsmöglichkeiten tragenden Lehm-mauerwerks gegenüber den aktuell gültigen Lehm-bau Regeln [11]. Zudem ist der Nachweis der Querkrafttragfähigkeit in Plattenrichtung durch eine Bemessung nach DIN EN 1996-3/NA [22] pauschal abgedeckt und muss nicht gesondert geführt werden. Angesichts der materialspezifischen Besonderheiten von Lehm-mauerwerk, wie z. B. dem vergleichsweise geringen Elastizitätsmodul sowie der Feuchteabhängigkeit der mechanischen Materialeigenschaften, sind die dort verankerten Anwendungsbedingungen und Traglastformeln hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf den Lehm-mauerwerksbau jedoch kritisch zu hinterfragen und gegebenenfalls zu adjustieren. Beispielsweise sollten abweichend zu diesen Regelungen auf Grund des erhöhten Risikos unvorhergesehener Feuchteintritte (z. B. infolge fehlerhafter Abdichtungen) keine erdberührten Wände aus Lehm-mauerwerk errichtet werden.

Eine Bemessung in Anlehnung an DIN EN 1996/NA [22] erfordert zudem eine Umstellung des in den Lehm-bau Regeln [11] enthaltenen globalen Sicherheitskonzepts auf eine semiprobabilistische Nachweisführung. Diese Umstellung wird in Kapitel 3.5.2 detaillierter thematisiert. Daran anknüpfend wird in Kapitel 3.5.3 die Übertragbarkeit der Potenzgleichung gemäß DIN EN 1996-1-1 [45] zur Ermittlung der charakteristischen Mauerwerksdruckfestigkeit evaluiert. Die Berücksichtigung des Feuchteinflusses auf die Festigkeits- und Verformungseigenschaften erfolgt gemäß Kapitel 3.5.4 in Abhängigkeit der im Bemessungsfall zu erwartenden Materialfeuchte mit Hilfe des Umgebungsfeuchtefaktors M . Darauf aufbauend wird in Kapitel 3.5.5 die Übertragbarkeit der vereinfachten Ermittlung der Traglastfaktoren auf Basis von DIN EN 1996-3/NA [22] analysiert und erforderliche Anpassungen erläutert.

Der Bemessungswert des vertikalen Tragwiderstands einer Lehm-mauerwerkswand N_{Rd} wird dementsprechend unter Einbezug des feuchteabhängigen Anpassungsfaktors M gemäß Gl. (8) ermittelt:

$$N_{Rd} = M \cdot \Phi \cdot f_d \cdot A \quad (8)$$

Mit:

N_{Rd} = Bemessungswert des vertikalen Tragwiderstands

M = Umgebungsfeuchtefaktor gemäß Kapitel 3.5.4

Φ = Traglastfaktor für Lehm-mauerwerkswände gemäß Kapitel 3.5.5

f_d = Bemessungswert der Lehm-mauerwerksdruckfestigkeit gemäß Kapitel 3.5.2

A = Belastete Bruttoquerschnittsfläche der Wand

3.5.2 Semiprobabilistisches Sicherheitskonzept

Nach den Lehm-bau Regeln [11] erfolgt die Bemessung von Lehm-mauerwerk auf Basis eines globalen Sicherheitskonzepts, welches vor der Einführung der Eurocodes auch für den Nachweis herkömmlichen Mauerwerks verwendet wurde. Den aktuellen Stand der Technik stellt jedoch eine semiprobabilistische Nachweisführung dar, welche es erlaubt die

Streuungen der auf das Tragwerk einwirkenden Lasten sowie der vorhandenen Bauteilwiderstände durch individuelle Teilsicherheitsbeiwerte zu berücksichtigen, wodurch wiederum eine präzisere Justierung des Zuverlässigkeitsniveaus ermöglicht wird. Die Grundlagen dieses Konzeptes können DIN EN 1990/NA [46] entnommen werden.

Die Gewährleistung des normativ festgelegten Ziel-Zuverlässigkeitsniveaus ist durch eine Zuverlässigkeitsanalyse oder wissenschaftlich fundierte Annahmen sicherzustellen. Die nachfolgend dargelegten Überlegungen hinsichtlich der Zuverlässigkeit druckbeanspruchter Lehm-mauerwerkswände beruhen dabei auf Äquivalenzen zu herkömmlichem Mauerwerk und werden durch konservative Annahmen bezüglich des Feuchteinflusses sowie des Dauerlastverhaltens ergänzt.

Da die Einwirkungen auf ein Mauerwerksgebäude – ausgenommen des Wandeigengewichts – unabhängig vom verwendeten Baustoff sind, können die zugehörigen Teilsicherheitsbeiwerte für ungünstig wirkende ständige Lasten von $\gamma_G = 1,35$ und ungünstig wirkende veränderliche Lasten von $\gamma_Q = 1,50$ für die Bemessung druckbeanspruchten Lehm-mauerwerks unverändert aus DIN EN 1990/NA [46] übernommen werden. Da im Vergleich zu herkömmlichen Mauerwerksbaustoffen keine erhöhte Streuung der Rohdichte von Lehm-mauerwerk zu erwarten ist, kann der normative Teilsicherheitsbeiwert für ständig wirkende Einwirkungen auch auf das Eigengewicht einer Lehm-mauerwerkswand angewendet werden.

Hinsichtlich eines geeigneten materialeitigen Teilsicherheitsbeiwerts γ_M für Lehm-mauerwerk wurden bereits Untersuchungen unter konstanten klimatischen Randbedingungen durchgeführt [20], [47]. Aus den dort dargestellten Versuchen kann keine erhöhte Streuung der bemessungsrelevanten Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Lehm-mauerwerk im Vergleich zu herkömmlichen Mauerwerksbaustoffen abgeleitet werden. Diese Erkenntnis deckt sich mit den experimentellen Untersuchungsergebnissen aus Kapitel 3.1. Basierend auf einer isolierten Betrachtung der Materialstreuungen bei konstanten klimatischen Randbedingungen erscheint somit die Übertragbarkeit des in Deutschland gängigen materialeitigen Teilsicherheitsbeiwerts von $\gamma_M = 1,50$ gemäß DIN EN 1996-1-1/NA [48] gerechtfertigt zu sein. Diese Annahme bestätigt sich zudem durch Berechnung des materialeitigen Teilsicherheitsbeiwerts für die vorliegenden experimentellen Untersuchungsergebnisse mit Hilfe des statistischen Verfahrens gemäß DIN EN 1990 [49]. Unter Ansatz einer Log-Normalverteilung der ermittelten Mauerwerksdruckfestigkeiten lässt sich der materialeitige Teilsicherheitsbeiwert γ_M durch Verwendung von Gl. (9) berechnen:

$$\gamma_M = \gamma_{Rd} \cdot e^{(k_{d,n} - k_n) \cdot s_{f,LN}} \quad (9)$$

Mit:

γ_{Rd} = Faktor zur Berücksichtigung der Modellunsicherheit des Widerstandsmodells

$k_{d,n}$ = Fraktilefaktor für Bemessungswerte

k_n = Fraktilefaktor für charakteristische Werte

$s_{f,LN}$ = Logarithmierte Standardabweichung der Mauerwerksdruckfestigkeit

Unter Ansatz eines für unbewehrte Mauerwerkswände typischen Faktors zur Berücksichtigung der Modellunsicherheit des Widerstandsmodells von $\gamma_{Rd} = 1,2$ [50] ergab sich für die vorliegenden Versuchsergebnisse bei getrennter Betrachtung der Umgebungsklimate sowie der Steinarten ein materialeseitiger Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_M = 1,29 - 1,58$ (vgl. Anlage C).

Basierend auf diesen Erkenntnissen, lässt sich der Bemessungswert der Lehmmauerwerksdruckfestigkeit bei einem Konditionierungsklima von 50 % RLF daher analog zu DIN EN 1996-1-1/NA [48] mit Hilfe von Gl. (10) berechnen. Zur Einhaltung des erforderlichen Zuverlässigkeitsniveaus ist im Rahmen der Bemessung jedoch eine konservative Annahme bezüglich der bemessungsrelevanten Materialfeuchte zu treffen, um die Wahrscheinlichkeit einer Überschreitung der zugrunde liegenden Bemessungsfeuchte zu minimieren (vgl. Kapitel 3.5.4).

Weiterhin gibt es derzeit keine Erkenntnisse zum Dauerstandverhalten von Lehmmauerwerk sowie zum Einfluss zyklischer Feuchtebeanspruchungen auf die Festigkeits- und Verformungseigenschaften. Der in DIN EN 1996-1-1/NA [48] verankerte Dauerstandfaktor ζ sollte daher übernommen werden.

$$f_d = f_k \cdot \frac{\zeta}{\gamma_M} \quad (10)$$

Mit:

f_k = Charakteristischer Wert der Lehmmauerwerksdruckfestigkeit nach Kapitel 3.5.3

ζ = Dauerstandfaktor ($\zeta = 0,85$ für Langzeiteinwirkungen infolge von Eigengewicht, Schnee- und Verkehrslasten, $\zeta = 1,0$ für kurzzeitige Beanspruchungsarten)

γ_M = Materialeitiger Teilsicherheitsbeiwert ($\gamma_M = 1,50$)

3.5.3 Ermittlung der charakteristischen Lehmmauerwerksdruckfestigkeit

Die charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeit ist eine der elementaren Eingangsgrößen für die Bemessung druckbeanspruchten Lehmmauerwerks und kann für unterschiedliche Stein-Mörtel-Kombinationen nach Konditionierung der Probekörper bis zur Massekonstanz bei einer relativen Luftfeuchte von 50 % durch Versuche gemäß DIN EN 1052-1 [30] ermittelt werden. Gemäß DIN EN 1996/NA ist es jedoch zur Reduzierung des Prüfaufwands üblich, die charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeit f_k anhand der mittleren Steindruckfestigkeit f_{st} sowie der Druckfestigkeit des verwendeten Mauermörtels f_m gemäß Gl. (11) zu bestimmen. Die zur Berechnung der charakteristischen Mauerwerksdruckfestigkeit erforderlichen Konstanten K , α und β sind für herkömmliche Mauerwerksarten in DIN EN 1996-1-1/NA [48] tabelliert.

$$f_k = K \cdot f_{st}^\alpha \cdot f_m^\beta \quad (11)$$

Um die Übertragbarkeit der Potenzgleichung auf den Lehm-mauerwerksbau zu überprüfen, wird in Tabelle 10 die charakteristische Lehm-mauerwerksdruckfestigkeit $f_{k,1996-1-1}$ nach Gl. (11) unter Ansatz der normativen Konstanten für Vollziegel bzw. Kalksand-Vollsteine mit der experimentell ermittelten charakteristischen Lehm-mauerwerksdruckfestigkeit $f_{k,exp}$ gegenübergestellt. Diese wurde anhand der Druckfestigkeiten der RILEM-Probekörper mit Hilfe des statistischen Verfahrens nach DIN EN 1990 Anhang D [46] berechnet. Da im Rahmen der Laborversuche nur geringe Materialstreuungen auftraten, welche für baupraktische Anwendungsfälle nicht repräsentativ sein müssen, wurde im Rahmen der statistischen Ermittlung der charakteristischen Lehm-mauerwerksdruckfestigkeit $f_{k,exp}$ der für Ziegel-mauerwerk empfohlene Variationskoeffizient von 17 % [51] zugrunde gelegt. Da beide untersuchten Lehmsteine (NF und 3DF) gemäß der durchgeführten Druckprüfungen der Steindruckfestigkeitsklasse 3 gemäß DIN 18945 [23] zugeordnet werden können (vgl. Kapitel 3.2.1.1), wurde bei Anwendung der Potenzgleichung nach DIN EN 1996-1-1/NA [48] eine mittlere Steindruckfestigkeit von $f_{st} = 3,8 \text{ N/mm}^2$ angesetzt. Weiterhin ergab sich aus den experimentellen Untersuchungen für beide Lehm-mauermörtel die Festigkeitsklasse M4 gemäß DIN 18946 [24], weshalb der Berechnung eine Mörteldruckfestigkeit von $f_m = 4,0 \text{ N/mm}^2$ zugrunde gelegt wurde.

Tabelle 10: Vergleich der nach DIN EN 1996-1-1/NA [45] berechneten und der auf Basis der Versuchsergebnisse statistisch ermittelten charakteristischen Lehm-mauerwerksdruckfestigkeit

Steinart	f_{st} (N/mm ²)	f_m (N/mm ²)	Konstanten für Vollsteine gemäß DIN EN 1996-1-1/NA			$f_{k,1996-1-1}$ (N/mm ²)	$f_{k,exp}$ (N/mm ²)	$f_{k,1996-1-1} /$ $f_{k,exp}$
			K	α	β			
NF	3,8	4,0	0,95	0,585	0,162	2,60	2,58	1,01
3DF							2,49	1,04

Wie die Gegenüberstellung in Tabelle 10 zeigt, lässt sich die charakteristische Lehm-mauerwerksdruckfestigkeit zutreffend mit der Potenzgleichung nach DIN EN 1996-1-1/NA [45] approximieren. Die für die Anwendung von Gl. (11) benötigten Konstanten K , α und β können dabei analog zu Vollziegel bzw. Kalksand-Vollsteinen angenommen werden. Diese Empfehlung deckt sich zudem mit den Untersuchungsergebnissen aus [20].

3.5.4 Berücksichtigung der Materialfeuchte

Da sich die Materialfeuchte von Lehm-mauerwerk signifikant auf dessen Festigkeits- und Verformungseigenschaften auswirkt, muss dieser Einfluss im Zuge der Nachweisführung zwingend berücksichtigt werden. Im Rahmen der in diesem Projekt durchgeführten experimentellen Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass sich die Korrelation zwischen der relativen Luftfeuchte und der Druckfestigkeit bzw. dem Elastizitätsmodul der untersuchten Lehmbaustoffe näherungsweise durch einen linearen Zusammenhang beschreiben lässt. Da Mauerwerksdruckfestigkeit und -elastizitätsmodul ähnlich stark von der Materialfeuchte abhängen, bleibt ihr Verhältnis unabhängig von der Umgebungsfeuchte näherungsweise konstant. Diese Annahme ist insbesondere für die Bemessung schlanker Lehm-mauerwerkswände relevant, da bei der Ermittlung der bezogenen Systemtragfähigkeit stets ein mittleres Verhältnis von $E_{33}/f_k \approx 440$ (vgl. Kapitel 3.4.2) ohne zusätzliche Berücksichtigung der Materialfeuchte zugrunde gelegt werden kann.

Die mechanischen Materialeigenschaften von Lehmbaustoffen werden gemäß DIN 18945 [23] oder DIN 18946 [24] nach einer Konditionierung der Probekörper bis zur Massekonstanz bei 50 % RLF bestimmt. Sollte die Materialfeuchte im Bemessungsfall von der sich im normativen Konditionierungsklima einstellenden Materialfeuchte abweichen, muss die anzusetzende Mauerwerksdruckfestigkeit entsprechend angepasst werden. Dies geschieht bei der Ermittlung der maximal aufnehmbaren Normalkraft gemäß Gl. (8) unter der vereinfachten Annahme einer homogenen Feuchteverteilung innerhalb der Wand mit Hilfe des Anpassungsfaktors M . Die Ermittlung dieses Anpassungsfaktors kann dabei im hygroskopischen Feuchtebereich für unstabilisierte Lehmbaustoffe mit Hilfe des linearen Zusammenhangs aus [52] erfolgen. Angesichts der ähnlichen Feuchteabhängigkeit von Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul kann dieser Zusammenhang dabei auch zur Modifizierung des Elastizitätsmoduls unstabilisierter Lehmbaustoffe herangezogen werden. Für die Ermittlung des feuchteabhängigen Anpassungsfaktors M muss jedoch die Materialfeuchte der betrachteten Lehm-mauerwerkswand im Bemessungsfall bekannt sein. Die Prozesse der Feuchtespeicherung sowie des Feuchtetransports innerhalb von Lehm-mauerwerkswandmaterialien unterliegen dabei vielfältigen Einflussfaktoren und sind derzeit noch nicht ausreichend erforscht. Außerdem hängt die Materialfeuchte von Lehm-mauerwerkswänden entscheidend von den vorherrschenden Umgebungsbedingungen und der individuellen Anwendungssituation ab, weshalb die Bemessungsfeuchte im Rahmen dieses Projekts lediglich abgeschätzt werden kann. Nachfolgend werden erste Orientierungswerte für die zu erwartende Materialfeuchte von Innen- und Außenwänden aus Lehm-mauerwerk im Bemessungsfall gegeben. Hierbei gilt es zu beachten, dass die anzusetzenden Bemessungsfeuchten innerhalb des Nutzungszeitraums des nachzuweisenden Lehmgebäudes nur selten überschritten werden dürfen, um das erforderliche Zuverlässigkeitsniveau zu gewährleisten.

Als Anhaltspunkt für die bemessungsrelevante Materialfeuchte tragender Innenwände aus Lehm-mauerwerk kann in Wohn- und Bürogebäuden näherungsweise der obere Grenzwert der relativen Bemessungsraumluftfeuchte gemäß WTA Merkblatt 6-2 [53] in Höhe von 65 % angenommen werden. Da die Materialfeuchte von Innenwänden vorrangig durch das Innenraumklima determiniert wird, ist bei üblichem Nutzerverhalten davon auszugehen, dass der vorgeschlagene Wert innerhalb der Nutzungsdauer eines Lehmgebäudes in der Regel nicht überschritten wird. Hieraus ergibt sich gemäß [52] eine feuchtebedingte Abminderung der im normativen Referenzklima (50 % RLF) ermittelten Mauerwerksdruckfestigkeit von ungefähr 15 % ($M \approx 0,85$).

Bei Außenwänden stellt die Schlagregenbeanspruchung neben der relativen inneren und äußeren Luftfeuchte eine zusätzlich zu berücksichtigende Einflussgröße auf den Feuchtegehalt des Lehm-mauerwerks dar. Aus diesem Grund sollte im Bemessungsfall eine Materialfeuchte, die einer RLF von 90 – 95 % entspricht, angenommen werden, woraus sich gemäß [52] eine feuchteabhängige Abminderung der bei 50 % RLF ermittelten Mauerwerksdruckfestigkeit von ungefähr 40 – 45 % ($M \approx 0,55 - 0,60$) ergibt. Wird das Durchdringen des Schlagregens zum tragenden Lehm-mauerwerk durch geeignete Maßnahmen, wie beispielsweise der Anordnung einer Vorhangfassade oder einem außenliegenden und wasserundurchlässigen Wärmedämmverbundsystem, effektiv

vermieden, kann der vorgeschlagene Wert nach sorgfältiger Prüfung individuell verringert werden.

3.5.5 Ermittlung der Traglastfaktoren

Die Ermittlung der aufnehmbaren Normalkraft mittels vereinfachter Traglastfaktoren stellt den Kern der Bemessung druckbeanspruchter Mauerwerkswände nach DIN EN 1996-3/NA [22] dar. Nachfolgend wird die Übertragbarkeit der normativen Traglastfaktoren auf die Nachweisführung tragender Lehm-mauerwerkswände evaluiert.

Bei Außenwänden aus Lehm-mauerwerk ist davon auszugehen, dass zur Einhaltung der Vorgaben des aktuell gültigen Gebäudeenergiegesetzes zur Energieeffizienz von Wohngebäuden prinzipiell ein Wärmedämmverbundsystem erforderlich ist. Aus diesem Grund ist die im Rahmen der Bemessung gemäß DIN EN 1996-3/NA [22] zulässige Berücksichtigung von teilaufliegenden Geschossdecken im Fall von Lehm-mauerwerk zum aktuellen Zeitpunkt obsolet. Demzufolge wird zur Anwendung des nachfolgend erläuterten Nachweisverfahrens eine vollflächige Auflagerung der Geschossdecken auf den Lehm-mauerwerkswänden vorausgesetzt. Konsequenterweise beträgt das Verhältnis aus Auflagertiefe und Wanddicke stets $a/t = 1$, weshalb dieses Verhältnis aus den Gleichungen der entsprechenden Traglastfaktoren entfallen kann.

Die Traglastfaktoren an den Wandenden ergeben sich bei Außenwänden in Abhängigkeit der Stützweite der aufliegenden Geschossdecke l_f und berücksichtigen somit vorrangig die Lastausmitte infolge einer Verdrehung des Wand-Decken-Knotens. Wie aus Tabelle 9 ersichtlich wird, weist Lehm-mauerwerk im Vergleich zu herkömmlichen Mauerwerksbaustoffen einen geringeren Elastizitätsmodul auf. Dies hat zur Folge, dass die Steifigkeitsdiskrepanz bei ansonsten identischen Randbedingungen zwischen einer Lehm-mauerwerkswand und der aufliegenden Geschossdecke größer als bei herkömmlichem Mauerwerk ist. Somit erfährt eine Lehm-mauerwerkswand unter der Annahme einer linear-elastischen Momentenverteilung am Wand-Decken-Knoten auf Grund ihrer geringeren Steifigkeit eine kleinere Biegebeanspruchung als eine herkömmliche Mauerwerkswand. Demzufolge ist davon auszugehen, dass die normativen Traglastfaktoren an den Wandenden gemäß DIN EN 1996-3/NA [22] für die Bemessung von Lehm-mauerwerkswänden auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse liefern und somit auf den Lehm-mauerwerksbau übertragen werden können. Abweichend zu herkömmlichem Mauerwerk ist für die im Rahmen der Berechnung des Traglastfaktors erforderliche Fallunterscheidung jedoch der Feuchteinfluss auf die Festigkeit des Lehm-mauerwerks einzubeziehen. Aus diesem Grund muss die bei Standardklimabedingungen von 50 % RLF ermittelte charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeit f_k (vgl. Kapitel 3.5.3) mit dem Faktor zur Berücksichtigung der im Bemessungsfall zu erwartenden Materialfeuchte M (vgl. Kapitel 3.5.4) modifiziert werden.

$$\Phi_1 = \begin{cases} 1,6 - \frac{l_f}{6} \leq 0,9 & \text{für } M \cdot f_k \geq 1,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \\ 1,6 - \frac{l_f}{5} \leq 0,9 & \text{für } M \cdot f_k < 1,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \end{cases} \quad (12)$$

Mit:

l_f = Stützweite der angrenzenden Geschossdecke in m, bei zweiachsig gespannten Decken dürfen 85 % der kürzen Stützweite für l_f eingesetzt werden

Bei geringer Lastexzentrizität infolge Deckenverdrehung z. B. bei Anordnung einer Zentrierleiste oder bei durchlaufender Geschossdecke mit annähernd gleichen Stützweiten auf beiden Seiten der betrachteten Wand darf analog zu den Regelungen nach DIN EN 1996-3/NA [22] der Traglastfaktor an den Wandenden mit $\Phi_1 = 0,9$ angesetzt werden.

Für Decken mit geringer Auflast, z. B. im obersten Geschoss, kann der Traglastfaktor Φ_1 ebenfalls analog zu DIN EN 1996-3/NA [22] angenommen werden:

$$\Phi_1 = \begin{cases} 0,333 & \text{für einachsig gespannte Decken} \\ 0,4 & \text{für zweiachsig gespannte Decken} \end{cases} \quad (13)$$

Im Gegensatz zum Querschnittsnachweis am Wand-Decken-Knoten wirkt sich der geringe Elastizitätsmodul von Lehmmauerwerk auf den Nachweis in Wandhöhenmitte nachteilig aus. Im Vergleich zu Wänden aus herkömmlichen Mauerwerksbaustoffen ist von erhöhten Zusatzmomenten nach Theorie II. Ordnung auszugehen. Da der Elastizitätsmodul innerhalb des Nachweisformats nach DIN EN 1996-3/NA [22] nicht explizit berücksichtigt werden kann, musste die Übertragbarkeit des Traglastfaktors in Wandhöhenmitte überprüft werden. Hierzu wurde die mit Hilfe des analytischen Traglastmodells berechnete Systemtragfähigkeit einer Lehmmauerwerkswand in Abbildung 22 mit der normativen Traglast gegenübergestellt. Im Rahmen der rechnerischen Ermittlung der Systemtragfähigkeit wurde für den Fall des Querschnittsversagens gedrungener Wände die im Zuge der Bemessung von Mauerwerkswänden übliche Annahme starr-plastischen Materialverhaltens getroffen ($\eta_{ult} = \infty$). Weiterhin wurde die anfängliche Exzentrizität nach Theorie I. Ordnung mit $e/t = 0,075$ so gewählt, dass der Ausgangspunkt der rechnerischen und normativen Tragfähigkeit bei einer Wandschlankheit von $h_{ef}/t = 0$ exakt übereinstimmt. Es konnte dabei angenommen werden, dass traglastmindernde Langzeiteinflüsse aus Kriechverformungen durch die anfängliche normative Lastexzentrizität pauschal abgedeckt sind, da die vereinfachten Berechnungsmethoden zur Bemessung herkömmlichen Mauerwerks bis zu einer Endkriechzahl von $\Phi_\infty \leq 2,0$ angewendet werden dürfen. Diese Annahme trifft auch für Lehmmauerwerk zu, da basierend auf dem aktuellen Kenntnisstand hinsichtlich des Dauerlastverhaltens (vgl. Kapitel 3.2.2) nicht davon auszugehen ist, dass Lehmmauerwerk ein ausgeprägteres Kriechverhalten als herkömmliches Mauerwerk aufweist oder dahingehend außerhalb des vorgegebenen Anwendungsbereichs der vereinfachten Berechnungsmethoden liegt. Alle weiteren materialspezifischen Randbedingungen zur analytischen Ermittlung der Wandtragfähigkeit wurden auf Basis der in Kapitel 3.4.2 dargelegten Materialmodellierung gewählt.

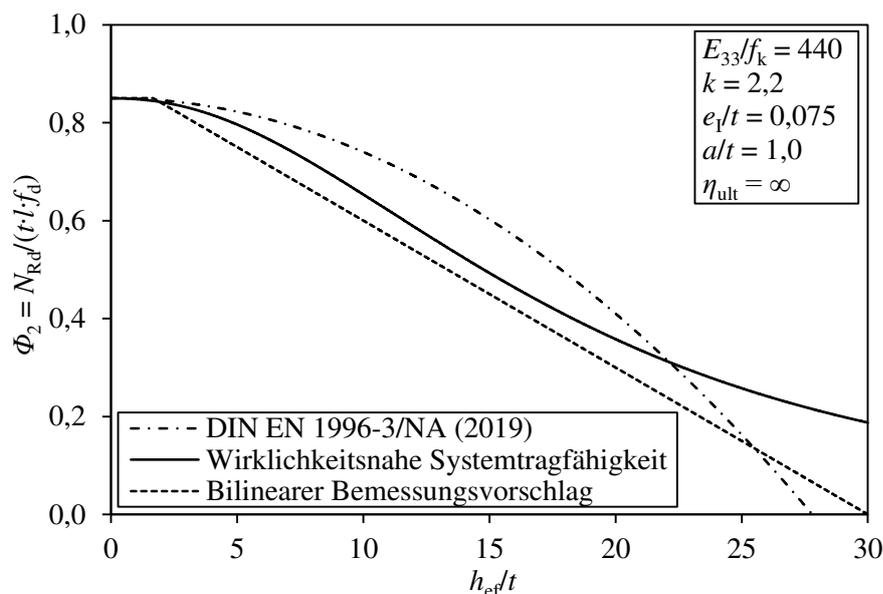


Abbildung 22: Gegenüberstellung des Traglastfaktors in Wandhöhenmitte gemäß DIN EN 1996-3/NA [22] mit der analytisch ermittelten Systemtragfähigkeit von Lehmmauerwerk

Wie bereits in [54] dargelegt, bestätigt der in Abbildung 22 durchgeführte Vergleich, dass die pauschale schlankheitsabhängige Traglastreduktion in Wandhöhenmitte gemäß DIN EN 1996-3/NA [22] nicht ausreicht, um das Tragverhalten von Lehmmauerwerkswänden unter Einbezug der Effekte nach Theorie II. Ordnung in praxisrelevanten Schlankheitsbereichen auf der sicheren Seite liegend abzubilden. Aus diesem Grund wird für Lehmmauerwerkswände eine angepasste Ermittlung des Traglastfaktors in Wandhöhenmitte gemäß Gl. (14) vorgeschlagen. Diese bilineare Formel ist an die wirklichkeitsnahe Systemtragfähigkeit angepasst und berücksichtigt somit die schlankheitsabhängige Traglastreduktion von Lehmmauerwerkswänden mit vollaufliegender Geschossdecke auf adäquate und wirtschaftliche Weise.

$$\Phi_2 = 0,9 - 0,03 \cdot \frac{h_{ef}}{t} \leq 0,85 \quad (14)$$

Weiterhin ist infolge des geringeren Elastizitätsmoduls von Lehmmauerwerk davon auszugehen, dass angrenzende Geschossdecken eine stärkere Einspannwirkung erzielen als dies bei herkömmlichen Mauerwerkswänden der Fall ist. Aus diesem Grund kann die Knicklänge h_{ef} einer Lehmmauerwerkswand auf der sicheren Seite liegend gemäß DIN EN 1996-3/NA [22] in Abhängigkeit der Wanddicke ermittelt werden. Auf Grund der Forderung nach vollaufliegenden Geschossdecken [11], [33] vereinfacht sich die Ermittlung des Knicklängenbeiwerts ρ_2 für zweiseitig gehaltene Wände gemäß Tabelle 11. Die Berechnung des Knicklängenbeiwerts von mehrseitig gehaltenen Lehmmauerwerkswänden kann ebenfalls analog zu DIN EN 1996-3/NA [22] erfolgen.

Tabelle 11: Knicklängenbeiwert für zweiseitig gehaltene Lehmmauerwerkswände

Wanddicke t	Knicklängenbeiwert ρ_2
$t \leq 175 \text{ mm}$	0,75
$175 \text{ mm} < t \leq 250 \text{ mm}$	0,90
$t > 250 \text{ mm}$	1,00

Der vereinfachte Traglastfaktor Φ für eine Lehm-mauerwerkswand ergibt sich abschließend aus dem Minimalwert des Traglastfaktors am Wandfuß bzw. Wandkopf Φ_1 und dem Traglastfaktor in Wandhöhenmitte Φ_2 .

Zudem sollte bei Lehm-mauerwerkswänden mit linienförmig aufgelagerten Massivdecken und horizontaler Beanspruchung (z. B. durch Wind) sowie geringer Auflast ein Nachweis der erforderlichen Mindestauflast geführt werden. Die erforderliche Mindestauflast kann dabei analog zu DIN EN 1996-3/NA [22] gemäß Gl. (15) ermittelt werden. Alternativ bietet sich die Berechnung der Mindestauflast nach prEN 1996-3:2022 [55] an. Beide Methoden basieren auf einem Bogenmodell und können daher unverändert auf den Lehm-mauerwerksbau übertragen werden.

$$N_{\text{Ed,min}} \geq \frac{3 \cdot q_{\text{Ewd}} \cdot h^2 \cdot b}{16 \cdot \left(t - \frac{h}{300} \right)} \quad (15)$$

Mit:

$N_{\text{Ed,min}}$ = Bemessungswert der kleinsten Normalkraft in Wandhöhenmitte in kN

q_{Ewd} = Bemessungswert der einwirkenden Windlast in kN/m²

h = Lichte Wandhöhe

b = Einwirkungsbreite der Windlast

t = Wanddicke

3.6 Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung

Die im Rahmen des Vorhabens erzielten Ergebnisse sowie die daraus abgeleiteten Erkenntnisse können in erheblichem Maße zu einer Entlastung der Umwelt im Bereich des Wohnungsbaus beitragen. Es konnte gezeigt werden, dass die Anwendung bzw. die Übertragung bewährter Bemessungsvorschriften aus dem konventionellen Mauerwerksbau auf das Lehm-mauerwerk prinzipiell möglich ist. Lehm-mauerwerk und seine Komponenten weisen ein vergleichbares Tragverhalten und die gleichen Versagensmechanismen auf. Ein wesentlicher Unterschied ist die Abhängigkeit der Druckfestigkeit und des Elastizitätsmoduls von der Materialfeuchte und somit von der relativen Feuchte der Umgebungsluft. Weiterhin ist der vergleichsweise geringe Elastizitätsmodul zu nennen. Da jedoch das Verhältnis von Elastizitätsmodul zu Druckfestigkeit unabhängig von der Materialfeuchte ist, kann die Feuchteabhängigkeit bei der Bemessung mittels einer Reduktion der Mauerwerksdruckfestigkeit in Abhängigkeit der zu erwartenden Feuchte berücksichtigt werden. Weiterhin erfolgt aufgrund des vergleichsweise geringen Elastizitätsmoduls eine Anpassung des Traglastfaktors in Wandhöhenmitte, der die schlankheitsabhängige Reduktion der Traglast von Lehm-mauerwerkswänden zutreffend berücksichtigt.

Generell kann festgestellt werden, dass eine Bemessung in Anlehnung an die Regelungen von konventionellem Mauerwerk gemäß DIN EN 1996-3/NA [21] und [22] sinnvoll erscheint und lediglich punktuelle Anpassungen zur Berücksichtigung der materialspezifischen Besonderheiten vorzunehmen sind. Der Anwendungsbereich von tragendem

Lehmmauerwerk erweitert sich damit deutlich gegenüber den derzeit gültigen Lehm-Bau-Regeln [11]. Die Mindestwanddicke halbiert sich, der Mindestwandquerschnitt verringert sich deutlich und es werden größere Geschoss- und Gebäudehöhen möglich, weil die pauschale Begrenzung auf zwei Vollgeschosse entfällt. Die Materialausnutzungen und somit die Wirtschaftlichkeit erhöhen sich ebenfalls deutlich aufgrund der Umstellung auf das zeitgemäße semiprobabilistische Sicherheitskonzept in Verbindung mit der mauerwerkstypischen starr-plastischen Ermittlung der Wandtragfähigkeit.

Aus ökologischer Sicht kann es somit gelingen, den hohen Bedarf an Wohnraum klimaneutraler und ressourcenschonender zu decken als dies bisher der Fall ist, da Lehm-Baustoffe wie in Kapitel 2 beschrieben vollständig und sortenrein wiederverwertet werden können und einen geringeren Energiebedarf bei der Herstellung als andere Baustoffe aufweisen. Im Hinblick auf technologische Aspekte zeigen die erstmalig in diesem Umfang durchgeführten seriellen Untersuchungen an Lehmmauerwerk, dass die Materialeigenschaften von industriell hergestellten Lehm-Baustoffen und somit des daraus hergestellten Lehmmauerwerks mit denen anderer, konventioneller Mauerwerksbaustoffe qualitativ vergleichbar sind. Unter Berücksichtigung der materialspezifischen Besonderheiten kann eine bauordnungsrechtliche Grundlage in Form einer DIN Norm für die Bemessung von Lehmmauerwerk erstellt werden, die auf einem zeitgemäßen Sicherheitskonzept basiert. Die Anwendung wird damit aus technischer Sicht deutlich erweitert und aus baurechtlicher Sicht der Anwendung anderer Mauerwerksarten quasi gleichgestellt. Umständliche Genehmigungsverfahren unter Einholung einer Zustimmung im Einzelfall oder einer allgemeinen Bauartgenehmigung entfallen. Das Genehmigungsverfahren von Lehmmauerwerksbauten ist dadurch nicht mehr wie bisher mit erheblichem Mehraufwand und Mehrkosten verbunden, so dass einer breiten Anwendung zumindest aus planerischer Sicht nichts mehr entgegensteht.

Gelingt es einen relevanten Anteil an Wohnungsneubauten in Lehmmauerwerksbauweise zu realisieren, reduziert sich einerseits der Anteil an Bauschutt bzw. Abfall, da Lehm-Baustoffe am Ende ihrer Nutzungsdauer wieder nahezu vollständig in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden können und andererseits wird der Energiebedarf zur Herstellung der Gebäude reduziert, da Lehm-Baustoffe nicht gebrannt werden müssen oder hydraulische Bindemittel wie etwa Zement enthalten.

3.7 Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Die im Rahmen des Vorhabens gewonnenen Erkenntnisse werden bzw. wurden mittels Konferenzbeiträgen, Artikeln in internationalen Fachzeitschriften sowie Buchkapiteln verbreitet. Weiterhin bilden die erzielten Ergebnisse die wesentliche Grundlage der im Normungsausschuss Lehm-Bau (NA 005-06-08 AA) erarbeiteten und als Entwurf veröffentlichten E DIN 18940: Tragendes Lehmsteinmauerwerk – Konstruktion, Bemessung und Ausführung. Neben der genannten DIN -Norm handelt es sich im Einzelnen um folgende Veröffentlichungen:

- Wiehle, P., Brinkmann, M.: *Tragfähigkeit von Lehmmauerwerk – experimentelle und numerische Analyse*, LEHM 2020 – 8. Internationale Fachtagung für Lehm-Bau in Weimar, Deutschland, 2020

Englische Version: *Load-bearing capacity of earth masonry – an experimental and numerical analysis*

- Brinkmann, M.; Graubner, C.-A.: Load-bearing capacity of slender earth masonry walls under compression. In: Proceedings of the 17th International Brick and Block Masonry Conference, S. 404-411. Krakow (Poland), 5. - 8. Juli 2020.
- Wiehle, P., Simon, S., Baier, J., Dennin, L.: *Influence of relative humidity on the strength and stiffness of unstabilised earth blocks and earth masonry mortar*, Construction and Building Materials 342, S. 1 – 15, 2022
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128026>
- Wiehle, P., Brinkmann, M.: *Material behaviour of unstabilised earth block masonry and its components under compression at varying relative humidity*, Case Studies in Construction Materials 17, e01663, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01663>
- Brinkmann, M., Wiehle, P., Thiele M., Graubner C.-A.: *Grundlagen zur Bemessung druckbeanspruchten Lehm-mauerwerks*, Mauerwerk Kalender 2023, E. Brehm und D. Schermer [Hrsg.], Ernst & Sohn, 2023. <https://doi.org/10.1002/9783433611142.ch4>

Darüber hinaus werden auf Grundlage des Forschungsvorhabens zwei Dissertationen erarbeitet, von denen eine bereits abgeschlossen wurde:

- Brinkmann, M.: *Tragfähigkeit druckbeanspruchten Lehm-mauerwerks unter Berücksichtigung nichtlinearer Feuchteprofile* [Dissertation], Technische Universität Darmstadt, 2023
- Wiehle, P.: *Einfluss der Feuchte auf das Tragverhalten von Lehm-mauerwerk* [Dissertation in Arbeit], Technische Universität Berlin, 2023

4 Fazit

Im Zuge des Projekts wurde ein umfangreiches Versuchsprogramm durchgeführt, in dem die bemessungsrelevanten Festigkeits- und Verformungseigenschaften von unstabilisiertem Lehmmauerwerk sowie dessen Komponenten analysiert wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Druckfestigkeit von Lehmmauerwerk vergleichbar mit anderem niederfesten Mauerwerk ist. Insbesondere für die Verwendung bei der Errichtung geringgeschossiger Wohnungsneubauten bietet sich Lehmmauerwerk somit an, wodurch ein wesentlicher Beitrag zur Senkung des Treibhausgasausstoßes und zur Schonung vorhandener Ressourcen geleistet werden kann.

Es konnte festgestellt werden, dass der Elastizitätsmodul von Lehmmauerwerk mit $E \approx 440 \cdot f_k$ vergleichsweise gering ausfällt, was insbesondere im Rahmen der Bemessung schlanker Wände zu berücksichtigen ist. Weiterhin ist der ausgeprägten Feuchteabhängigkeit der Festigkeits- und Verformungseigenschaften in geeigneter Weise Rechnung zu tragen. Die experimentellen Untersuchungen bei unterschiedlichen Umgebungsklimata zeigen einen nahezu linearen Zusammenhang zwischen der relativen Luftfeuchte und der Druckfestigkeit bzw. dem Elastizitätsmodul. Anhand von Traglastversuchen unter Ansatz verschiedener Lastexzentrizitäten sowie variierender Wandschlankheiten wurde festgestellt, dass das allgemeine Tragverhalten sowie die Versagensmechanismen druckbeanspruchten Lehmmauerwerks mit herkömmlichem Mauerwerk vergleichbar sind und somit eine Bemessung in Anlehnung an DIN EN 1996/NA möglich und sinnvoll ist.

Eine detaillierte Analyse der Tragfähigkeit von Lehmmauerwerk mittels eines anhand der Versuchsergebnisse kalibrierten Finite-Elemente-Modells konnte belegen, dass mauerwerkstypische Modellierungsansätze sowie gängige Materialmodelle auf Lehmmauerwerk übertragen werden können. Zudem lässt sich die Traglast mit Hilfe mauerwerkstypischer analytischer Berechnungsmethoden ermitteln, sofern das gewählte Modell die Materialeigenschaften von Lehmmauerwerk mit hinreichender Genauigkeit berücksichtigen kann.

Auf Basis der validierten Traglastmodelle und unter Einbezug der materialspezifischen Besonderheiten von Lehmmauerwerk wurde schließlich eine Bemessungsgrundlage in Anlehnung an die vereinfachten Berechnungsmethoden nach DIN EN 1996-3/NA [22] erarbeitet. Die bestehenden Regelungen des Eurocodes konnten dabei in vielen Bereichen unverändert übernommen werden, allerdings erforderten die Feuchteabhängigkeit der Festigkeits- und Verformungseigenschaften sowie der geringere Elastizitätsmodul punktuelle Anpassungen bzw. zusätzliche Einschränkungen des Nachweisverfahrens. Die Änderungen beschränken sich dabei jedoch im Wesentlichen auf die Einführung eines zusätzlichen Anpassungsfaktors M , welcher den Einfluss der Materialfeuchte im Bemessungsfall abdeckt, sowie auf eine modifizierte Gleichung zur Berechnung des Traglastfaktors in Wandhöhenmitte, welche den Einfluss des geringen Elastizitätsmoduls von Lehmmauerwerk berücksichtigt.

Der vorgestellte Bemessungsansatz stellt eine erhebliche Erweiterung des Anwendungsbereichs tragenden Lehmmauerwerks dar und wurde bereits in den neuesten Entwurf der DIN 18940 [33] übernommen. Dementsprechend kann die Bemessung von

tragendem Lehmmauerwerk gemäß einem Sicherheitskonzept auf aktuellem Stand der Technik erfolgen und das Leistungsvermögen industrieller Lehmmauerwerksbaustoffe wird adäquat abgebildet.

Im Zuge weiterer Forschung sind die im Bemessungsfall tatsächlich auftretenden Materialfeuchten tiefergehend zu untersuchen. Unter instationären Klimabedingungen im Anwendungsfall ergeben sich ungleichmäßig verteilte und zeitlich wie räumlich veränderliche Feuchtegehalte im Wandquerschnitt. Ein besonderer Aspekt ist dabei das Langzeittragverhalten -Dauerstandfestigkeit und Kriechverhalten - von Lehmmauerwerk unter dem Einfluss wechselnder Feuchtegehalte, wozu derzeit keine Erkenntnisse vorliegen. Eine exakte Berücksichtigung dieser tatsächlich auftretenden Feuchtegehalte führt gegebenenfalls zu geringeren Bemessungsfeuchten, wodurch sich der Ausnutzungsgrad und somit die Wirtschaftlichkeit des Nachweisverfahrens weiter steigern ließe. Hierzu müssen zunächst grundlegende Erkenntnisse zum Feuchtetransport in Lehmstoffen gewonnen werden.

Um einen genauen Nachweis der Gebäudeaussteifung führen zu können, gilt es außerdem die Querkrafttragfähigkeit von Lehmmauerwerk unter dem Einfluss der Feuchte zu untersuchen. Die fehlenden Grundlagen für diesen Nachweis wurden im Normungsausschuss von Seiten des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) ausdrücklich bemängelt.

Schließlich ist für die Bemessung im Brandfall die erforderliche Feuerwiderstandsdauer von Lehmmauerwerkswänden zu bestimmen. Bei der Betrachtung des Brandfalls ist im Vergleich zu herkömmlichen Mauerwerkswänden nicht nur die Hitzeeinwirkung, sondern auch die Folge des Löschwassereinsatzes zu bedenken. In Ermangelung von Versuchsergebnissen konnten in den Normenentwurf der DIN 18940 [33] nur deutlich auf der sicheren Seite liegende Feuerwiderstandswerte aufgenommen werden, die einen wirtschaftlichen Einsatz von Lehmmauerwerk für Gebäude mit erhöhten Brandschutzanforderungen erschweren.

5 Literaturverzeichnis

- [1] United Nations Environment Programme: *2021 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*. Nairobi, 2021
- [2] Purchase, C.K., Al Zulayq, D.M., O'Brien B.T., Kowalewski, M.J., Berenjian, A., Tarighaleslami, A.H., Seifan, M.: *Circular Economy of Construction and Demolition Waste: A Literature Review on Lessons, Challenges, and Benefits*. in: *Materials* 2022 15(1). <https://doi.org/10.3390/ma15010076>.
- [3] <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/abfallaufkommen#deutschlands-abfall>, Zugriff am: 01.11.2022
- [4] <https://oec.world/en/profile/hs/sand?latestTrendsFlowSelector=flow1&latestTrendsViewSelector=latestTrendsViewOption1>, Zugriff am: 01.11.2022
- [5] Held, T., Waltersbacher, M.: *Wohnungsmarktprognose 2030*, BBSR-Analysen KOMPAKT 07/2015, 2015
- [6] Braun, R.: *Wohnungsmarktprognose 2019-22: Regionalisierte Prognose in drei Varianten mit Ausblick bis 2030*, Empirica-Paper 244, 2019
- [7] Deschermeier, P., Henger, R. Seipelt, B., Voigtländer, M.: *Wohnungsmarkt: politische Implikationen des zukünftigen Baubedarfs*, IWPerspektive 2035, S. 197-206, 2017
- [8] Baldenius, T., Kohl S., Schularick, M.: *Die Neue Wohnungsfrage: Gewinner und Verlierer des Deutschen Immobilienbooms*, Macrofinance Lab, Bonn, 2019
- [9] Sozialdemokratische Partei Deutschlands; Bündnis 90/Die Grünen; Freie Demokratische Partei [Hrsg.]: *Mehr Fortschritt wagen – Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit*. Koalitionsvertrag 2021 – 2025, 2021
- [10] Statistisches Bundesamt: *Bautätigkeit und Wohnungen 2020* – Fachserie 5 Reihe 1, 2021
- [11] Volhard, F.; Röhlen, U.: *Lehmbau Regeln – Begriffe - Baustoffe - Bauteile*. 3. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009
- [12] Heath A., Walker P., Fourie C., Lawrence M.: *Compressive Strength of Extruded Unfired Clay Masonry Units*, in: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, Volume 162, Issue 3, S. 105-112., 2009
<http://dx.doi.org/10.1680/coma.2009.162.3.105>
- [13] Miccoli, L., Müller, U., Fontana, P.: *Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob*, *Construction and Building Materials* 61, S 327 – 339, 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.009>
- [14] Champiré, F., Fabbri, A., Morel, J.-C., Wong, H., McGregor, F.: *Impact of relative humidity on the mechanical behavior of compacted earth as a building material*,

- Construction and Building Material 110, 70–78, 2016,
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.027>
- [15] Bui, Q.-B., Morel, J.-C., Hans, S., Walker, P.: *Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth*, Construction and Building Material 54, S. 163–169, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.067>
- [16] Maskell, D., Heath, A., Walker, P.: *Laboratory scale testing of extruded earth masonry units*, Materials & Design 45, S.359–364, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.09.008>.
- [17] Müller, U., Ziegert, C., Kaiser, C., Röhlen, U.: *Eigenschaften industrieller Lehmbauprodukte für den Mauerwerksbau und Verhalten von Lehmsteinmauerwerk*, Mauerwerk 16, S 17–28, 2012. <https://doi.org/10.1002/dama.201200527>
- [18] Hansen, E. J. de Place, Hansen, K. K.: *Unfired clay bricks – moisture properties and compressive strength*, in: Proceedings of the 6th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Trondheim, 2002
- [19] Müller, P., Fontana, P., Miccoli, L., Ziegert, C.: *Versuchsgestützte Kalibrierung von Teilsicherheitsbeiwerten im Lehm-mauerwerksbau - Empfehlungen für die Erarbeitung eines Bemessungskonzepts*, in: Jäger, W. (Hg.): Mauerwerk Kalender 2017. Befestigung, Lehm-mauerwerk. Berlin: Ernst & Sohn, S. 181–194, 2017. <https://doi.org/10.1002/9783433607565.ch5>
- [20] Müller, P., Miccoli, L., Fontana, P., Ziegert, C.: *Development of partial safety factors for earth block masonry*. Materials and Structures 50, S. 1–14, 2017. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0902-9>
- [21] DIN EN 1996-3: 2010-12. *Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten - Teil 3: Vereinfachte Berechnungsmethoden für unbewehrte Mauerwerksbauten*.
- [22] DIN EN 1996-3/NA: 2015-01. *Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten - Teil 3: Vereinfachte Berechnungsmethoden für unbewehrte Mauerwerksbauten (2012-01) inklusive Änderung A1 (2014-03) und Änderung A2 (2015-01)*.
- [23] DIN 18945: 2018-12. *Lehmsteine – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung*.
- [24] DIN 18946: 2018-12. *Lehmmauermörtel – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung*.
- [25] Künzel, H.M.: *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten*. Dissertation, Universität Stuttgart, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen, 1994
- [26] DIN EN 772-1: 2011-07. *Prüfverfahren für Mauersteine - Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit*
- [27] DIN V 105-1: 2002-06. *Mauerziegel – Teil 1: Vollziegel und Hochlochziegel der Rohdichteklassen $\geq 1,2$* .
- [28] Schubert, P.: Prüfverfahren für Mauerwerk, Mauersteine und Mauermörtel in: Funk, P. [Hrsg.] Mauerwerk-Kalender 1991, S. 685–698, 1991

- [29] DIN 18555-4: 2019-04. *Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln - Teil 4: Bestimmung der Längs- und Querdehnung sowie Verformungskenngrößen von Mauermörteln (Festmörtel) im statischen Druckversuch.*
- [30] DIN EN 1052-1: 1998-12. *Prüfverfahren für Mauerwerk - Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit.*
- [31] Wiehle, P., Simon, S., Baier, J., Dennin, L.: *Influence of relative humidity on the strength and stiffness of unstabilised earth blocks and earth masonry mortar*, Construction and Building Materials 342, S. 1 – 15, 2022
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128026>
- [32] Brameshuber, W.: *Eigenschaften von Mauersteinen, Mauermörtel, Mauerwerk und Putzen* in: Jäger, W. [Hrsg.] *Mauerwerk-Kalender 2017: Befestigungen, Lehmmauerwerk.* Ernst & Sohn; Berlin; 2017.
<https://doi.org/10.1002/9783433608050.ch1>
- [33] E DIN 18940: 2022-10. *Tragendes Lehmsteinmauerwerk – Konstruktion, Bemessung und Ausführung*
- [34] Meyer, U.; Schubert, P.: *Spannungs-Dehnungs-Linien von Mauerwerk* in: Funk, P. [Hrsg.] *Mauerwerk Kalender 1992.* Berlin: Ernst & Sohn, S. 615–622, 1992
- [35] DIN EN 1992-1-1: 2011-01. *Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.*
- [36] Glock, C.: *Traglast unbewehrter Beton- und Mauerwerkswände: nichtlineares Berechnungsmodell und konsistentes Bemessungskonzept für schlanke Wände unter Druckbeanspruchung*, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2004
- [37] Brinkmann, M.: *Tragfähigkeit druckbeanspruchten Lehmmauerwerks unter Berücksichtigung nichtlinearer Feuchteprofile*, Eingereichte Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2023
- [38] Lourenço, P. J. B. B.: *Computational strategies for masonry structures*, Dissertation, Universidade do Porto, 1996
- [39] Beverly, P.: *fib model code for concrete structures 2010*, Ernst & Sohn, 2010
- [40] Mann, W.: *Zug- und Biegezugfestigkeit von Mauerwerk – Theoretische Grundlagen und Vergleich mit Versuchsergebnissen* in: Funk, P. [Hrsg.] *Mauerwerk Kalender 1992.* Berlin: Ernst & Sohn, S. 601–607, 1992
- [41] Schmidt, U.: *Bruchmechanischer Beitrag zur Biegezugfestigkeit von Mauerwerk*, Dissertation, Technische Hochschule Aachen, 2014
- [42] Schmidt, U.; Brameshuber, W.: *Biegezugfestigkeit von Mauerwerk* in: *Mauerwerk 17*, H. 1, S. 38–43, 2013. <https://doi.org/10.1002/dama.201300560>
- [43] Pflücke, T.: *Traglastbestimmung druckbeanspruchter Mauerwerkswände am Ersatzstabmodell unter wirklichkeitsnaher Berücksichtigung des Materialverhaltens*, Dissertation, Technische Universität Dresden, 2005

- [44] Bakeer, T.: *Stability of Masonry Walls*, Habilitation, Technische Universität Dresden, 2015
- [45] DIN EN 1996-1-1: 2013-02. *Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten - Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk; Deutsche Fassung EN 1996-1-1:2005+A1:2012*
- [46] DIN EN 1990/NA: 2010-12: *Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung*
- [47] Rischaneck, A.: *Sicherheitskonzept für den Lehmsteinbau*, Dissertation, Technische Universität Wien, 2009
- [48] DIN EN 1996-1-1/NA: 2019-12. *Nationaler Anhang – Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk.*
- [49] DIN EN 1990: 2021-10. *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010*
- [50] Bakeer, T.; Salehi, H.: *Bestimmung eines Modellsicherheitsbeiwertes für unbewehrte Mauerwerkswände unter Knickbeanspruchung*. In: *Mauerwerk* 23 (1), S. 32-39, 2019. <https://doi.org/10.1002/dama.201800029>
- [51] JCSS Probabilistic Model Code Part 3: *Material properties*, Joint Committee on Structural Safety, 2001
- [52] Brinkmann, M., Wiehle, P.: *Correlation between relative humidity and the strength and deformation characteristics of unstabilised earth masonry*, *Construction and Building Materials* 366, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130048>
- [53] WTA-Merkblatt 6-2: *Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse*. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege (WTA) e.V., 2014
- [54] Brinkmann, M.; Graubner, C.-A.: *Load-bearing capacity of slender earth masonry walls under compression* in: Kubica, J.; Kwiecień, A.; Bednarz, Ł. [Hrsg.] 17th International Brick and Block Masonry Conference. Krakow (Poland), 5.–8. Juli 2020. CRC Press, pp. 404–411, 2020
- [55] prEN 1996-3: 2021-10. - Entwurf *Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 3: Vereinfachte Berechnungsmethoden für unbewehrte Mauerwerksbauten*
- [56] Beverly, P.: *fib model code for concrete structures 2010*, Ernst & Sohn, Darmstadt.

Anlage A

Anlage A. Experimentelle Untersuchungen

Tabelle A- 1: Ergebnisse der Druckversuche an RILEM_Mauerwerksprobekörpern aus NF-Steinen in Kombination mit Mörtel M2 nach Konditionierung bei 50 % RLF

Bezeichnung	Temperatur/RLF (°C/%)	Druckfestigkeit f (N/mm ²)	Elastizitätsmodul E_{33} (N/mm ²)	Querdehnzahl ν (-)
NF_M2_01	23°C/50 % RLF	3,88	1778	0,26
NF_M2_02		3,67	1640	0,13
NF_M2_03		3,61	1550	0,16
Mittelwert (MW)		3,72	1656	0,18
Standardabweichung		0,14	114	0,07
Variationskoeffizient (VK)		3,8%	6,9%	37,1%

Tabelle A- 2: Ergebnisse der Druckversuche an Mauerwerksprobekörpern aus NF-Steinen in Kombination mit Mörtel M3 nach Konditionierung bei 50 % RLF

Bezeichnung	Temperatur/RLF (°C/%)	Druckfestigkeit f (N/mm ²)	Elastizitätsmodul E_{33} (N/mm ²)	Querdehnzahl ν (-)
NF_M3_01	23°C/50 % RLF	3,87	1459	0,13
NF_M3_02		3,70	1353	0,10
NF_M3_03		3,42	1384	0,06
Mittelwert (MW)		3,66	1399	0,10
Standardabweichung		0,23	54	0,04
Variationskoeffizient (VK)		6,2%	3,9%	36,3%

Tabelle A- 3: Ergebnisse der Druckversuche an Mauerwerksprobekörpern aus NF-Steinen in Kombination mit Mörtel M2 nach Konditionierung bei 65 % RLF

Bezeichnung	Temperatur/RLF (°C/%)	Druckfestigkeit f (N/mm ²)	Elastizitätsmodul E_{33} (N/mm ²)	Querdehnzahl ν (-)
NF_M2_01	20°C/65 % RLF	3,19	1928	0,13
NF_M2_02		3,00	1226	0,20
NF_M2_03		3,16	1209	0,10
Mittelwert (MW)		3,12	1454	0,14
Standardabweichung		0,10	410	0,05
Variationskoeffizient (VK)		3,3%	28,2%	35,8%

Tabelle A- 4: Ergebnisse der Druckversuche an Mauerwerksprobekörpern aus NF-Steinen in Kombination mit Mörtel M3 nach Konditionierung bei 65 % RLF

Bezeichnung	Temperatur/RLF (°C/%)	Druckfestigkeit f (N/mm ²)	Elastizitätsmodul E_{33} (N/mm ²)	Querdehnzahl ν (-)
NF_M3_01	23°C/65 % RLF	2,98	1584	-
NF_M3_02		3,17	1512	0,12
NF_M3_03		2,91	1489	0,15
Mittelwert (MW)		3,02	1528	0,14
Standardabweichung		0,13	49	0,02
Variationskoeffizient (VK)		4,5%	3,2%	15,7%

Anlage A

Tabelle A- 5: Ergebnisse der Druckversuche an Mauerwerksprobekörpern aus NF-Steinen in Kombination mit Mörtel M2 nach Konditionierung bei 80 % RLF

Bezeichnung	Temperatur/RLF (°C/%)	Druckfestigkeit f (N/mm ²)	Elastizitätsmodul E_{33} (N/mm ²)	Querdehnzahl ν (-)
NF_M2_01	23°C/80 % RLF	2,53	1101	0,14
NF_M2_02		2,57	1208	0,18
NF_M2_03		2,42	970	0,08
Mittelwert (MW)		2,51	1093	0,13
Standardabweichung		0,08	119	0,05
Variationskoeffizient (VK)		3,1%	10,9%	37,7%

Tabelle A- 6: Ergebnisse der Druckversuche an Mauerwerksprobekörpern aus NF-Steinen in Kombination mit Mörtel M3 nach Konditionierung bei 80 % RLF

Bezeichnung	Temperatur/RLF (°C/%)	Druckfestigkeit f (N/mm ²)	Elastizitätsmodul E_{33} (N/mm ²)	Querdehnzahl ν (-)
NF_M3_01	23°C/80 % RLF	2,49	1385	0,12
NF_M3_02		2,31	1196	0,15
NF_M3_03		2,5	1095	0,07
Mittelwert (MW)		2,43	1225	0,11
Standardabweichung		0,11	147	0,04
Variationskoeffizient (VK)		4,4%	12,0%	35,7%

Tabelle A- 7: Ergebnisse der Druckversuche an Mauerwerksprobekörpern aus 3DF-Steinen in Kombination mit Mörtel M2 nach Konditionierung bei 50 % RLF

Bezeichnung	Temperatur/RLF (°C/%)	Druckfestigkeit f (N/mm ²)	Elastizitätsmodul E_{33} (N/mm ²)	Querdehnzahl ν (-)
3DF_M2_01	23°C/50 % RLF	3,56	966	0,12
3DF_M2_02		3,55	856	0,12
3DF_M2_03		3,62	811	0,13
Mittelwert (MW)		3,58	878	0,12
Standardabweichung		0,04	79	0,01
Variationskoeffizient (VK)		1,1%	9,1%	4,7%

Tabelle A- 8: Ergebnisse der Druckversuche an Mauerwerksprobekörpern aus 3DF-Steinen in Kombination mit Mörtel M3 nach Konditionierung bei 50 % RLF

Bezeichnung	Temperatur/RLF (°C/%)	Druckfestigkeit f (N/mm ²)	Elastizitätsmodul E_{33} (N/mm ²)	Querdehnzahl ν (-)
3DF_M3_01	23°C/50 % RLF	3,5	741	0,06
3DF_M3_02		3,67	956	0,04
3DF_M3_03		3,5	723	0,03
Mittelwert (MW)		3,56	807	0,04
Standardabweichung		0,10	129	0,02
Variationskoeffizient (VK)		2,8%	16,1%	35,3%

Anlage A

Tabelle A- 9: Ergebnisse der Druckversuche an Mauerwerksprobekörpern aus 3DF-Steinen in Kombination mit Mörtel M2 nach Konditionierung bei 65 % RLF

Bezeichnung	Temperatur/RLF (°C/%)	Druckfestigkeit f (N/mm ²)	Elastizitätsmodul E_{33} (N/mm ²)	Querdehnzahl ν (-)
3DF_M2_01	20°C/65 % RLF	2,73	629	-
3DF_M2_02		2,74	868	0,14
3DF_M2_03		2,66	639	0,09
Mittelwert (MW)		2,71	712	0,12
Standardabweichung		0,04	135	0,04
Variationskoeffizient (VK)		1,6%	19,0%	30,7%

Tabelle A- 10: Ergebnisse der Druckversuche an Mauerwerksprobekörpern aus 3DF-Steinen in Kombination mit Mörtel M3 nach Konditionierung bei 65 % RLF

Bezeichnung	Temperatur/RLF (°C/%)	Druckfestigkeit f (N/mm ²)	Elastizitätsmodul E_{33} (N/mm ²)	Querdehnzahl ν (-)
3DF_M3_01	20°C/65 % RLF	2,68	592	0,01
3DF_M3_02		2,65	687	0,02
3DF_M3_03		2,63	646	0,07
Mittelwert (MW)		2,65	642	0,03
Standardabweichung		0,03	47,65	0,03
Variationskoeffizient (VK)		0,9%	7,4%	96,4%

Tabelle A- 11: Ergebnisse der Druckversuche an Mauerwerksprobekörpern aus 3DF-Steinen in Kombination mit Mörtel M2 nach Konditionierung bei 80 % RLF

Bezeichnung	Temperatur/RLF (°C/%)	Druckfestigkeit f (N/mm ²)	Elastizitätsmodul E_{33} (N/mm ²)	Querdehnzahl ν (-)
3DF_M2_01	23°C/80 % RLF	2,42	575	0,11
3DF_M2_02		2,30	564	0,08
Mittelwert (MW)		2,36	570	0,10
Standardabweichung		0,08	7	0,02
Variationskoeffizient (VK)		3,6%	1,4%	22,3%

Tabelle A- 12: Ergebnisse der Druckversuche an Mauerwerksprobekörpern aus 3DF-Steinen in Kombination mit Mörtel M3 nach Konditionierung bei 80 % RLF

Bezeichnung	Temperatur/RLF (°C/%)	Druckfestigkeit f (N/mm ²)	Elastizitätsmodul E_{33} (N/mm ²)	Querdehnzahl ν (-)
3DF_M3_01	23°C/80 % RLF	2,25	537	0,06
3DF_M3_02		2,29	646	0,23
Mittelwert (MW)		2,27	592	0,15
Standardabweichung		0,03	77	0,12
Variationskoeffizient (VK)		1,2%	13,0%	82,9%

Tabelle A- 13: Ergebnisse der exzentrischen Druckversuche an Mauerwerksprobekörpern aus NF-Steinen nach Konditionierung bei 50 % RLF

Steinart	Temperatur/RLF (°C/%)	Traglast F_{max} (kN)	
		$e = t/10$	$e = t/4$
NF	23°C/50 % RLF	169,23	90,94
		189,13	117,65
		204,17	97,35
Mittelwert (MW)		187,51	101,98
Standardabweichung		17,53	13,94
Variationskoeffizient (VK)		9,3%	13,7%

Anlage A

Tabelle A- 14: Ergebnisse der exzentrischen Druckversuche an Mauerwerksprobekörpern aus NF-Steinen nach Konditionierung bei 65 % RLF

Steinart	Temperatur/RLF (°C/%)	Traglast F_{max} (kN)	
		e = t/10	e = t/4
NF	20°C/65 % RLF	142,88	90,64
		155,4	99,48
		163,15	87,35
Mittelwert (MW)		153,81	92,49
Standardabweichung		10,23	6,27
Variationskoeffizient (VK)		6,6%	6,8%

Tabelle A- 15: Ergebnisse der exzentrischen Druckversuche an Mauerwerksprobekörpern aus NF-Steinen nach Konditionierung bei 80 % RLF

Steinart	Temperatur/RLF (°C/%)	Traglast F_{max} (kN)	
		e = t/10	e = t/4
NF	23°C/80% RLF	134,24	75,37
		133,81	69,65
		-	82,27
		-	80,1
Mittelwert (MW)		134,03	76,85
Standardabweichung		0,30	5,60
Variationskoeffizient (VK)		0,2%	7,3%

Tabelle A- 16: Ergebnisse der exzentrischen Druckversuche an Mauerwerksprobekörpern aus 3DF-Steinen nach Konditionierung bei 50 % RLF

Steinart	Temperatur/RLF (°C/%)	Traglast F_{max} (kN)	
		e = t/10	e = t/4
3DF	23°C/50 % RLF	202,51	135,94
		202,93	138,16
		194,34	134,6
Mittelwert (MW)		199,93	136,23
Standardabweichung		4,84	1,80
Variationskoeffizient (VK)		2,4%	1,3%

Tabelle A- 17: Ergebnisse der exzentrischen Druckversuche an Mauerwerksprobekörpern aus 3DF-Steinen nach Konditionierung bei 65 % RLF

Steinart	Temperatur/RLF (°C/%)	Traglast F_{max} (kN)	
		e = t/10	e = t/4
3DF	20°C/65 % RLF	164,94	112,69
		156,73	141,77
		158,41	152,69
Mittelwert (MW)		160,03	135,72
Standardabweichung		4,34	20,68
Variationskoeffizient (VK)		2,7%	15,2%

Anlage A

Tabelle A- 18: Ergebnisse der exzentrischen Druckversuche an Mauerwerksprobekörpern aus 3DF-Steinen nach Konditionierung bei 80 % RLF

Steinart	Temperatur/RLF (°C/%)	Traglast F_{max} (kN)	
		$e = t/10$	$e = t/4$
3DF	23°C/80% RLF	149,78	107,05
		149,5	102,82
		154,82	100,1
Mittelwert (MW)		151,37	103,32
Standardabweichung		2,99	3,50
Variationskoeffizient (VK)		2,0%	3,4%

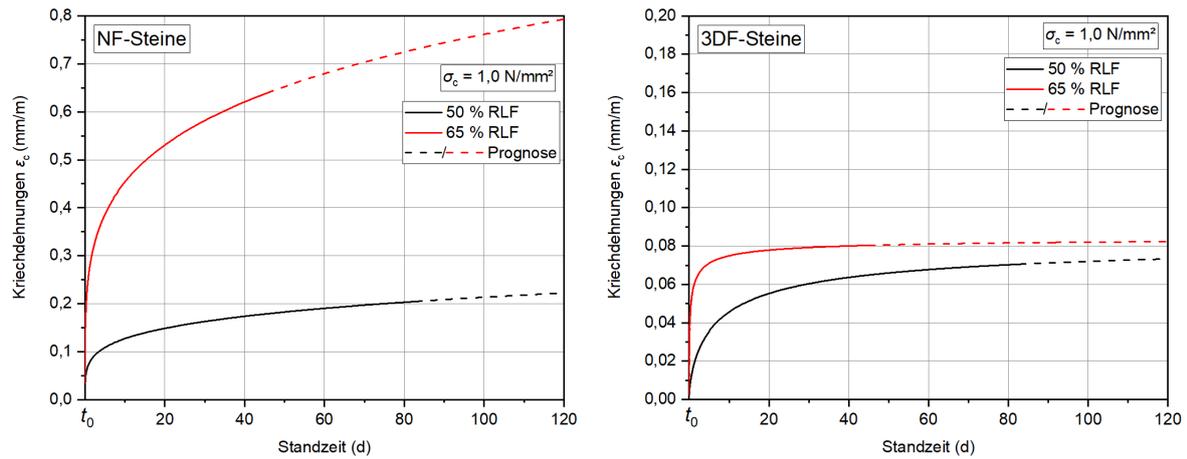


Abbildung A- 1: Verlauf der Kriechdehnungen der NF-Steine (links) und der 3DF-Steine (rechts) in Abhängigkeit des Konditionierungsklimas

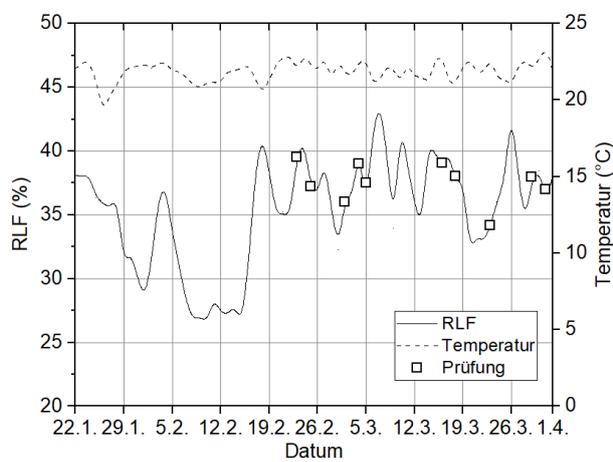


Abbildung A- 2: Aufzeichnung der relativen Luftfeuchte und der Temperatur ab Herstellung bis zur Prüfung der geschosshohen Wandprüfkörper

Anlage A

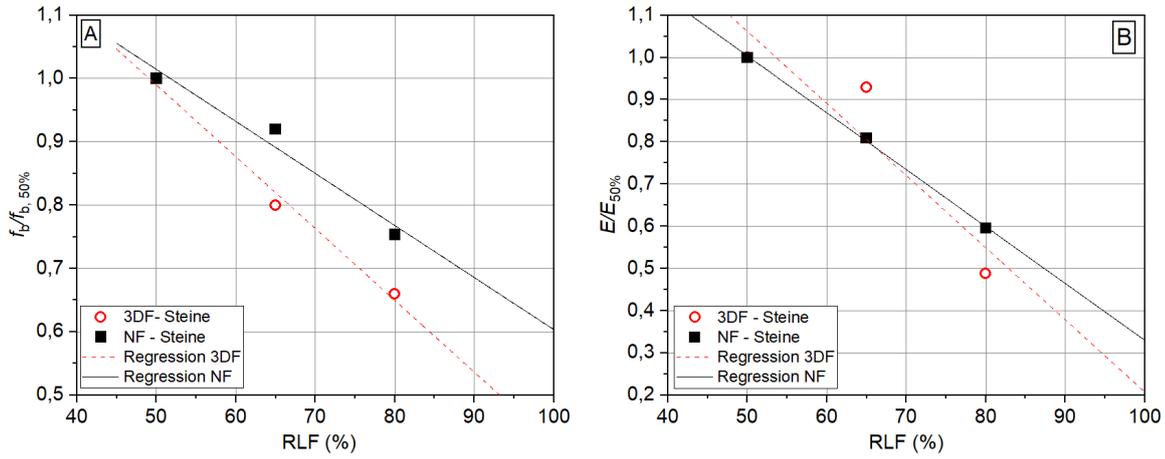


Abbildung A- 3 Reduktion der Druckfestigkeit (A) und des Elastizitätsmoduls (B) der beiden Lehmsteine bezogen auf die bei Standardklimakonditionen (23 °C/50 % RLF) ermittelten Werte

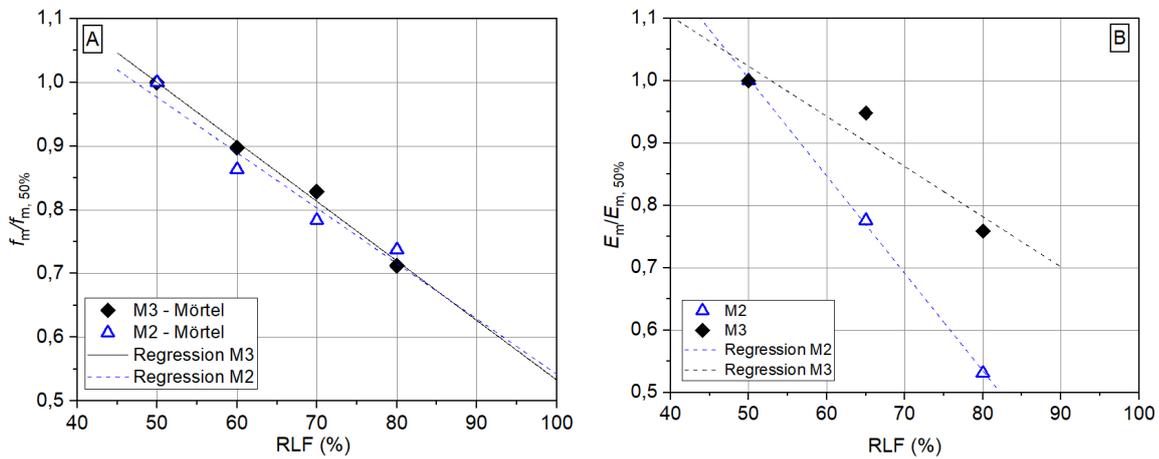


Abbildung A- 4: Reduktion der Druckfestigkeit (A) und des Elastizitätsmoduls (B) der beiden Lehmmauermörtel bezogen auf die bei Standardklimakonditionen (23 °C/50 % RLF) ermittelten Werte

Anlage B

Anlage B. Numerische und analytische Traglastberechnung

Tabelle B- 1: Iterationsergebnisse für den absoluten und bezogenen Ursprungsmodul des untersuchten Lehmmauerwerks aus NF-Steinen

Bezeichnung	Temperatur/RLF (°C/%)	Druckfestigkeit f (N/mm ²)	Dehnung bei Erreichen der Druckfestigkeit ϵ_f (%)	Ursprungsmodul E_0 (N/mm ²)	Bezogener Ursprungsmodul k (N/mm ²)
NF_M2_01	23 °C/50 % RLF	3,88	5,08	1875	2,46
NF_M2_02		3,67	4,48	1637	1,99
NF_M2_03		3,61	4,54	1636	2,06
NF_M3_01		3,87	6,14	1632	2,59
NF_M3_02		3,70	5,49	1469	2,18
NF_M3_03		3,42	4,75	1387	1,93
NF_M2_01	20 °C/65 % RLF	3,19	5,20	1997	3,25
NF_M2_02		3,00	5,27	1283	2,25
NF_M2_03		3,16	6,07	1311	2,52
NF_M3_01		2,98	4,80	1599	2,58
NF_M3_02		3,17	6,04	1698	3,23
NF_M3_03		2,91	4,75	1561	2,55
NF_M2_01	23 °C/80 % RLF	2,53	6,17	1168	2,85
NF_M2_02		2,57	6,39	1214	3,02
NF_M2_03		2,42	6,05	937	2,34
NF_M3_01		2,49	5,77	1396	3,24
NF_M3_02		2,31	7,72	1321	4,41
NF_M3_03		2,50	6,56	1086	2,85
Mittelwert (MW)					2,68
Standardabweichung					0,60
Variationskoeffizient					22,5 %

Tabelle B- 2: Iterationsergebnisse für den absoluten und bezogenen Ursprungsmodul des untersuchten Lehmmauerwerks aus 3DF-Steinen

Bezeichnung	Temperatur/RLF (°C/%)	Druckfestigkeit f (N/mm ²)	Dehnung bei Erreichen der Druckfestigkeit ϵ_f (%)	Ursprungsmodul E_0 (N/mm ²)	Bezogener Ursprungsmodul k (N/mm ²)
3DF_M2_01	23 °C/50 % RLF	3,56	5,99	1099	1,85
3DF_M2_02		3,55	6,68	996	1,87
3DF_M2_03		3,62	6,45	945	1,69
3DF_M3_01		3,50	6,64	832	1,58
3DF_M3_02		3,67	6,10	1088	1,81
3DF_M3_03		3,50	6,80	818	1,59
3DF_M2_01	20 °C/65 % RLF	2,73	6,86	695	1,74
3DF_M2_02		2,74	6,00	917	2,01
3DF_M2_03		2,66	5,98	734	1,65
3DF_M3_01		2,68	7,81	677	1,97
3DF_M3_02		2,65	6,73	770	1,96
3DF_M3_03		2,63	7,66	698	2,03
3DF_M2_01	23 °C/80 % RLF	2,42	8,38	616	2,13
3DF_M2_02		2,30	7,92	622	2,15
3DF_M3_01		2,25	8,29	601	2,22
3DF_M3_02		2,29	7,94	686	2,37
Mittelwert (MW)					1,91
Standardabweichung					0,23
Variationskoeffizient					12,2 %

Anlage B

Tabelle B- 3: Berechnete Lastexzentrizitäten der Traglastversuche an RILEM-Prüfkörpern

Steinart	Temperatur/RLF (°C/%)	Planmäßige Lastexzentrizität e_0/t	Dehnung an den Querschnittsrändern bei $N_R/3$		Bezogene Druckzonenhöhe x/t	Berechnete Lastexzentrizität e/t	
			ϵ_1 (‰)	ϵ_2 (‰)		EW	MW
NF	23 °C/50 % RLF	0,10	4,87	0,81	1,00	0,07	0,03
			4,99	3,64	1,00	0,01	
			4,80	4,47	1,00	0,00	
		0,25	5,02	-4,04	0,55	0,29	0,26
			4,71	-1,54	0,75	0,22	
			5,05	-3,10	0,62	0,26	
	20 °C/65 % RLF	0,10	0,82	0,53	1,00	0,03	0,03
			1,94	0,84	1,00	0,05	
			1,73	1,32	1,00	0,02	
		0,25	4,69	-2,49	0,65	0,25	0,21
			5,21	-1,29	0,80	0,19	
			5,12	-1,28	0,80	0,19	
	23 °C/80 % RLF	0,10	4,99	3,99	1,00	0,01	0,00
			6,08	4,63	1,00	0,00	
		0,25	2,84	-1,04	0,73	0,23	0,24
2,90			-1,47	0,66	0,26		
3,18			-1,39	0,70	0,24		
3,63			-1,62	0,69	0,24		
3DF	23 °C/50 % RLF	0,10	8,35	0,60	1,00	0,08	0,08
			8,31	0,72	1,00	0,08	
			8,29	0,51	1,00	0,09	
		0,25	8,16	-2,05	0,80	0,19	0,21
			8,04	-2,71	0,75	0,21	
			8,08	-3,09	0,72	0,22	
	20 °C/65 % RLF	0,10	6,72	1,69	1,00	0,06	0,07
			8,86	0,39	1,00	0,09	
			8,84	0,84	1,00	0,05	
		0,25	6,78	-0,94	0,88	0,17	0,17
			6,85	-0,91	0,88	0,17	
			6,53	-0,76	0,90	0,17	
	23 °C/80 % RLF	0,10	7,36	1,09	1,00	0,08	0,06
			6,97	2,01	1,00	0,05	
			7,97	1,80	1,00	0,06	
0,25		2,66	-0,59	0,82	0,22	0,21	
		6,50	-1,69	0,79	0,21		
		6,89	-1,74	0,80	0,20		

Anlage B

Tabelle B- 4: Experimentell, analytisch und numerisch berechnete Traglastfaktoren der RILEM Prüfkörper

Steinart	Temperatur/RLF (°C/%)	Lastexzentrizität		Experimenteller Traglastfaktor $\Phi_{exp} = N_{Rl}/(t \cdot f)$			Analytischer Traglastfaktor Φ_{ana}	Numerischer Traglastfaktor Φ_{num}
		e_0/t	e/t	EW	MW	VK (%)		
NF	23 °C/50 % RLF	0,10	0,03	0,80	0,88	9,4	0,92	0,90
				0,89				
				0,96				
		0,25	0,26	0,43	0,48	13,7	0,46	0,41
				0,56				
				0,46				
	20 °C/65 % RLF	0,10	0,03	0,81	0,88	6,7	0,91	0,88
				0,89				
				0,93				
		0,25	0,21	0,52	0,53	7,1	0,55	0,50
				0,57				
				0,50				
23 °C/80 % RLF	0,10	0,00	0,96	0,95	0,9	0,99	0,98	
			0,94					
			0,55					
	0,25	0,24	0,49	0,55	7,6	0,49	0,44	
			0,59					
			0,57					
3DF	23 °C/50 % RLF	0,10	0,08	0,67	0,66	2,4	0,79	0,75
				0,67				
				0,64				
		0,25	0,21	0,45	0,45	1,4	0,56	0,51
				0,46				
				0,45				
	20 °C/65 % RLF	0,10	0,07	0,73	0,71	2,8	0,83	0,79
				0,69				
				0,70				
		0,25	0,17	0,50	0,60	16,1	0,62	0,58
				0,63				
				0,68				
23 °C/80 % RLF	0,10	0,06	0,76	0,77	2,3	0,83	0,79	
			0,75					
			0,79					
	0,25	0,21	0,55	0,53	3,4	0,55	0,51	
			0,52					
			0,51					

Anlage B

Tabelle B- 5: Berechnete Lastexzentrizitäten der Traglastversuche an geschosshohen Lehm-mauerwerkswänden

Steinart	Wanddicke t (cm)	Planmäßige Lastexzentrizität e_0/t	Dehnung an den Querschnittsrändern bei $N_R/3$		Bezogene Druckzonenhöhe x/t	Berechnete Lastexzentrizität e/t	
			ε_1 (‰)	ε_2 (‰)		EW	MW
NF	11,5	0,00	1,08	0,73	1,00	0,03	0,02
			1,00	0,58	1,00	0,04	
3DF	17,5		0,79	0,73	1,00	0,01	
	24,0		0,87	0,87	1,00	0,00	
			0,97	0,90	1,00	0,01	
	17,5		0,97	0,74	1,00	0,02	
3DF	24,0	0,25	0,69	-0,19	0,79	0,21	0,23
			0,76	-0,17	0,81	0,24	
			0,96	-0,17	0,85	0,24	
			0,94	-0,28	0,77	0,23	

Tabelle B- 6: Experimentell, analytisch und numerisch berechnete Traglastfaktoren der geschosshohen Lehm-mauerwerkswände

Steinart	Wanddicke t (cm)	Lastexzentrizität		Knicklängenbeiwert β	Schlankheit h_{ei}/t	Traglastfaktoren		
		e_0/t	e/t			Φ_{exp}	Φ_{ana}	Φ_{num}
NF	11,5	0,00	0,03	0,5	8,9	0,85	0,78	0,81
			0,04	0,7	12,4	0,70	0,65	0,67
3DF	17,5		0,01	0,7	8,3	0,80	0,88	0,91
			0,00	0,7	8,2	0,82	0,90	0,91
	24,0		0,01	0,7	6,0	0,89	0,93	0,95
			0,02	0,7	6,0	0,85	0,87	0,90
3DF	17,5	0,25	0,21	1,0	11,7	0,25	0,24	0,27
			0,24	1,0	11,7	0,31	0,25	0,28
	24,0		0,24	1,0	8,5	0,38	0,37	0,40
			0,23	1,0	8,5	0,38	0,32	0,34

Anlage C. Bemessungsvorschlag für druckbeanspruchtes Lehm-mauerwerk

Tabelle C - 1: Versuchsgestützte Ermittlung des materialeitigen Teilsicherheitsbeiwerts γ_M

Bezeichnung	Temperatur/RLF (°C/%)	Druckfestigkeit f (N/mm ²)	Logarithmierte Druckfestigkeit LN(f)	Standardabweichung der logarithmierten Druckfestigkeit $s_{f, LN}$	Materialeitiger Teilsicherheitsbeiwert γ_M
NF_M2_01	23 °C/50 % RLF	3,88	1,36	0,047	1,46
NF_M2_02		3,67	1,30		
NF_M2_03		3,61	1,28		
NF_M3_01		3,87	1,35		
NF_M3_02		3,70	1,31		
NF_M3_03		3,42	1,23		
NF_M2_01	20 °C/65 % RLF	3,19	1,16	0,039	1,41
NF_M2_02		3,00	1,10		
NF_M2_03		3,16	1,15		
NF_M3_01		2,98	1,09		
NF_M3_02		3,17	1,15		
NF_M3_03		2,91	1,07		
NF_M2_01	23 °C/80 % RLF	2,53	0,93	0,038	1,41
NF_M2_02		2,57	0,94		
NF_M2_03		2,42	0,88		
NF_M3_01		2,49	0,91		
NF_M3_02		2,31	0,84		
NF_M3_03		2,50	0,92		
3DF_M2_01	23 °C/50 % RLF	3,56	1,27	0,019	1,30
3DF_M2_02		3,55	1,27		
3DF_M2_03		3,62	1,29		
3DF_M3_01		3,50	1,25		
3DF_M3_02		3,67	1,30		
3DF_M3_03		3,50	1,25		
3DF_M2_01	20 °C/65 % RLF	2,73	1,00	0,017	1,29
3DF_M2_02		2,74	1,01		
3DF_M2_03		2,66	0,98		
3DF_M3_01		2,68	0,99		
3DF_M3_02		2,65	0,97		
3DF_M3_03		2,63	0,97		
3DF_M2_01	23 °C/80 % RLF	2,42	0,88	0,031	1,58
3DF_M2_02		2,30	0,83		
3DF_M3_01		2,25	0,81		
3DF_M3_02		2,29	0,83		
Mittelwert (MW)					1,41
Standardabweichung					0,11
Variationskoeffizient					7,7 %