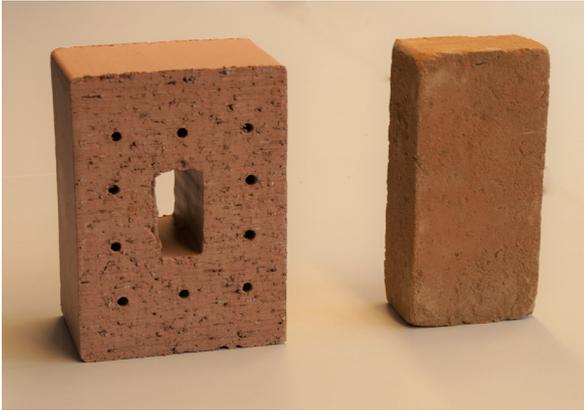


Tragfähigkeit von Lehm-mauerwerk – experimentelle und numerische Analyse

Die Bemessung von tragendem Lehm-mauerwerk erfolgt in Deutschland auf Basis der Lehm-bau Regeln [1]. Das dort verankerte Nachweisverfahren beruht auf einem globalen Sicherheitskonzept, welches aus zuverlässigkeitstheoretischer Sicht nicht mehr dem Stand der Technik entspricht. Auf Grund dessen wird das Bemessungskonzept für Lehm-mauerwerk vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) voraussichtlich 2023 außer Kraft gesetzt. Ein statischer Nachweis von tragenden Lehm-bauten wäre in Deutschland dann ausschließlich mit einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE) oder vorhabenbezogener Bauartgenehmigung (vBg) möglich. Beides ist mit erheblichem Mehraufwand und höheren Kosten verbunden, was für den Lehm-mauerwerksbau einen entscheidenden Nachteil im Vergleich zum konventionellen Mauerwerksbau darstellt. Um eine unkomplizierte Praxisanwendung von Lehm-mauerwerk zu ermöglichen, werden innerhalb eines Forschungsvorhabens, welches von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), dem Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt sowie dem Ingenieurbüro ZRS durchgeführt wird, auf Basis der Produktnormen für Lehmsteine [2] und Lehm-mauermörtel [3] Grundlagen für ein aktualisiertes Bemessungskonzept entwickelt. Im Rahmen des Projekts wird ebenfalls untersucht, inwiefern die Bemessungsregeln nach den vereinfachten Berechnungsmethoden für unbewehrtes Mauerwerk gemäß DIN EN 1996-3/NA [4] auf den Lehm-mauerwerksbau übertragbar sind. Falls eine Anwendung des normativen Nachweisverfahrens bei Lehm-mauerwerk möglich ist, wäre zukünftig eine Aufnahme von Lehmsteinen und Lehm-mauermörtel in den nationalen Anhang des Eurocode 6 denkbar, was eine bedeutsame Erweiterung des Anwendungsbereichs von Lehm-mauerwerk zur Folge hätte.

Diverse wissenschaftliche Untersuchungen konnten zeigen, dass bemessungsrelevante Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Lehm-mauerwerksbaustoffen stark von der vorherrschenden Materialfeuchte abhängen [5] [7], welche im hygroskopischen Wassergehaltsbereich im Wesentlichen von der relativen Luftfeuchte (RLF) bestimmt wird [8]. Auch die Zwischenergebnisse des laufenden Forschungsvorhabens zur Entwicklung eines Bemessungskonzepts für Lehm-mauerwerk ergaben eine deutlich erkennbare Abhängigkeit zwischen der Materialfeuchte und den relevanten Festigkeits- und Verformungseigenschaften. Eine detaillierte Kenntnis des feuchteabhängigen Materialverhaltens von Lehmsteinen, -mörtel und -mauerwerk ist zwingend erforderlich, um ein konsistentes und zuverlässiges Bemessungskonzept für Lehm-mauerwerk zu entwickeln. Im Rahmen des laufenden Forschungsprojektes werden deshalb umfangreiche Versuche zum Drucktragverhalten von Lehmsteinen und -mörtel sowie Lehm-mauerwerk nach Konditionierung bei unterschiedlichen RLF durchgeführt und analysiert. Weiterhin werden auf Basis der experimentellen Ergebnisse numerische Modelle kalibriert, welche die detaillierte Analyse der Biegedrucktragfähigkeit von Lehm-mauerwerk ermöglichen.

In diesem Beitrag werden zunächst die bisherigen Zwischenergebnisse bezüglich der experimentell ermittelten feuchteabhängigen Materialkennwerte von Lehmsteinen, -mörtel und -mauerwerk dargestellt. Darauf aufbauend werden numerische Untersuchungen zur Bestimmung der Systemtragfähigkeit von Lehm-mauerwerk unter Feuchteinflusses durchgeführt und erläutert.



01 Stranggepresster Lehmstein 3DF (links), formgeschlagener Lehmstein NF (rechts)

Experimentelle Untersuchungen

Materialien und Prüfverfahren

Steine und Mörtel

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens untersuchten Lehmsteine und Lehmmauermörtel stammen aus werksmäßiger Herstellung. Es wurden sowohl experimentelle Untersuchungen an formgeschlagenen normalformatigen Vollsteinen (NF) sowie an stranggepressten Vollsteinen im Format 3DF (siehe Abbildung 1) durchgeführt. Zudem wurden Mörtel der Druckfestigkeitsklasse M2 und M3 gemäß DIN 18946 [3] getestet.

Nach Lagerung der Probekörper in unterschiedlich feuchten Klimaten wurden Versuche zur Bestimmung

der Druckfestigkeit und des Verformungsverhaltens an Steinen und Mörteln durchgeführt, um den Einfluss der RLF auf Festigkeit und Verformungseigenschaften zu quantifizieren. Neben dem Normklima für Lehmbaumstoffe (23°C/50% RLF) wurden die Probekörper bei 20°C/65% RLF und 23°C/80% RLF bis zum Erreichen der Massekonstanz konditioniert und anschließend unmittelbar nach Entnahme aus dem Klimaschrank geprüft.

Die Druckfestigkeit der Mörtel wurde gemäß DIN 18946 [3] an Prismen mit den Abmaßen 40 × 40 × 160 mm³ ermittelt. Die Verformungen wurden an Großprismen der Abmaße 100 × 100 × 200 mm³ in Anlehnung an DIN 18555-4 [9] geprüft, wobei die Lastaufbringung gemäß DIN 18945 [2] in drei Belastungsästen bis zu einem Drittel der Maximallast erfolgte. Somit konnten die Verformungseigenschaften frei von Kriecheinflüssen bestimmt werden, was bei dem in DIN 18555-4 [9] vorgesehenen Belastungsschema mit einer Versuchsdauer von 15 – 20 Minuten bis zum Bruch nicht der Fall ist. Die Dehnungsmessung erfolgte kontinuierlich mit Clip-on Extensometern.

Die Druckfestigkeit der 3DF-Steine wurde gemäß Lehmsteinnorm am ganzen mit Gips abgeglichenen Stein ermittelt. Die Druckfestigkeit der NF-Steine wurde zum einen gemäß DIN 18945 [2] am halbierten aufeinander gemauerten Stein und gemäß

02 Prüfkörper zur Ermittlung der Elastizitätsmodule aus drei ganzen 3DF-Steinen (links) und drei halben, aufeinander gemauerten NF-Steinen (rechts)

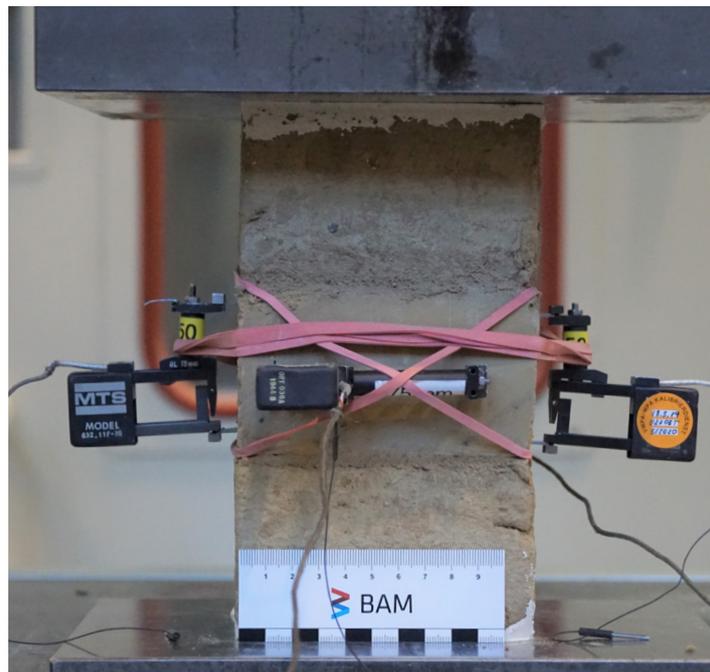
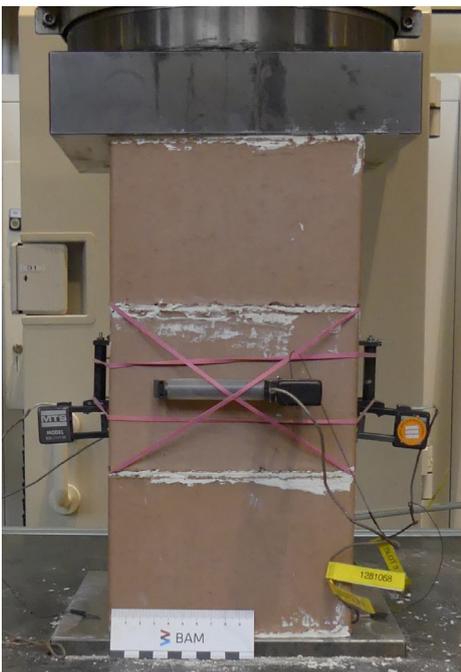


Tabelle 1 Überblick des Versuchsprogramms an Steinen und Mörteln

Stein / Druckfestigkeit		Elastizitätsmodul				
Mörtel	Probekörper	Prüfverfahren	Anzahl	Probekörper	Prüfverfahren	Anzahl
NF	halbiert, aufeinander gemauert	DIN 18945	10	3 halbe aufeinander gemauerte Steine	Verfahren nach Schubert in Verbindung mit DIN 18946	3
	ganzer Stein	DIN EN 772-1	10			
3DF	ganzer Stein	DIN 18945 und DIN EN 772-1	10	3 ganze aufeinander gemauerte Steine		3
M2	Prisma 160 x 40 x 40 mm ³	DIN 18946	6	Großprisma 100 x 100 x 200 mm ³	DIN 18555-4 in Verbindung mit DIN 18945	3
M3						

DIN EN 772-1 [10] am ganzen Stein geprüft. Bei Prüfung nach DIN EN 772-1 [10] wurden die ermittelten Druckfestigkeiten mit dem in der Norm angegebenen Formfaktor normiert. Nach Gegenüberstellung der Ergebnisse beider Prüfverfahren lässt sich einschätzen, ob die Formfaktoren für herkömmliches Mauerwerk auch für die Prüfung von Lehmsteinen geeignet sind. Bei beiden Prüfverfahren wurden die Lasteinleitungsflächen ebenfalls mit Gips abgeglichen. Die Dehnungen wurden an Prüfkörpern aus drei mit einer möglichst dünnen Gipschicht (≤ 2 mm) aufeinander gemauerten Steine ermittelt (siehe Abbildung 2). Die gewählte Prüfkörpergeometrie erfolgte in Anlehnung an SCHUBERT [11], da diese eine Dehnungsmessung im nahezu von Querdehnungsbehinderung freien mittleren Drittel der Prüfkörperhöhe ermöglicht. Weiterhin wird die Dehnungsmessung nicht durch eine Lagerfuge im Messbereich beeinflusst, wie es nach DIN 18945 [2] für normalformatige Steine der Fall wäre. Die Belastung erfolgte in drei Zyklen bis zu einem Drittel der Maximallast mit entsprechenden Haltezeiten gemäß [2]. Wie bei den Mörtelprüfungen erfolgte die Dehnungsmessung kontinuierlich mit Clip-On Extensometern. Ein Überblick der Prüfkörper und -verfahren kann Tabelle 1 entnommen werden.

Mauerwerk

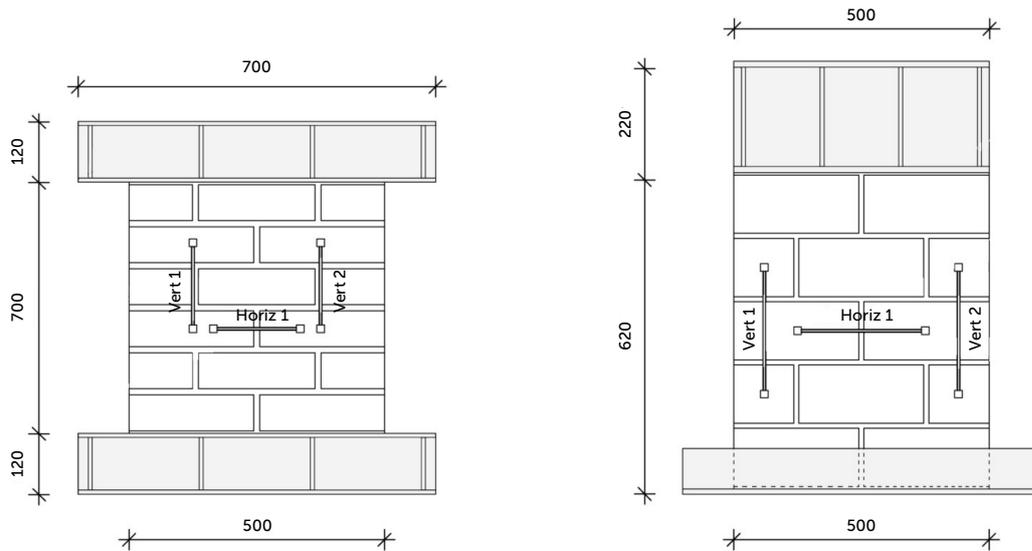
Die Ermittlung der zentrischen Mauerwerksdruckfestigkeit erfolgte an RILEM-Probekörpern. Bei der Herstellung der Probekörper wurden die Lehmsteine durch eintauchen in einen Wasserbehälter mit ca. 10 mm Wasser für etwa 5 Sekunden vorgegast. Insgesamt wurden vier Stein-Mörtel-Kombinationen getestet: NF/M2, NF/M3, 3DF/M2 und 3DF/M3. Je Stein-Mörtel-Kombination wurden drei Probekörper hergestellt und bis zum Erreichen der Massekonstanz bei 23°C/50% RLF bzw. bei 23°C/80% RLF gelagert. Eine weitere Versuchsserie bei 20°C/65% RLF steht noch aus. Die Prüfung erfolgte gemäß DIN EN

1052-1 [12], wobei der Prüfzeitpunkt durch Erreichen der Massekonstanz und nicht nach einem definierten Zeitraum von 28 Tagen festgelegt wurde. Die Belastung erfolgte konstant und weggeregelt mit einer Belastungsgeschwindigkeit, die einen Bruch nach ca. 15 Minuten herbeiführt. Die Dehnungen wurden auf Vorder- und Rückseite kontinuierlich mit je drei induktiven Wegaufnehmern aufgezeichnet. Je Probekörperseite wurden einmal die Quer- und zweimal die Längsdehnungen gemessen. Anordnung und Länge der Messstrecken kann Abbildung 3 und Abbildung 4 entnommen werden.

Ergebnisse

Steine und Mörtel

Die gemäß DIN 18945 [2] nach Konditionierung im Normklima (23°C/50% RLF) ermittelten Steindruckfestigkeiten betragen für die NF-Steine im Mittel 4,38 N/mm² und für die 3DF-Steine 4,98 N/mm², wobei die kleinsten Einzelwerte jeweils über 3,0 N/mm² lagen. Beide Steine können somit der Druckfestigkeitsklasse 3 zugeordnet werden. Die Mörteldruckfestigkeiten betragen für den als M3 klassifizierten Mörtel 4,13 N/mm² und für den als M2 klassifizierten Mörtel 3,99 N/mm². Die Mörtel können somit in die Festigkeitsklassen M3, respektive M4 gemäß DIN 18946 [3] eingeordnet werden und liegen somit je eine Druckfestigkeitsklasse höher als vom Hersteller angegeben. Erwartungsgemäß nimmt die Druckfestigkeit von Mörtel und Steinen mit steigender RLF ab. Ebenso nimmt der Elastizitätsmodul der Steine mit steigender RLF ab. Ein Überblick der Prüfergebnisse kann den Tabellen 2 und 3 entnommen werden. Dabei sind für die normalformatigen Steine sowohl die Ergebnisse der halbierten aufeinander gemauerten Steine (NF_{halb}) als auch die am ganzen Stein geprüften und mittels Formfaktor normierten Ergebnisse (NF_{ganz}) angegeben. Die normierten Druckfestigkei-



03 Anordnung und Länge der Messtrecken der RILEM Probekörper aus NF-Steinen (a) und 3DF-Steinen (b)

ten liegen hierbei im Mittel ca. 10% über den Werten der Prüfung am halbierten aufeinander gemauerten Stein gemäß DIN 18945 [2]. Um eine gesicherte Aussage über die Anwendbarkeit der Formfaktoren nach DIN EN 772-1 [10] bei der Prüfung von Lehmsteinen treffen zu können, müssen jedoch noch weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

minderung der Elastizitätsmoduln fällt bei gleicher Steigerung der RLF mit ca. 42% bei den NF-Steinen und ca. 45% bei den 3DF-Steinen etwas größer aus. Anhand der eingefügten linearen Interpolation ist gut zu erkennen, dass ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen RLF und Druckfestigkeit sowie Elastizitätsmodul besteht. Lediglich bei den 3DF Steinen ist dieser Trend weniger ausgeprägt.

In Abbildung 5 sind die auf das Normklima (23°C/50% RLF) bezogenen Druckfestigkeiten ($f/f_{50\%}$) und Elastizitätsmoduln ($E_{0,33}/E_{0,33,50\%}$) der Lehmsteine dargestellt. Bei Steigerung der RLF von 50 auf 80% vermindert sich die Druckfestigkeit der 3DF-Steine um ca. 35% und die der NF-Steine um ca. 25%. Die Ab-

In Abbildung 6 sind darüber hinaus die bezogenen Druckfestigkeiten ($f/f_{50\%}$) der Lehmmörtel abgebildet. Hier beträgt die Verringerung der Druckfestigkeit infolge einer Steigerung der RLF von 50% auf 80% ca. 29%.

04 Mauerwerksprobekörper aus NF-Steinen (links) und 3DF-Steinen (rechts) inklusive Messtechnik während der Prüfung



Tabelle 2 Mittelwerte der Versuchsergebnisse für Lehmsteine

Stein	Prüfklima	Druckfestigkeit NF _{halb} /NF _{ganz}	Variationskoeffizient NF _{halb} /NF _{ganz}	Elastizitäts- modul	Variations- koeffizient	Querdehnungs- modul	Variations- koeffizient
	T/RLF [°C/%]	f [N/mm ²]	Vk [%]	E _{0,33} [N/mm ²]	Vk [%]	Q _{0,33} [N/mm ²]	Vk [%]
NF	23/50	4,38/4,57	5,9/1,6	2806	2,8	15743	12,7
	20/65	4,0 ³ /4,23	3,6/3,7	2167	4,4	16315	8,3
	23/80	3,30/3,63	3,5/2,4	1629	4,2	15615	10,5
3DF	23/50	4,98	3,3	3350	20,5	7372	24,5
	20/65	3,98	1,5	3011	12,4	5845	13,6
	23/80	3,28	3,0	1874	5,5	10304	39,8

Tabelle 3 Mittelwerte der Versuchsergebnisse für Lehmmauermörtel

Mörtel	Prüfklima	Druckfestigkeit	Variationskoeffizient	Elastizitätsmodul	Variationskoeffizient
	T/RLF [°C/%]	f [N/mm ²]	Vk [%]	E _{0,33} [N/mm ²]	Vk [%]
M2	23/50	4,13	8,7	3258	4,6
	23/60	3,71	7,2	ausstehend	ausstehend
	23/70	3,42	7,4		
	23/80	2,94	7,8	2691	41,4
M3	23/50	3,99	5,2	5450	4,2
	23/60	3,35	9,4	5139*	3,3*
	23/70	3,04	7,9		
	23/80	2,86	6,8	3118	12,9

* Werte ermittelt bei 20°C/65% RLF

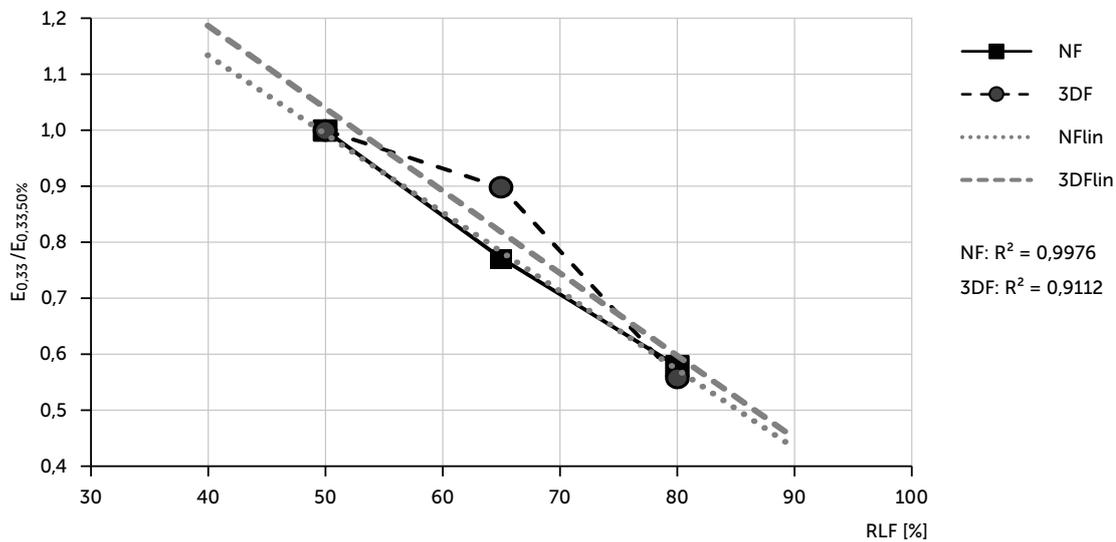
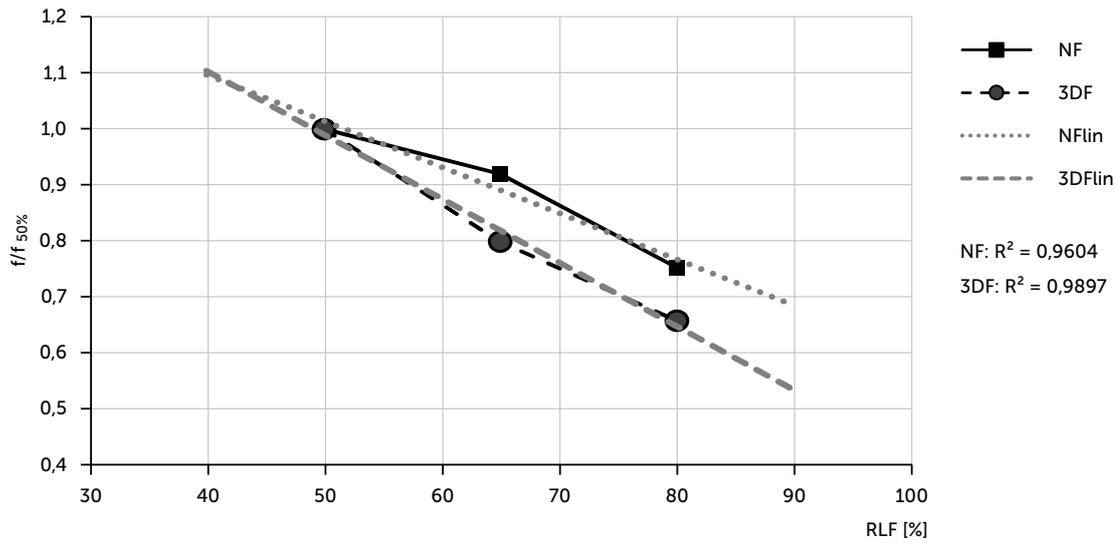
Mauerwerk

Wie bei Lehmsteinen und -mörteln geht auch bei Lehmmauerwerk eine Steigerung der RLF mit einer Verringerung der Druckfestigkeit und des Elastizitätsmoduls einher. Für das aus normalformatigen Steinen hergestellte Mauerwerk ergibt sich bei Erhöhung der RLF von 50% auf 80%, unabhängig vom verwendeten Mörtel eine Abminderung der Druckfestigkeit von ca. 33%. Der Elastizitätsmodul der mit Mörtel M2 hergestellten Prüfserie nimmt mit ca. 34% in etwa gleich stark ab, wohingegen der Elastizitätsmodul des Mauerwerks mit Mörtel M3 lediglich um 13% abnimmt. Druckfestigkeiten und Elastizitätsmodul der aus 3DF-Steinen hergestellten Mauerwerksprüfkörper nehmen zwischen 34 und 37% ab. Die Ergebnisse als Mittelwerte der jeweiligen Prüfserien sind in Tabelle 4 enthalten.

Ein Vergleich der Mauerwerksdruckfestigkeiten bei gleicher Steinart und RLF zeigt, dass der Mörtel kaum Einfluss auf die Druckfestigkeit des Mauerwerks hat, was im Wesentlichen an den sehr ähnlichen Druck-

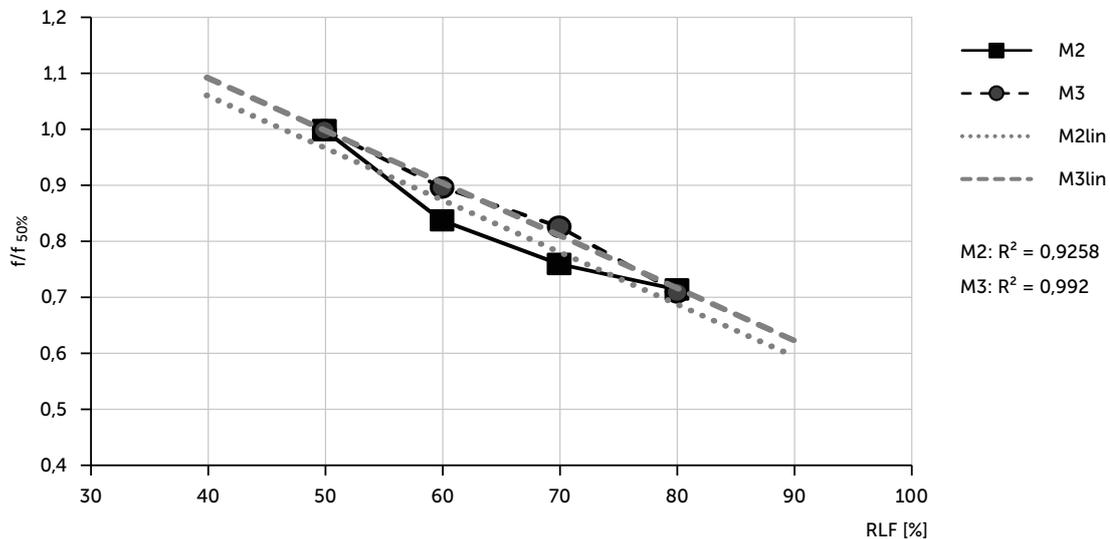
festigkeiten der verwendeten Mauermörtel liegt (vgl. Tabelle 3).

Wie MÜLLER et.al. [13] [14] bereits feststellen konnten, sind Tragverhalten und Versagensmechanismen von Lehmmauerwerk prinzipiell dieselben wie bei konventionellem Mauerwerk, was deutlich anhand der Rissbildungen im Versagenszustand beobachtet werden kann. Im Gegensatz zu konventionellem Mauerwerk sind jedoch die Bruchdehnungen bei Lehmmauerwerk vergleichsweise groß und nehmen mit steigender RLF weiter zu. Dieser Zusammenhang wird beim Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Linien deutlich. In Abbildung 7 sind die normierten Spannungs-Dehnungs-Linien der Lehmmauerwerksprobekörper als Mittelwerte der Versuche angegeben. Zu erkennen sind die höheren Bruchdehnungen der bei 80% RLF durchgeführten Prüfserien. Weiterhin wurden exemplarisch die Spannungs-Dehnungs-Linien von Mauerwerk aus gebrannten Ziegeln und Porenbeton mit den Kennzahlen zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls gemäß DIN EN 1996-1-1/NA [15]



05 Bezogene Druckfestigkeiten (oben) und Elastizitätsmodule (unten) der NF- und 3DF-Steine

06 Bezogene Druckfestigkeiten der Mörtel



eingetragen, um die unterschiedlichen Bruchdehnungen zu veranschaulichen.

Weiterhin kann festgestellt werden, dass das Verhältnis von Elastizitätsmodul zu Druckfestigkeit bei Lehmmauerwerk deutlich geringer ausfällt als etwa bei Kalksandstein- oder Ziegelmauerwerk. Um einen Vergleich der Verhältnisse zu ermöglichen, wurden die Mittelwerte der Mauerwerksdruckfestigkeiten mit Hilfe des in DIN 1052-1 [12] angegebenen Faktors von 1,2 in charakteristische Festigkeiten umgerechnet. Die entsprechenden Werte des aus normalformatigen Steinen hergestellten Mauerwerks liegen mit $E_{0,33}/f_k = 460 - 600$ in etwa in dem für Porenbetonmauerwerk angegebenen Wertebereich von $E_{0,33}/f_k = 500 - 650$ [15]. Bei dem aus 3DF-Steinen hergestellten Mauerwerk ist das Verhältnis von Elastizitätsmodul zu charakteristischer Druckfestigkeit mit $E_{0,33}/f_k = 280 - 310$ jedoch erheblich geringer, obwohl die Elastizitätsmoduln der 3DF-Steine zumindest im Normklima deutlich über denen der NF-Steinen liegen (siehe Tabelle 2). Die genaue Ursache hierfür gilt es im weiteren Rahmen der Forschungsarbeit zu ermitteln.

Numerische Untersuchungen

Modellierung von Lehmmauerwerk

Aufbauend auf den experimentell gewonnenen Materialkennwerten wird ein numerisches Modell erstellt, um den Einfluss der Feuchte auf die globale Tragfähigkeit von Lehmmauerwerk unter zentrischer und

exzentrischer Druckbeanspruchung abzuschätzen. Die Kalibrierung des Modells erfolgt hierbei anhand der Versuchsergebnisse der Mauerwerksprobekörper aus normalformatigen Lehmsteinen. Zur Modellbildung wird der Ansatz einer vereinfachten Mikromodellierung gewählt, bei der die einzelnen Mauersteine zusammen mit jeweils der Hälfte der angrenzenden Mörtelfugen als Mauerwerksblöcke modelliert werden. Ein Mauerwerksblock ist mit $10 \times 10 \times 10$ Netzelementen diskretisiert. An Wandfuß und -kopf des Modells sind steife Lasteinleitungsplatten vorgesehen, um Singularitäten in Auflager- und Lasteinleitungsbereichen zu vermeiden. Die Lagerbedingungen am oberen und unteren Wandende erlauben lediglich eine freie Verdrehung um die Längsachse des Modells. Die Verbundbedingungen zwischen den einzelnen Steinreihen sind durch Kontaktelemente in den Lagerfugen definiert. Diesen wird ein diskretes Rissmodell ohne Zugfestigkeit zugewiesen. Die Geometrie des numerischen Modells ist in Abbildung 8 dargestellt.

Die Mauerwerksblöcke werden mit Hilfe eines Gesamtdehnungsrisssmodells (siehe Abbildung 9) modelliert, welches es erlaubt sowohl nichtlineares Materialverhalten unter einachsiger Biegedruckbeanspruchung abzubilden als auch unterschiedliches Druck- und Zugverhalten zu berücksichtigen. Zur Modellierung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung unter Druckbeanspruchung wird das Materialgesetz nach DIN EN 1992-1-1 [16] verwendet:

07 Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Linien von Lehmmauerwerk bei unterschiedlichen RLF mit den idealisierten Spannungs-Dehnungs-Linien von Ziegel- und Porenbetonmauerwerk gemäß EC 6

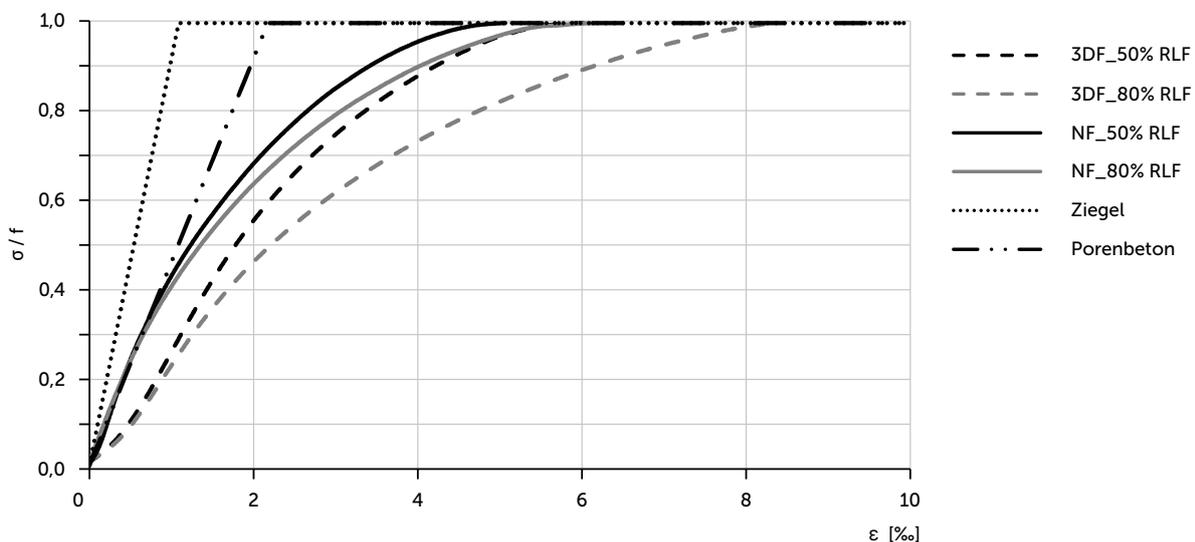


Tabelle 4 Mittelwerte der Versuchsergebnisse für Lehmmauerwerk

Prüfserie	Prüfklima	Anzahl	Druckfestigkeit	Variationskoeffizient	Elastizitätsmodul	Variationskoeffizient
Stein/Mörtel	T/RLF [°C/%]	[-]	f [N/mm ²]	Vk [%]	E _{0,33} [N/mm ²]	Vk [%]
NF/M2	23/50	3	3,72	3,8	1656	6,9
	23/80	3	2,51	3,1	1093	10,9
NF/M3	23/50	3	3,66	6,2	1399	3,9
	23/80	3	2,43	4,4	1225	12,1
3DF/M2	23/50	3	3,56	0,2	911	8,5
	23/80	2	2,36	1,25	592	13
3DF/M3	23/50	3	3,59	3,4	848	17,9
	23/80	2	2,27	3,6	570	1,4

$$\frac{\sigma}{f} = \begin{cases} \frac{k \cdot \eta - \eta^2}{1 + (k - 2) \cdot \eta} & \text{mit } \eta \leq \frac{\epsilon_{ult}}{\epsilon_f} \\ 0 & \text{mit } \eta \geq \frac{\epsilon_{ult}}{\epsilon_f} \end{cases} \quad (1)$$

Mit:

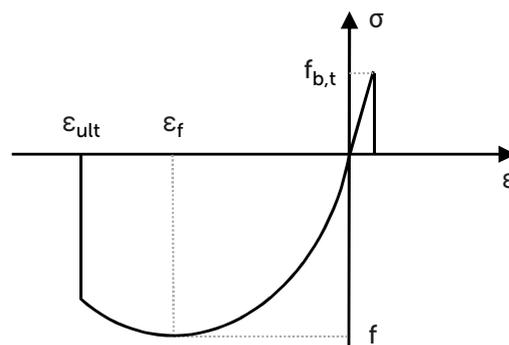
$$k \approx 1.05 \cdot E_{0,33} \cdot \frac{\epsilon_f}{f}$$

$$\eta = \epsilon / \epsilon_f$$

Das Zugverhalten der Mauerwerksblöcke wird mit einem linearen Verlauf und sprödem Nachbruchverhalten angenähert. Die angesetzte Zugfestigkeit entspricht hierbei der experimentell ermittelten Biegezugfestigkeit der Lehmsteine im jeweiligen Umgebungsklima. Da die Kontaktelemente in den Lagerfugen keine Zugfestigkeit aufweisen, determinieren sie jedoch die Biegezugfestigkeit des gesamten Modells.

In Tabelle 5 sind die Eingangsparameter für die Modellierung der Mauerwerksblöcke zusammengefasst. Bei der numerischen Analyse wird vereinfachend angenommen, dass die Bauteilfeuchte und somit auch die Festigkeits- und Verformungseigenschaften über die Wanddicke konstant sind.

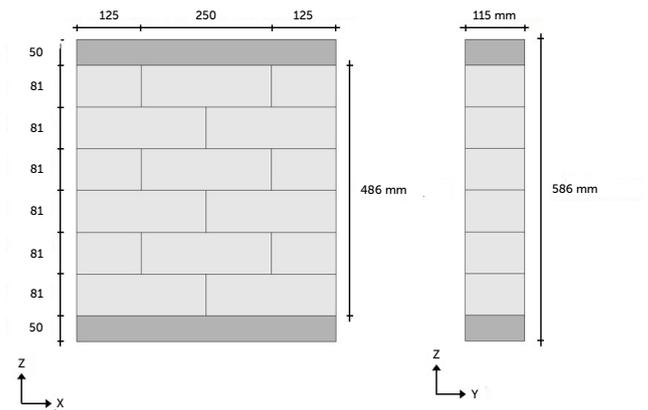
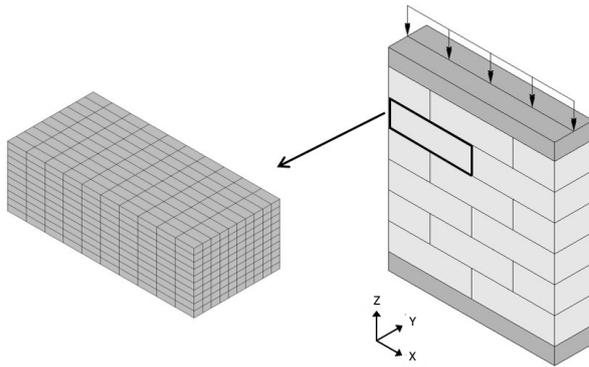
Zur Validierung des Modells werden in Abbildung 10 die numerisch erzeugten Spannungs-Dehnungs-Beziehungen unter zentrischer Druckbeanspruchung für eine relative Luftfeuchtigkeit von 50% und 80% den experimentell ermittelten Arbeitslinien gegenübergestellt. Es ist erkennbar, dass der nichtlineare Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Beziehung mit Hilfe des numerischen Modells gut angenähert werden kann. Weitere Informationen zur numerischen Modellbildung von Lehmmauerwerk sind in BRINKMANN et al. [17] zu finden.



09 Gesamtdehnungsrissmodell der Mauerwerksblöcke

Tabelle 5 Eingangswerte für die Modellierung

Prüfklima	f	f _{b,t}	E _{0,33}	ε _f	ε _{ult}
T/RLF [°C/%]	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	[%]	[%]
23/50	3,69	1,59	1527	5,08	6,06
23/80	2,47	1,17	1159	6,44	7,90



08 Geometrie des numerischen Modells

Tragfähigkeit von Lehmmauerwerk unter Feuchteinfluss

Mit Hilfe des numerischen Modells wird die Systemtragfähigkeit von Lehmmauerwerk unter Druckbeanspruchung bei 50% RLF sowie bei 80% RLF analysiert und gegenübergestellt. Hierbei wird sowohl die Schlankheit des Modells als auch die Exzentrizität der einwirkenden Drucknormalkraft variiert. Die Ergebnisse der Traglastanalysen sind in Abb. 11 dargestellt.

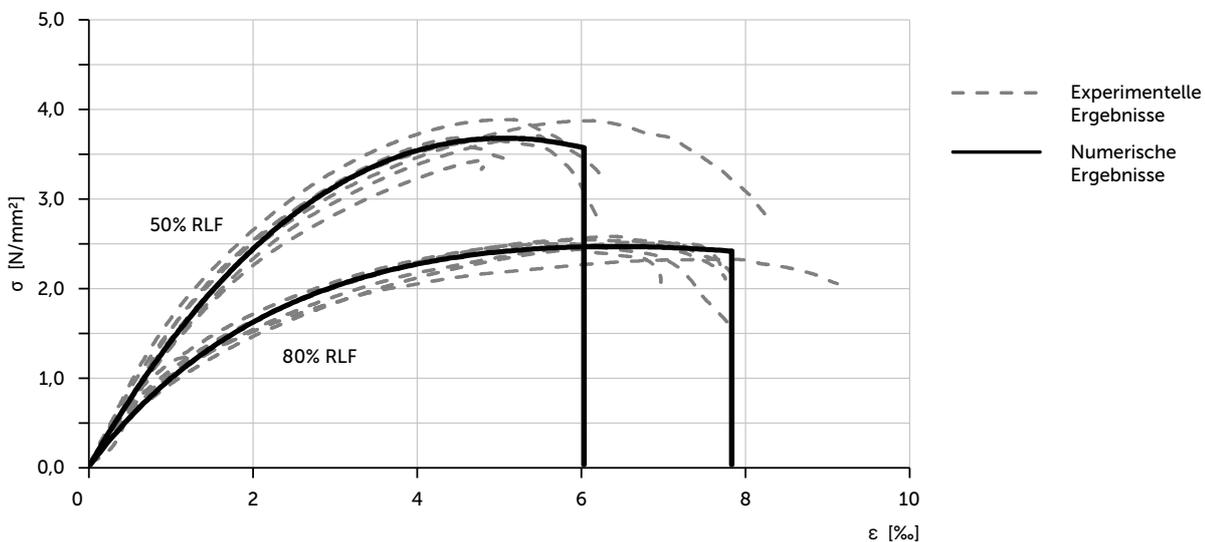
Es ist zu erkennen, dass sich die Tragfähigkeit von Lehmmauerwerk bei Erhöhung der RLF deutlich verringert. Da bei geringer Schlankheit im Allgemeinen Querschnittsversagen maßgebend wird, determiniert hier die Druckfestigkeit des Mauerwerks die maximal aufnehmbare Normalkraft. Auf Grund dessen reduziert sich die Traglast von gedrunenen Lehmmauerwerkswänden bei Anstieg der RLF von 50% auf 80% erwartungsgemäß um das Verhältnis der Druckfestigkeiten unter den jeweiligen Klimabedingungen in

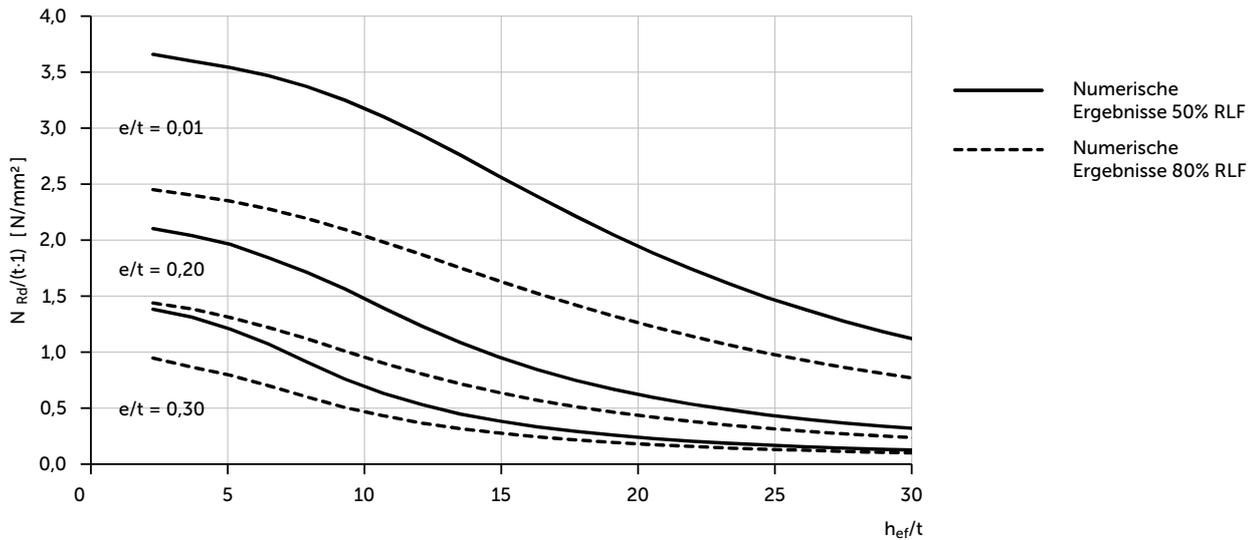
Höhe von $f_{80\%}/f_{50\%} = 0,67$. Wie in Abbildung 12 dargestellt ist, bleibt das Verhältnis $N_{Rd,80\%}/N_{Rd,50\%}$ jedoch auch bei größeren Schlankheiten nahezu konstant. Da die Traglast von Mauerwerk im Bereich des Stabilitätsversagens nicht mehr von der Druckfestigkeit, sondern vorrangig von der Steifigkeit des Mauerwerks abhängt, lässt dieser Effekt darauf schließen, dass sich die Steifigkeit von Lehmmauerwerk bei Erhöhung der Luftfeuchtigkeit in ähnlichem Maße reduziert wie die Druckfestigkeit. Dieser Sachverhalt kann zu einer deutlichen Vereinfachung bei der Erstellung feuchteabhängiger Bemessungsformeln führen, da die Reduzierung der Traglast bei erhöhter Luftfeuchtigkeit somit sowohl bei Querschnitts- als auch bei Stabilitätsversagen mit einem einheitlichen Faktor berücksichtigt werden kann.

Schlussfolgerungen und Ausblick

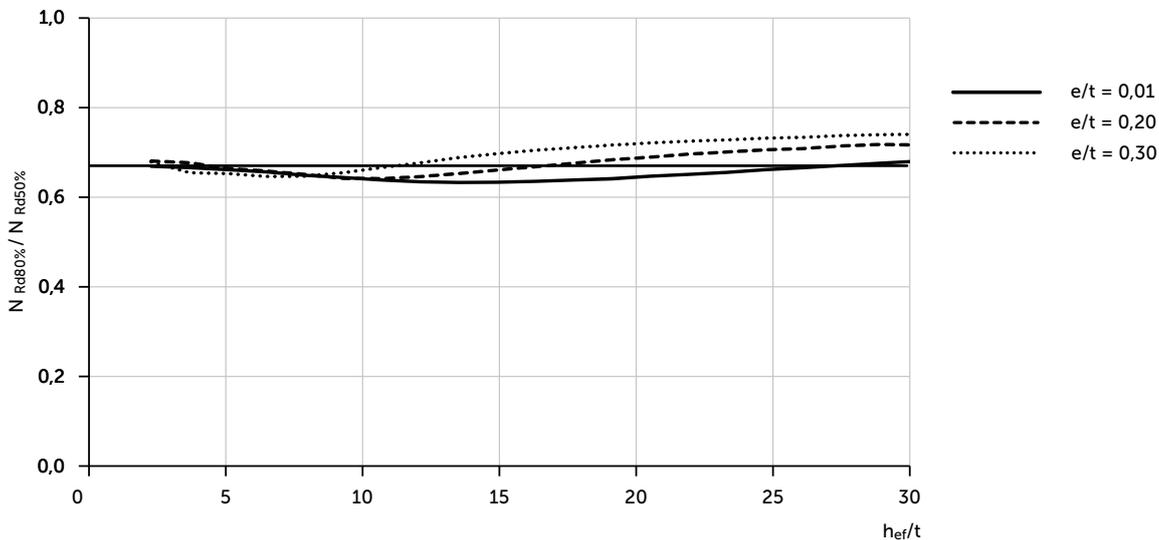
In diesem Beitrag wurden experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung der Festigkeits- und Ver-

10 Experimentelle und numerische Spannungs-Dehnungs-Beziehung unter zentrischer Druckbeanspruchung





11 Numerisch ermittelte Tragfähigkeit von Lehmmauerwerk unter exzentrischer Druckbeanspruchung bei 50% RLF und 80% RLF



12 Verhältnis der Traglast bei 80% RLF zur Traglast bei 50% RLF

formungseigenschaften von Lehmstoffen unter verschiedenen klimatischen Randbedingungen dargestellt. Hierbei wurde ersichtlich, dass Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul von Lehmmauerwerk und seinen Einzelkomponenten mit steigender relativer Luftfeuchtigkeit abnehmen. Eine Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit von 50 auf 80% führte bei den geprüften Lehmstoffen zu einer Abminderung der Druckfestigkeit von 25-35% sowie zu einer Abminderung des Elastizitätsmoduls von 25-45%. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass das aktuell gültige Normprüfverfahren für Lehmsteine ähnliche Ergebnisse wie das Prüfverfahren für herkömmliche Mauersteine nach DIN EN 772-1 [10] mit anschließender Umrechnung durch die dort festgelegten Formfaktoren liefert. Inwiefern die Formfaktoren für Lehmsteine tatsächlich valide Ergebnisse liefern, gilt es im Zuge weiterer Forschung zu klären. Vor dem Hinter-

grund einer möglichen Bemessung von Lehmmauerwerk nach DIN EN 1996-3/NA [4] erscheint es jedoch prinzipiell sinnvoll die Bestimmung der Druckfestigkeit für Lehmsteine an die im Mauerwerksbau üblichen Prüfvorschriften anzugleichen. Aufgrund des geringen Einflusses der Mörteldruckfestigkeit auf die Mauerwerksdruckfestigkeit kann weiterhin überlegt werden, ob die relativ eng abgestufte Einteilung der Mörteldruckfestigkeitsklassen nach DIN 18946 [3] zweckmäßig ist oder ob auch hier eine Angleichung an die Mörtelklassen gemäß DIN EN 998-2 [18] erfolgen sollte. Tragende Lehmmauermörtel weisen in der Regel Festigkeiten von 2,5 N/mm² bis 5 N/mm² auf und könnten somit den Mörtelklassen M 2,5 bzw. M 5 zugeordnet werden. Im Zuge der Bemessung von Lehmmauerwerk nach den vereinfachten Berechnungsmethoden gemäß DIN EN 1996-3/NA [4] genügt gegebenenfalls eine Mindestmörteldruckfes-

tigkeit in Höhe von $f \geq 2,5 \text{ N/mm}^2$ ohne wesentliche Verluste im Hinblick auf die Mauerwerksdruckfestigkeit in Kauf zu nehmen.

Um eine Analyse der Tragfähigkeit von Lehmmauerwerk unter verschiedenen klimatischen Bedingungen durchzuführen, wurde anhand der experimentell ermittelten Materialkennwerte ein numerisches Modell kalibriert. Die Traglast unter exzentrischer Druckbeanspruchung reduzierte sich bei 80% RLF auf ungefähr zwei Drittel der Traglast bei 50% RLF. Auffällig war, dass das Verhältnis $N_{Rd,80\%}/N_{Rd,50\%}$ nicht nur im Bereich des Querschnittversagens, sondern auch im Bereich des Stabilitätsversagens sowie bei variierender Exzentrizität ungefähr dem Verhältnis der Druckfestigkeiten $f_{80\%}/f_{50\%}$ entspricht. Dieser Sachverhalt lässt darauf schließen, dass sich die Steifigkeit von Lehmmauerwerk bei steigender RLF in ähnlichem Umfang verringert wie dessen Druckfestigkeit. Die bisher durchgeführten Untersuchungen fanden allerdings stets nach Konditionierung bis zur Massekonstanz statt, das heißt die Prüfkörper haben über den gesamten Querschnitt hinweg ihre Gleichgewichtsfeuchte erreicht. Je nach Klima und Prüfkörpervolumen dauerte dies bei den Mauerwerksprüfkörpern bis zu sieben Wochen. Im Anwendungsfall liegen in der Regel instationäre Klimabedingungen vor, die einen entsprechenden Gradienten der Feuchte über den Querschnitt zur Folge haben. Welche Bauteilfeuchten sich über den Jahresverlauf in Abhängigkeit des Wandaufbaus und der Anwendungssituation tatsächlich einstellen, wird im weiteren Verlauf des Forschungsprojekts durch Langzeitfeuchtemessungen an Lehmmauerwerk ermittelt.

Um weitere Erkenntnisse über das Tragverhalten von Lehmmauerwerk zu erlangen, werden im weiteren Projektverlauf experimentelle Untersuchungen bei verschiedenen Klimabedingungen an exzentrisch belasteten Lehmmauerwerkswänden unterschiedlicher Schlankheit durchgeführt. Darüber hinaus wird das Langzeitverhalten von Lehmmauerwerk in Form von Kriech- und Dauerstandprüfungen bei verschiedenen relativen Luftfeuchten untersucht.

Letztlich gilt es die Ergebnisse der unter stationären Bedingungen durchgeführten Laborversuche mit den am Anwendungsfall orientierten Feuchtemessungen unter realen Klimabedingungen zusammenzuführen, um Rückschlüsse auf das Tragverhalten bei instationären und zyklischen klimatischen Bedingungen zu

ermöglichen. Somit kann es schließlich gelingen den Einfluss der Feuchte auf die Tragfähigkeit von Lehmmauerwerk zu quantifizieren und innerhalb eines Bemessungskonzepts adäquat zu berücksichtigen.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde dankenswerter Weise im Rahmen des Forschungsprojektes "Schaffung von Bemessungsgrundlagen für Lehmmauerwerk auf Basis von DIN EN 1996-3/NA mittels experimenteller und numerischer Untersuchungen" durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert. Weiterhin danken wir den Firmen claytec e.K. und conluto® für die zur Verfügung gestellten Materialien und ihre Expertise sowie Christof Ziegert für seine stets hilfreichen Diskussionsbeiträge

Literatur

- [1] Volhard, F., Röhlen, U.: *Lehmbau Regeln: Begriffe – Baustoffe – Bauteile*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009.
- [2] DIN 18945: 2018-12. *Lehmsteine – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung*.
- [3] DIN 18946: 2018-12. *Lehmmauermörtel – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung*.
- [4] DIN 1996-3/NA: 2012-01. *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 3: Vereinfachte Berechnungsmethoden für unbewehrte Mauerwerksbauten*.
- [5] Bui, Q.-B. et al.: *Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth*. In: *Construction and Building Materials* 54, S. 163–169, 2014.
- [6] Champiré, F. et al.: *Impact of relative humidity on the mechanical behavior of compacted earth as a building material*. In: *Construction and Building Materials* 110, S. 70-78, 2016.
- [7] Müller, U. et al.: *Eigenschaften industrieller Lehmbauprodukte für den Mauerwerksbau und Verhalten von Lehmsteinmauerwerk*. In: *Mauerwerk* 16, S. 17-28, 2012.
- [8] Willems, W. M. (Hrsg.): *Lehrbuch der Bauphysik – Schall – Wärme – Feuchte – Licht – Brand – Klima*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.
- [9] 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*
- [10] DIN EN 772-1: 2011-07. *Prüfverfahren für Mauersteine – Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit*.
- [11] Schubert, P.: *Prüfverfahren für Mauerwerk, Mauersteine und Mauermörtel*. In: *Mauerwerk-Kalender* 16, Berlin [u.a]: Ernst & Sohn, S. 685 – 697, 1991.

- [12] DIN EN 1052-1: 1998-12. Prüfverfahren für Mauerwerk – Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit.
- [13] Müller, P. et al.: *Versuchsgestützte Kalibrierung von Teilsicherheitsbeiwerten im Lehmmauerwerksbau – Empfehlungen für die Erarbeitung eines Bemessungskonzepts*. In: Mauerwerk-Kalender 42, Berlin: Ernst & Sohn, S. 181–194, 2017.
- [14] Müller, P. et al.: Development of partial safety factors for earth block masonry. In: Materials and Structures 50, S. 1 – 14, 2017.
- [15] DIN 1996-1-1/NA: 2019-12. *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk*.
- [16] DIN EN 1992-1-1: 2011-01. *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*.
- [17] Brinkmann, M., Graubner, C.-A.: *Load-bearing capacity of slender earth masonry walls under compression*. 17th International Brick and Block Masonry Conference, 2020.
- [18] DIN EN 998-2: 2017-02. *Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau – Teil 2: Mauermörtel*.

Kontaktangaben

Web: www.massivbau.tu-darmstadt.de
www.bam.de

E-Mail: brinkmann@massivbau.tu-darmstadt.de
philipp.wiehle@bam.de