

Bestimmung der Druckfestigkeit von Lehmsteinmauerwerk – Simulation der materialspezifischen Querdehnungen

Die Dimensionierung der Prüfkörper nach den Lehmbauregeln, herausgegeben durch den Dachverband Lehm e.V., weicht von den Vorschlägen internationaler Normen ab. ([1],[2],[3],[4],[5]) Die nach deutscher, britischer und peruanischer Norm einzuhalten Mindestschlankheit für die Prüfung von Mauerwerk aus Lehmstein oder Ziegel beträgt 3. Die Lehmbauregeln empfehlen eine Schlankheit von 1.

Druckversuche von Lehmsteinmauerwerk

Zur Simulation der materialspezifischen Querdehnung wurden Druckprüfungen durchgeführt an Prüfkörpern aus Lehmsteinmauerwerk in unterschiedlichen Schlankheiten und Fugenmaterialien. Für verschiedene Normen wurden entsprechend proportionierte Prüfkörper erstellt. Mit diesen wurden die der jeweiligen Norm entsprechenden Tests durchgeführt. (Tabelle 1)

Die in der Druckprüfung ermittelte Druckfestigkeit wird durch den Versuchsaufbau maßgeblich beeinflusst. Wird die Druckprüfung, wie im vorliegenden Fall, mit starren Prüfplatten durchgeführt, erzeugt die Reibung zwischen Platte und Prüfkörper einen zweiachsigen Spannungszustand. Infolge dessen wird beim gedungenen Prüfkörper die größere Bruchkraft gemessen.

Der Einfluss der Querdehnungsbehinderung wird von der Höhe und Länge des Probekörpers bestimmt. Bei einer Ausbreitung der Querdehnungsbehinderung von 45° ist der Einfluss der starren Prüfplatten für Schlankheiten ab $H/L > 2$ vernachlässigbar.¹ Die Versuchsanordnung wurde entsprechend gewählt.

Die Anordnung der Setz- und Lagerfugen führt bei Lehmsteinmauerwerk mit Lehmsteinmörtel nicht zu Spannungumlagerungen zwischen Stein und Fuge. Im Gegensatz zum Ziegelmauerwerk, bei dem die weichen Lagerfugen sich zwischen den Steinen herausdrücken und zusätzliche Querspannungen in den Steinen verursachen, entsteht aus Lehmsteinen vermörtelt in Lehmörtel ein monolithischer Baustoff. Durch das Vermauern von Lehmsteinen in Zementmörtel wird die Spannungumlagerung im Vergleich zum Ziegelmauerwerk umgekehrt. Der steife Zementmörtel nimmt zusätzliche Querspannung auf und entlastet den Stein. Ob eine höhere Druckfestigkeit erreicht wird, ist abhängig von der Dimension der Steine und der Fugen, sowie deren Querspannungen und Elastizitätsmodulen².

Die maximale Druckspannung wurde berechnet (*0.1). Der Elastizitätsmodul wurde als Sekantenmodul (*0.2) zwischen 1/20 und 1/3 und als Tangentenmodul bei 1/3 der mittleren maximalen Festigkeit bestimmt. Bei 7 Versuchen (Versuchsreihen 2, 3 und 5) wurde die Querdehnung gemessen, und die Querspannung μ ermittelt.

$$f = \frac{\max f}{A} \quad (*0.1)$$

mit $\max f$ = im Versuch ermittelte Höchstkraft

$$E_s = \frac{17 \cdot f \cdot (\epsilon_3 - \epsilon_{20})}{60} \quad (*0.2)$$

mit ϵ_3 und ϵ_{20} als Dehnungen bei 1/3 bzw. 1/20 der ermittelten Höchstkraft.

Die Druckfestigkeiten, ermittelt mit Prüfkörpern nach ADOBE 2000, der DIN 18554, T1 und RILEM (Versuchsreihe 2, 3, 4 und 5), ergeben die gleiche Festigkeit. Ein Unterschied in der Versuchskörperlänge zwischen einem und zwei Steinen wirkt sich nicht auf die Druckfestigkeit aus. Die mittlere Druckfestigkeit beträgt 2,14 N/mm².

Die bei Versuchsreihe 2 erwarteten höheren Druckfestigkeiten beim Einsatz der Zementmörtelfuge stellen sich nicht ein. Unterschiede sind ausschließlich bei der Rissbildung festzustellen. Bei der Messung der Querdehnung wird offensichtlich, dass die einen Stein langen Prüfkörper mit Fugen aus Lehmörtel vor dem Bruch bei ca. 50% der maximalen Druckfestigkeit den ersten Riss entlang der Setzfuge, quer zur Mauer, aufweisen (Abbildung 1). Die Prüfkörper mit Fugen aus Zementmörtel weisen diese Rissbildung nicht auf. Es lässt sich schlussfolgern, dass der Zementmörtel die Querspannungen aufnimmt⁶. Im Bruchzustand bleiben die Querspannungen im Stein trotz allem maßgebend für das Mauerwerksversagen.⁷

Bei Versuchsreihe 4, dem zwei Steine langen Versuchskörper, tritt plötzliches Versagen durch vertikalen Bruch in Längsrichtung ein (Abbildung 1, links). Der längere Probekörper lässt weniger Verformungen in Längsrichtung zu. Das Versagen ist typisch für eine Mauer. Die Mauer wird durch den plötzlichen Bruch gespalten.

Establishing compressive strength in clay block construction – simulation of the material-specific lateral stretching

The dimensioning of test samples according to the Lehmbau Regeln, published by the Dachverband Lehm e.V., differs from the recommendations of international norms. ([1], [2], [3], [4], [5]) The minimum slenderness ratio for testing clay block and brick walls, that has to be met according to German, British and Peruvian norms, is 3. The Lehmbau Regeln recommend a slenderness ratio of 1.

Pressure tests on clay block walls

For the simulation of material-specific lateral stretching, pressure tests are carried out on test samples of clay blockwork with varying slenderness ratios and joint materials.

For the various norms, suitably proportioned test samples are constructed. Appropriate tests are carried out on these according to respective norms. (Table 1)

The compressive strength ascertained in the pressure test is considerably influenced by the structure of the test. If the pressure test is carried out, as in the present case, with rigid pressure plates, the friction between plate and test sample creates a bi-axial tension situation. As a result of this, a greater breaking force is measured with stouter test samples.

The effect of hindrance to lateral stretching is dependent on the height and length of the test sample. With the lateral stretching hindrance spreading out at 45°, the influence of the rigid test plates on slenderness ratios where $H/L > 2$ is negligible.¹ The test criteria are chosen accordingly.

With clay blockwork and clay mortar, the configuration of the vertical and horizontal joints does not lead to a transposition of tension between block and joint. Contrary to brickwork, in which the soft horizontal joints are squeezed out from between the bricks causing additional lateral tension, clay blocks laid in clay mortar form a monolithic material. With clay blocks laid in cement mortar, the transposition of tension is reversed by comparison with brickwork. The unyielding cement mortar absorbs additional lateral tension and relieves the block. Whether a higher compressive strength is achieved is dependent on the dimensions of the blocks and joints, as well as their lateral resistance and modulus of elasticity².

The maximum compressive strain is calculated (*0.1). The modulus of elasticity as secant modulus (*0.2) is ascertained at between 1/20 and 1/3 and the tangent modulus at 1/3 of the mid maximum strength. In 7 tests (test series 2, 3 and 5) the lateral expansion is measured and the Poisson value μ is established.

$$f = \frac{\max f}{A} \quad (*0.1)$$

where $\max f$ is highest strength established in test

$$E_s = \frac{17 \cdot f \cdot (\varepsilon_3 - \varepsilon_{20})}{60} \quad (*0.2)$$

where ε_3 and ε_{20} are the expansion at 1/3 or alternatively 1/20 of the established highest strength. Compressive strengths, established with test samples in accordance with ADOBE 2000, DIN 18554, T1 and RILEM (test series 2, 3, 4 and 5), produce the same consistency. A difference in the length of the one-block and two-block test samples has no effect on the compressive strength. The medium compressive strength is 2.14 N/mm².

The higher compressive strength expected in test series 2 using cement mortar joints does not occur. Differences are only discerned in the formation of cracks. When measuring the lateral expansion, it is noted that the one block long test sample with clay mortar joints displayed the first crack along the vertical joint through the wall before the fracture, at about 50% of the maximum compressive strength (Fig. 1). The test sample with cement mortar joints showed no cracking. It can therefore be deduced that the cement mortar absorbs the lateral forces⁶. In the fractured state, the lateral stresses in the block are contained in the block in spite of all expectations for masonry failure.⁷

In test series 4, with the two block long test sample, sudden failure occurs through a vertical break along the length of the wall (Fig. 1 left). The longer sample permits less longitudinal distortion. This failure is typical for a wall. The wall is split by a sudden break.

The requirement of the modulus of elasticity, according to masonry norm as secant modulus at 1/3 compression strength, cannot be applied to clay blockwork. Hand formed and air-dried clay test samples display different stress expansion patterns in



Die Bestimmung des E-Moduls nach Mauerwerksnorm als Sekantenmodul bei $1/3$ der Druckfestigkeit ist für Lehm-mauerwerk nicht anzuwenden. Handgeformte und luftgetrocknete Probekörper aus Lehm, die nicht vorbelastet wurden, zeigen je nach Probekörper unterschiedliche Spannungs-Dehnungsverläufe im Anfangsbereich auf. Der Lehm-baustoff verdichtet sich. Eine Übereinstimmung der Steigung im Spannungs-Dehnungsverlauf stellt sich ab ca. $1/3$ der maximalen Druckfestigkeit ein.

Die Querdehnung war bei den Versuchsreihen 2 und 3 sehr gering. Die Querdehnzahl lag zwischen 0,001 und 0,05. Nach Entlastung und erneuter Belastung, siehe Versuch 5-1, wurde eine erhöhte Querdehnung festgestellt. Diese variierte in Abhängigkeit von der Last zwischen 0,12 und 0,28. Das dazugehörige Elastizitätsmodul verdoppelte sich in dieser Versuchsreihe gegenüber den Reihen 2 und 3. Erneute Be- und Entlastung wirkt sich nicht auf das Elastizitätsmodul und die Querdehnung aus. Durch die Be- und Entlastung wird deutlich, dass sich das Lehmstein-mauerwerk bei Lastaufnahme verdichtet, dann je nach Grad der Verdichtung elastische Materialeigenschaften entwickelt. Die Spannungsdehnungskurve beinhaltet daher einen plastischen und einen elastischen Anteil. Nach 10% Stauchung versagt das Material. Der Elastizitätsmodul, bestimmt aus dem idealisierten Spannungs-Dehnungsverlauf, beträgt im Mittel 315 N/mm^2 . Wird nur der elastische Anteil betrachtet, ergibt sich der E-Modul zu $E_{el} = 950 \text{ N/mm}^2$. Die Querdehnung ist für den Anteil der elastischen Verformung zu bestimmen. Sie beträgt zwischen 0,12 im unteren Lastbereich und 0,28 im mittleren Lastbereich.

Die Spannungsermittlung mit der Finiten-Elemente-Methode⁸ erfolgt unter Anwendung der Software Sofistik. Simuliert wird die Spannungumlagerung zwischen Stein und Fuge und die Behinderung der Querdehnung durch die starren Probekörperplatten.

Verglichen werden die für den Bruch verantwortlichen Querkzugspannungen bei einer mittleren Druckspannung von $2,0 \text{ N/mm}^2$.

Der Einfluss der starren Prüfplatten auf die durchgeführten Versuche wird durch eine starre Lagerung der Probekörper bei der Simulation abgebildet. Für diese Untersuchung werden die Probekörper der Versuchsreihen 1 und 3 nachgebildet. Gegenübergestellt wird ein Probekörper in verschieblicher Lagerung.

Die Spannungen in Querrichtung der Probekörper nach Versuchsreihe 1 und 3 zeigen Druckspannungen im Lasteinleitungs-bereich, die sich erst nach einer Steinlage abbauen. Der Probekörper mit verschieblicher Lagerung zeigt Querkzugspannungen über die gesamte Höhe (Abbildung 3 Mitte).

Die Untersuchung zeigt gem. Abbildung 3, dass Probekörper der Schlankheit $\lambda=1$ keine, bzw. nur eine sehr geringe Querkzugspannung aufweisen. Dies führt zu einer zu hohen Abschätzung der Druckfestigkeit. Bei Probekörpern der Schlankheit 3 baut sich die Querkzugspannung aus starrer Lagerung nach der ersten Steinlage ab. Im mittleren Bereich des Probekörpers entsprechen die Querkzugspannungen denen eines ungestörten Probekörpers. Der Einfluss der starren Druckplatten wirkt sich auf diesen Probekörper nicht aus. Die Probekörperschlankheit sollte somit mindestens $\lambda=3$ betragen.

Die Interaktion zwischen Lehmstein und Fuge wird im Vergleich von Lehmmörtel zu Zementmörtel untersucht. Es werden die Probekörper der Versuchsreihen 2 und 3 nachgebildet.

Die Probekörperschlankheit von 3 sollte gewählt werden, um den Einfluss der Querdehnungsbehinderung zu minimieren.

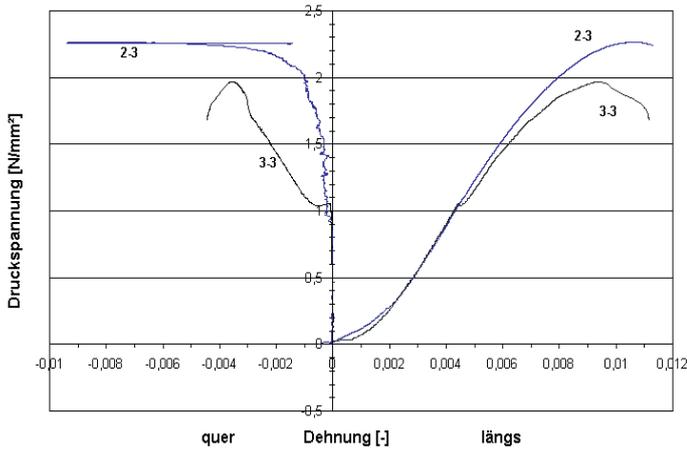
	E [N/mm ²]	μ [-]	f_t [N/mm ²]
Lehmstein	950	0,15	0,2
Lehmmörtel	1.050	0,15	0,2
Zementmörtel (GK IIA)	8.000	0,2	1,0

TABELLE 2: Materialkennwerte der FE-Analyse

Der Vergleich der Proben mit Lehmsteinmörtel und Zementmörtel zeigt, dass der Zementmörtel im Vergleich zum Lehmmörtel die 200-fache Querkzugspannung aufweist. Der weichere Lehmstein zieht die Zementmörtelfuge auseinander. Nach dem Riss der Fuge ist die Bruchspannung des Steins maßgeblich für das Versagen.

Als Resultat ist festzuhalten, dass die Feststellung der Druckfestigkeit für Lehmstein-mauerwerk nicht nach Lehmbauregeln erfolgen darf. Der Probekörper muß eine Mindestschlankheit von 3 aufweisen.

1 Bruchfigur nach Druckversuchen; Reihe 4 (links) und Reihe 3 (mittig, rechts)
Break pattern after pressure test; Series 4 (left) and Series 3 (centre, right)



the initial stages, according to test sample. The clay material becomes denser. A correspondence of the increase in the tension-expansion process occurs at ca 1/3 of the maximum compression strength.

The lateral expansion in test series 2 and 3 is very low. The lateral reciprocal value lies between 0.001 and 0.05. After removing and reapplying the load, see test 5-1, a higher lateral expansion is observed. This varies according to load between 0.12 and 0.28. The accompanying modulus of elasticity doubles in this test series compared with series 2 and 3. Repeating the load-off/load-on sequence has no effect on the modulus of elasticity and the lateral expansion.

By removing and reapplying the load it becomes clear, that clay blockwork becomes denser when load is applied and then, depending on the degree of compression, develops elastic material characteristics.

The tension-expansion curve therefore contains a ductile and an elastic element. After a 10‰ deformation, the material fails. The medium modulus of elasticity, defined by an idealised tension-expansion process, is 315 N/mm². When only the elastic element is observed, the E-modulus is $E_{el} = 950 \text{ N/mm}^2$. The lateral expansion for the elastic element has to be determined. It lies between 0.12 at the lower load level and 0.28 at middle load level.

Proof of the Test

The ascertainment of the tension using the Finiten-Elemente method⁸ is done using the software Sofistik. This simulates the transposition of tension between block and joint and the interference with lateral expansion caused by the rigid sample test plates.

The lateral tensile stress responsible for the fracture is compared at a middle compressive pressure of 2.0 N/mm².

	E [N/mm²]	μ [-]	f _t [N/mm²]
Clay block	950	0,15	0,2
Clay mortar	1.050	0,15	0,2
Cement mortar (GK IIA)	8.000	0,2	1,0

TABLE 2: Material values of the FE-Analysis

The influence of the rigid pressure plates on the performed test is portrayed with the test sample on a rigid bed. For this experiment, the test samples in the series 1 and 3 tests are reproduced. These are compared with a test sample on a sliding bed.

The lateral tensions in the samples in test series 1 and 3 show compressive strain in the area of load application, which only diminishes after one course of blocks. The test sample with sliding bed shows lateral tensions over the whole height (Fig. 3 centre).

The investigation shows in Fig. 3, that test samples with a slenderness of $\lambda=1$ show only very little lateral tensile stress or none at all. This leads to a higher estimation of the compressive strength. In test samples with a slenderness of 3, the lateral compressive strain from a rigid bed diminishes after the first course of blocks. In the middle area of the test sample, the lateral tensile stresses correspond to those of an undisturbed test sample. The rigid pressure plate has no influence on this test sample. Thus the slenderness of the test sample should be at least $\lambda=3$.

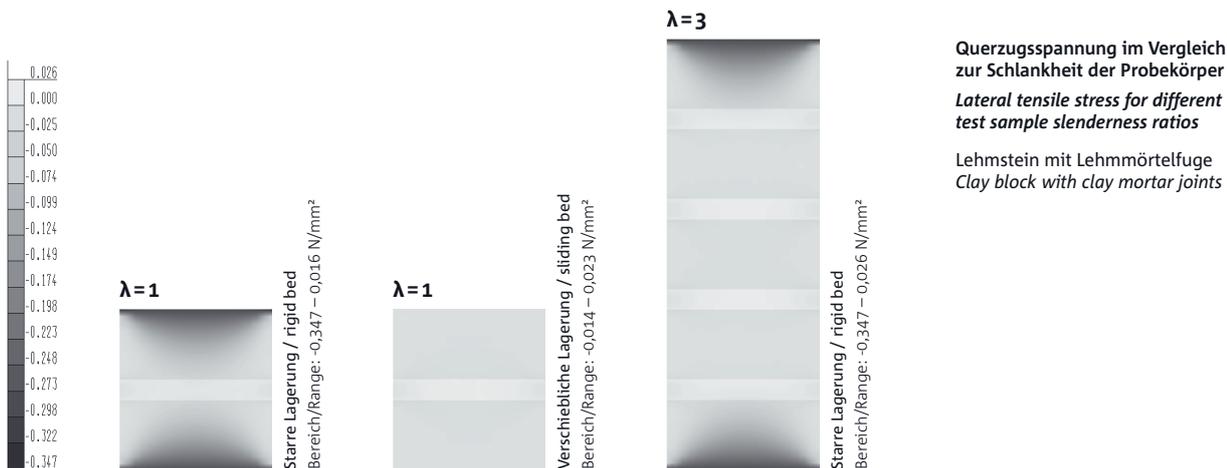
The interaction between clay block and joints with clay mortar is examined in comparison with cement mortar. The test samples in series 2 and 3 are reproduced.

A slenderness of 3 should be adopted for the test sample, so that the influence of hindrance to lateral expansion is minimised.

Comparison of the tests with clay mortar and cement mortar shows that cement mortar exhibits 200 times the lateral tensile stress of clay mortar. The softer clay block pulls the cement joint apart. Once the joint cracks, the breaking tension governs the failure.

The consequence to be recorded here is that the ascertainment of compressive strength in clay blockwork cannot be based on the rules for building in clay. The test samples must have a minimum slenderness of 3.

2 Spannungs- Dehnungsverlauf der Längs- und Querdehnungen für Versuch (1-3) und (2-3)
Tension-expansion course of the longitudinal and cross expansion in tests (1-3) and (2-3)



Fussnoten

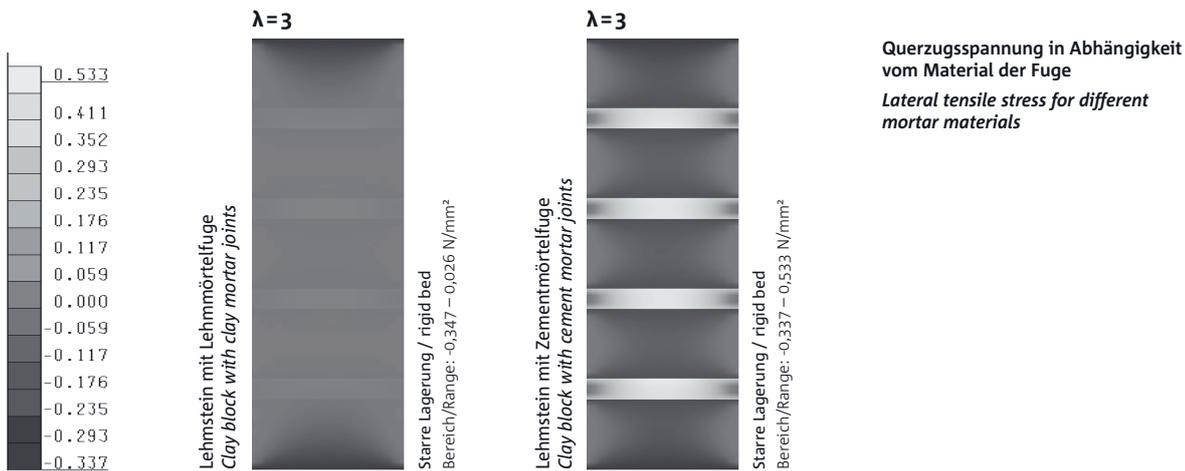
- 1 Annahme für Mauerwerk nach ERNST (Bewehrtes Mauerwerk 1997)
- 2 In Analogie zu Theorien für Ziegelmauerwerk.
- 3 Die Prüfkörper sind im Maßstab 1:2 im Verhältnis zu traditionellem mexikanischen Lehmsteinmauerwerk erstellt. Die Steine sind mit Molden der Abmessung 200×100×50mm³ manuell erstellt. Der zur Verfügung stehende fette Lehm wurde zur Herstellung der Steinmasse mit 25 Vol. % Sand abgemagert und mit 2,5% Masse % Stroh stabilisiert. Zur Herstellung der Mörtelmasse wurde fetter Lehm mit Vol. 50% Sand abgemagert. Die Trocknung fand im Labor bei Innenraumklima statt. Die liegende Trocknung der Steine betrug 7 Tage, die sich anschließende stehende Trocknung nochmals 14 Tage. Der Prüfkörper aus Lehmsteinmauerwerk trocknete 28 Tage im gleichen Klima.
- 4 Um die Ungenauigkeiten, entstanden durch den Produktionsprozess der Steine, auszugleichen, wurde jeder Prüfkörper vor dem Test vermessen. Die Lasteinleitung erfolgte gleichmäßig und vollflächig über starre Stahlplatten auf die begradigten Seiten des Prüfkörpers. Die Last wurde mit konstanter Geschwindigkeit verformungsgesteuert aufgebracht. Die Messung erfolgte elektronisch durch Kraftmessdose und induktiven Wegaufnehmer.
- 5 Versuch, der mit einer Lastschleife in Form einer Vorbelastung durchgeführt wurde.
- 6 Diese Beobachtung steht im Gegensatz zum Versagensmechanismus von genormtem Ziegelmauerwerk. Bei Ziegelmauerwerk quillt der weiche Mörtel zwischen den härten Steinen hervor und vergrößert die Querzugspannungen im Stein.
- 7 Geringe Unterschiede der Druckfestigkeiten sind bei einer Probenmenge von 3 Proben nicht nachzuweisen.
- 8 Die Spannungsverteilung im Probekörper wird über einen Ausschnitt modelliert. Es wird eine Scheibe in Richtung der kürzeren Abmessung des Probekörpers herausgenommen und mit Schalenelementen abgebildet. Die Steine sind mit 20 Elementreihen und die Fuge mit 6 Elementreihen abgebildet. Die Materialkennwerte sind entsprechend Tabelle 2 gewählt und bilden das Materialverhalten kurz vor dem Bruch ab. Der Betrachtung liegt ein linearelastischer Materialansatz zugrunde. Der plastische Anteil der Verformung, der Eigenschaften von Verdichtung aufweist, bleibt unberücksichtigt aufgrund der Annahme, dass aus der Verdichtung keine Querdehnung entsteht, die relevante Querzugspannung erzeugt. Der elastische Anteil der Verformungen gibt die relevanten Materialeigenschaften für die Untersuchung wider.

Nr.	Versuchsaufbau / Test method ^{3,4} (h = height, b = width, t = depth)	max f*	f*	E _s *	E _s *	E _T *
1-1	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>h=115</p> </div> <div style="text-align: center;"> </div> </div>	3,10	3,08	227	190	281
1-2		3,16		183		
1-3		t=100 b=200		3,00		
2-1		2,05	2,16	339	286	386
2-2		2,18		287		
2-3		2,26		243		
3-1	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>h=310</p> </div> <div style="text-align: center;"> </div> </div>	2,23	2,14	284	286	386
3-2		1,96		286		
3-3		2,24		278		
5-15	t=100 b=200	2,06		630, μ=0,02		950, μ=0,12
4-1	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>h=300</p> </div> <div style="text-align: center;"> </div> </div>	2,14	2,14	98	155	195
4-2		2,15		140		
4-3		t=100 b=~400		2,13		

TABELLE 1: Versuchsaufbau und Ergebnisse der Druckversuche / Testing method and results of the compression experiments

* N/mm²

3 Querzugspannungen in N/mm² im Vergleich zur Schlankheit der Probekörper
Lateral tensile stress in N/mm² compared with the slenderness of the test sample



Footnotes

- 1 Approval of Brickwork according to ERNST (Bewehrtes Mauerwerk 1997)
- 2 In: Analogie zu Theorien für Ziegelmauerwerk
- 3 The test samples are constructed in 1:2 scale relationship to traditional Mexican clay blockwork. The blocks are formed manually in moulds measuring 200×100×50 mm³. The rich clay available for the tests is made leaner for the production of the block mass with 25 Vol.% sand and stabilised with 2.5% straw mass. For the production of the mortar mass, the rich clay was leaned down with Vol.50% sand. Drying took place in the internal laboratory climate. The blocks are dried lying down for 7 days, after which they are dried on end for a further 14 days. The test sample of clay blockwork is dried for 28 days in a constant climate.
- 4 To compensate for inaccuracies that arise in the production process of the blocks, each test sample is measured before testing. The load is applied at a constant rate and over the total area by rigid steel plates on the levelled surface of the test sample. The load is applied at a steady rate governed by the deformation. Measurement is done electronically by load cell and inductive distance sensor.
- 5 Test carried out with a load cycle in pre-stressed form.
- 6 This observation contradicts the failure mechanism of normal brickwork. In brickwork, the soft mortar squeezes out from between the hard bricks and increases the lateral tensile stress in the brick.
- 7 Small differences in compressive strength are not demonstrated in a test series comprising 3 tests.
- 8 The stress distribution in the test sample is modelled using a cross-section. A slice is taken from across the shortest dimension of the test sample and shown with shell elements. The blocks are shown in rows of 20 elements and the joints in rows of 6 elements. The material values are selected in accordance with Table 2 and illustrate the behaviour of the material shortly before the break. The observation is based on a linear material bed. The pliable part of the distortion that shows the nature of the compression is not taken into account, on the assumption that no lateral expansion occurs as a result of the compression that will cause relevant lateral tension. The elastic element of the deformation reproduces the relevant material behaviour for the experiment.

Literature

- [1] Röhlen, Ulrich; Volhard, Franz; Lehm bau Regeln, Vieweg Verlag, 1998
- [2] Heinz G. Sieber; Baustoff Lehm, C.F. Müller Verlag, 1949, 2nd edition 1994
- [3] ADOBE, Reglamento nacional de construcciones, Norma tecnica de edificacion nte e. 080, Lima, Peru, 2000
- [4] DIN 18554-1, 1985-12, Prüfung von Mauerwerk; Ermittlung der Druckfestigkeit und des Elastizitätsmoduls
- [5] RILEM, technical recommendations for the testing and use of construction materials, 1994; LUMB1
- [6] Ernst, Matthias, "Untersuchung zum Tragverhalten von bewehrtem Mauerwerk aus Hochlochziegeln", Forschungsberichte VDI, series 4: Bauingenieurwesen Nr.137, 1997