

A Baustoffe ■ Bauprodukte

- I **Eigenschaften von Mauersteinen, Mauermörtel, Mauerwerk und Putzen 3**
Wolfgang Brameshuber, Aachen
- II **Mauerwerksbau mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung 35**
Wolfram Jäger, Dresden und Roland Hirsch, Berlin
- III **Instandsetzung verwitterter Natursteinoberflächen an historischen Bauwerken 63**
Heiner Siedel, Dresden
- IV **Mineralische Mörtel und Putze zur Sanierung historischer Mauerwerksbauten 107**
Petra Egloffstein, Mainz

I Eigenschaften von Mauersteinen, Mauermörtel, Mauerwerk und Putzen

Wolfgang Brameshuber, Aachen

1 Allgemeines

Dieses Kapitel des Mauerwerk-Kalenders wird als ständiger Beitrag jährlich aktualisiert. Der Verfasser würde sich über Hinweise, z. B. über fehlende wesentliche Literaturangaben etc., sehr freuen und diese im folgenden Jahrgang gern aufnehmen.

Im Zuge der Ablösung der nationalen Bemessungsnorm DIN 1053-1 [1] durch den EC 6 [2] führen die Rechenansätze zur Bemessung von Mauerwerk insofern eine Veränderung herbei, dass auch europäische Steine und Mörtel mit teilweise anderen Eigenschaften ihr Einsatzgebiet in Deutschland finden. Daher sind die überwiegend deutschen Ausgangsstoffe und das daraus erstellte Mauerwerk mit den erzielten Eigenschaften in diesem Beitrag zusammengestellt, der somit die direkte Möglichkeit eines Vergleichs mit Materialien anderer Länder gibt.

Die hier aufgeführten Eigenschaftswerte beziehen sich auf das tatsächliche Verhalten von Mauerstein, Mauermörtel und Mauerwerk, womit deutlich wird, dass aufgrund der vielfältigen Materialien und Kombinationen eine große Bandbreite von Eigenschaften entsteht. Anforderungen aus Normen und allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen sind Mindesteigenschaften. Die hier genannten Eigenschaftswerte gehen über Normanforderungen hinaus und sollen bei gesonderten Fragestellungen helfen, eine fachlich fundierte Antwort zu finden, wie z. B. bei der Beurteilung der Rissicherheit von Mauerwerk (Gebrauchstauglichkeitsnachweis), bei einer Schadensdiagnose oder aber bei genaueren Nachweisen für die Tragfähigkeit bestehender Bauwerke. In Grenzfällen kann ein ingenieurmäßig überdachter Ansatz geeigneter Kennwerte zusätzliche Sicherheit bieten.

Die Zusammenstellung der Eigenschaftskennwerte bezieht sich in einigen Fällen auf frühere Beiträge des Mauerwerk-Kalenders. In anderen Fällen wurde eine Aktualisierung vorgenommen. Der Bezug bei einer unveränderten Datenlage ist dann der Artikel aus dem Mauerwerk-Kalender 2010 [3]. Der Abschnitt 5.1 wurde grundlegend überarbeitet und stellt nun den gegenwärtigen Stand nach Eurocode 6 samt nationalen Anhängen dar. Die Abschnitte 6 bis 8 wurden unverändert aus [3] übernommen.

2 Eigenschaftskennwerte von Mauersteinen

2.1 Festigkeitseigenschaften

2.1.1 Längsdruckfestigkeit

Die Längsdruckfestigkeit von Mauersteinen wird überall dort benötigt, wo eine Biegebeanspruchung in Wandebene erfolgt, so z. B. bei Wänden auf sich durchbiegenden Decken oder Stürzen mit Übermauerung. Gemäß [3] ergibt sich nach Auswertung der Literatur [4–6] folgendes Bild: Für Hochlochziegel lässt sich kein Zusammenhang zwischen dem Nennwert der Steindruckfestigkeit und der Längsdruckfestigkeit angeben, unabhängig vom Lochanteil, genauso wenig für Leichtbeton. Dies hat im Wesentlichen den Einfluss der Loch-/Steganordnung als Ursache. Im Einzelfall wird empfohlen, den Nachweis experimentell zu führen. Für Vollsteine und Kalksandlochsteine ergibt sich nach [3] ein durchaus verwertbarer Zusammenhang. Für Mauerziegel, Kalksand-, Voll- und Lochsteine ist das Verhältnis Längsdruck-/Mauersteindruckfestigkeit von der Steindruckfestigkeit weitgehend unabhängig. Der Unterschied zwischen Längsdruck-/Normdruckfestigkeit bei Vollsteinen entsteht zum einen dadurch, dass die Normdruckfestigkeit durch Umrechnung der Prüfwerte mittels Formfaktoren ermittelt und für die Längsdruckfestigkeit der Prüfwert ohne Formfaktor gewählt wurde. Zum anderen ist eine produktionsbedingte leichte Anisotropie möglich. Für Porenbeton ergibt sich eine Abnahme des Druckfestigkeitsverhältnisses gemäß dem Zusammenhang $\beta_{D,st,l}/\beta_{D,st} = 0,91 - 0,04 \beta_{D,st}$ [3]. Auch hier ist ein Teil auf die Umrechnung mit Formfaktoren zurückzuführen, aber auch auf eine leichte Anisotropie durch den Herstellprozess. In den Bildern 1 a bis 1 d sind für verschiedene Steinsorten die Verhältnisse $\beta_{D,st,l}/\beta_{D,st}$ in Abhängigkeit von der Normdruckfestigkeit $\beta_{D,st}$ aufgetragen. Tabelle 1 gibt eine Zusammenfassung des derzeitigen Stands der Literatur wieder.

2.1.2 Zugfestigkeiten

Für Mauerwerk mit Dickbettfuge (Normal- und Leichtmörtel) ist bei Druckbeanspruchung senkrecht zur Lagerfuge bei bestimmten Verhältnissen Stein-/Mörtel-druckfestigkeit wegen des entstehenden mehraxialen Spannungszustandes die Zugfestigkeit der Mauersteine

Tabelle 1. Verhältniswerte Steinlängs- $(\beta_{D,st,l})$ /Normdruckfestigkeit $(\beta_{D,st})$, aus [3]

Mauerstein	n	$\beta_{D,st}$ Wertebereich N/mm ²	$\beta_{D,st,l}/\beta_{D,st}$		
			\bar{x}	min x	max x
Mz	2	21,9/22,7	0,67	0,64	0,70
HLz ¹⁾	5	20...47	0,23	0,12	0,33
HLz ²⁾	37	7, 4...26	0,18	0,05	0,39
KS	8	24,1...36,8	0,59	0,32	0,75
KS L	7	8,9...26,9	0,40	0,32	0,56
V	5	4,1...23,1	0,75	0,61	0,83
Vbl	5	2,7...3,6	0,90	0,36	1,13
Hbl	12	2,5...7,9	0,61	0,35	0,81
Hbn	1	15,8	0,46	–	–
PB, PP	15	2,3...9,4	0,70	0,50	0,92

n Anzahl der Versuchsserien

\bar{x} Mittelwert

min x; max x = Kleinst-, Größtwert

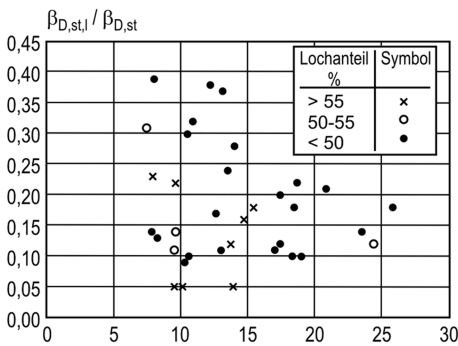
1) Trockenrohdichte $\rho_d > 1,0$ kg/dm³

2) $\rho_d \leq 1,0$ kg/dm³

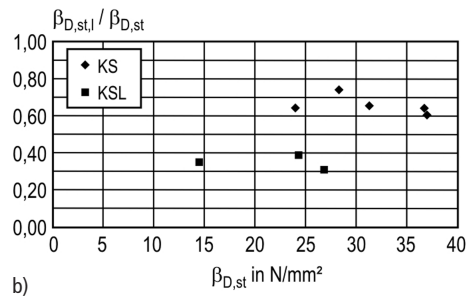
eine für die Druckfestigkeit von Mauerwerk maßgebende Größe. Für die Schubtragfähigkeit und die Biegezugfestigkeit in Wandebene kann die Steinzugfestigkeit maßgebend werden. Es ist daher sehr hilfreich, etwas detailliertere Angaben im Vergleich zu den Normangaben zu erhalten. Bislang gilt, und dies ist im Entwurf DIN EN 1996-1-1/NA [7] auch so von DIN 1053-1 [1] übernommen worden (2. Spalte der Tabelle 2), die Einteilung nach Hohlblocksteinen, Hochlochsteinen, Steinen mit Grifflöchern oder Griffaschen, Vollsteinen ohne Grifflöcher oder Griffaschen. Hinzugenommen wurde in DIN EN 1996-1-1/NA [7] der Porenbetonstein.

Die Prüfung der Zugfestigkeit ist relativ aufwendig. Eine Prüfnorm oder -richtlinie existiert zurzeit nicht (siehe aber [8]). Meist werden die Mauersteine in Richtung Steinlänge geprüft. Wesentliche Eigenschaftsunterschiede zwischen Steinlänge und -breite ergeben sich vor allem bei Lochsteinen mit richtungsorientierten Lochungen. Zugfestigkeitswerte in Richtung Steinbreite liegen nur für HLz vor (8 Werte, Wertebereich $\beta_{z,b}/\beta_{D,st} = 0,003...0,026$, Mittelwert: 0,009). Sinnvollerweise werden die $\beta_{z,l}$ -Werte auf die jeweilige Steindruckfestigkeit (nach Norm) ermittelt bezogen als Verhältniswerte $\beta_{z,l}/\beta_{D,st}$ angegeben.

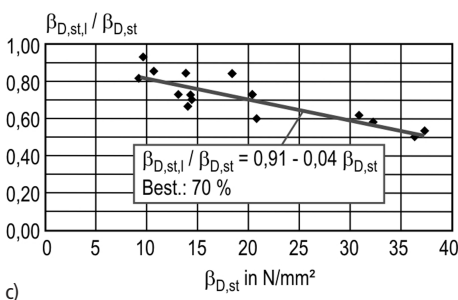
Tabelle 2 gibt den heutigen Stand der Auswertung [3, 9, 10] wieder.



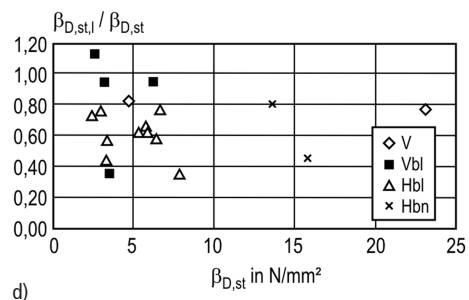
a)



b)



c)



d)

Bild 1. Steinlängs- $(\beta_{D,st,l})$ /Normdruckfestigkeit $(\beta_{D,st})$ in Abhängigkeit von der Normdruckfestigkeit [3]; a) Leichthochlochziegel, b) Kalksandvollsteine, Kalksandlochsteine, c) Porenbeton-Blocksteine, Porenbeton-Plansteine, d) Leichtbetonsteine, Betonsteine

Tabelle 2. Verhältniswerte Steinzug-/Steindruckfestigkeit

Steinart	$\delta_i = f_{bt,cal} / f_{st}$	Mauerstein	$\beta_{z,l} / \beta_{D,st,prüf}$ [3]		
	DIN EN 1996-1-1/NA		Mittelwert	Wertebereich	Anzahl Versuchswerte
Hohlblocksteine	0,020	Hbl	0,08	0,05...0,13	8
		Hbl 2	0,09	0,07...0,13	5
		Hbl ≥ 4	0,07	0,06...0,10	3
		Hbn	0,08	0,06...0,09	2
Hochlochsteine	0,026	HLz	0,03	0,13...0,41	20
		LHLz	0,01	0,002...0,019	54
		KS L	0,035	0,026...0,055	19
Steine mit Grifflöchern und Griffaschen	0,026	KS(GL)	0,045	0,027...0,065	24
Vollsteine ohne Grifflöcher oder Griffaschen	0,032	KS	0,063	0,039...0,081	18
		Mz	0,04	0,01...0,08	9
		V, Vbl	0,08	0,04...0,21	23
		V2, Vbl2	0,11	0,06...0,18	16
		V, Vbl ≥ 4	0,07	0,05...0,09	7
Porenbeton	$0,082 \cdot \frac{1}{1,25 \cdot \left(0,7 + \frac{f_{st}}{25}\right)^{0,5}}$	PB, PP	0,11	0,06...0,19	24
		PB2, PP2	0,18	0,13...0,20	7
		PB und PP 4, 6, 8	0,11	0,09...0,13	8

$f_{bt,cal}$ rechnerische Steinzugfestigkeit nach DIN EN 1996-1-1/NA
 f_{st} umgerechnete mittlere Steindruckfestigkeit nach DIN EN 1996-1-1/NA
 $\beta_{z,l}$ Prüfwert der Steinzugfestigkeit
 $\beta_{D,st,prüf}$ Prüfwert der Steindruckfestigkeit

Die beiden angeführten Verhältniswerte sind nicht direkt miteinander vergleichbar, da der Prüfwert jeweils noch mit Formbeiwerten zu versehen und näherungsweise beim Druck mit 0,8 und beim Zug mit 0,7 zu multiplizieren wäre, um auf die charakteristischen Werte zu kommen. Näherungsweise kann man aber die Verhältniswerte gleichsetzen (im Rahmen der hier vorliegenden Genauigkeit).

Für Vollsteine besteht wegen der versuchstechnisch sehr aufwendigen Bestimmung der einaxialen Längszugfestigkeit noch die Möglichkeit der Messung der Spaltzugfestigkeit. Allerdings gibt es für Mauersteine noch keinen einheitlichen Wert zur Umrechnung von der Spaltzugfestigkeit auf die Zugfestigkeit. Dieser Wert hängt erfahrungsgemäß von der Festigkeit ab. Näherungsweise gilt, dass das Verhältnis Spaltzugfestigkeit $\beta_{sz,l}$ zu Zugfestigkeit $\beta_{z,l}$ zwischen 1,1 und 1,3 liegt. Für Lochsteine ist nach Auffassung des Verfassers die Ermittlung der Spaltzugfestigkeit [11] aus Gründen des Spannungszustands nicht sinnvoll anzuwenden.

2.2 Verformungseigenschaften

2.2.1 Elastizitätsmodul senkrecht zur Lagerfuge unter Druckbeanspruchung

Der Elastizitätsmodul der Mauersteine beeinflusst die Steifigkeit des Mauerwerks maßgeblich, er muss in den Fällen, in denen sie eine Rolle spielt, im Einzelfall nachgewiesen werden.

Der E-Modul ist als Sekantenmodul bei 1/3 der Höchstspannung (Druckspannung senkrecht zu den Lagerfugen) und einmaliger Belastung definiert:

$$E_D = \frac{\max \sigma_D}{3 \cdot \varepsilon_1}$$

mit

ε_1 Längsdehnung bei 1/3 $\max \sigma_D$

Nach [3] können für eine erste Abschätzung des Druck-E-Moduls folgende Beziehungen gewählt werden:

$$\text{Kalksandstein: } E_D = 230 \cdot \beta_{D,st}$$

$$\text{Porenbeton: } E_D = 700 \cdot \beta_{D,st}^{0,74}$$

Der Verfasser empfiehlt, bei den wenigen Einzelfällen, wo der Elastizitätsmodul des Mauerwerks für Nachwei-

se benötigt wird, z.B. Durchbiegung bei Brückenüberbauten, den Elastizitätsmodul von Steinen vor dem Vermauern bzw. bei bestehenden Bauwerken mittels Probenentnahme zu bestimmen und eine rechnerische Abschätzung vorzunehmen, wozu allerdings eine sehr große Erfahrung erforderlich ist.

2.2.2 Elastizitätsmodul in Steinlängsrichtung unter Zugbeanspruchung

Der Elastizitätsmodul der Mauersteine unter Zugbeanspruchung liegt erfahrungsgemäß in der gleichen Größenordnung wie der unter Druckbeanspruchung. Geringe Abweichungen sind in der Nichtlinearität der Spannungs-Dehnungs-Linien der Steinmaterialien begründet. Der Zug-E-Modul ist analog zum Druck-E-Modul als Sekantenmodul bei 1/3 der Höchstspannung (Zugfestigkeit) und einmaliger Belastung definiert.

Zwischen dem Elastizitätsmodul und der Steinzugfestigkeit wurden folgende Zusammenhänge ermittelt [3] (Best.: Bestimmtheitsmaß):

Kalksandsteine (Prismen; 13 Mittelwerte)
 $E_Z = 5800 \beta_{z,1}^{0,73}$ (Best.: 95%)

Leichtbetonsteine (V, Vbl, Hbl; Prismen; Prüfung in Steinlängsrichtung; 35 Einzelwerte, große Streuung)

$E_Z = 6000 \beta_{z,1}$ (Best.: 77%)

Porenbetonsteine

$E_Z = 3180 \beta_{z,1}$ (Best.: 78%)
 (Zylinder, Prismen; 21 Mittelwerte)

$E_Z = 1,01 E_D$ (Best.: 93%)
 (Zylinder; 11 Mittelwerte)

2.2.3 Spannungs-Dehnungs-Linie

In den nachfolgenden vier Diagrammen sind die Spannungs-Dehnungs-Linien von Ziegeln, Kalksandstein, Leichtbeton und Porenbeton, wie man sie am Vollmaterial ermittelt, beispielhaft dargestellt.

2.2.4 Querdehnungsmodul

Diese Kenngröße ist von maßgebender Bedeutung für die Drucktragfähigkeit von Mauerwerk. Bei einem ungünstigen Verhältnis der Querdehnungsmodul von Mörtel und Stein wird letzterer stärker auf Zug beansprucht, was die Druckfestigkeit des Mauerwerks redu-

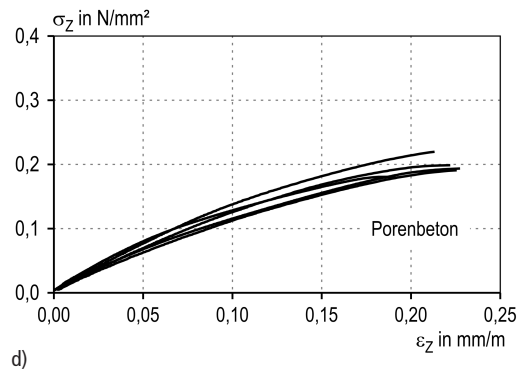
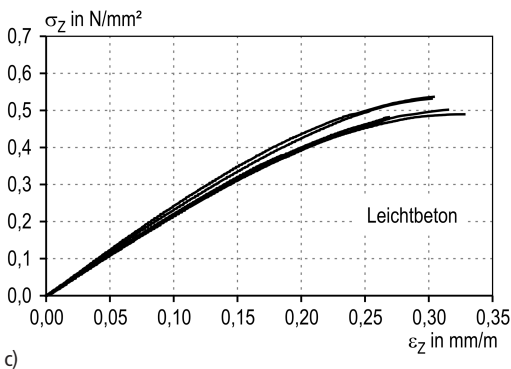
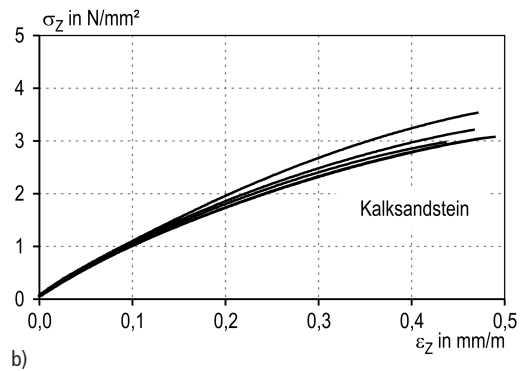
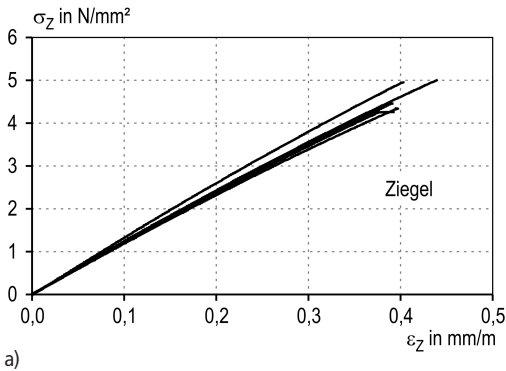


Bild 2. Spannungs-Dehnungs-Linien von Ziegeln (a), Kalksandstein (b), Leichtbeton (c) und Porenbeton (d)

Tabelle 3. Mauersteine; Querdehnungsmodul $E_{q,i}$ in 10^3 N/mm², Querdehnungszahl μ , Anhaltswerte [12–15], aus [3]

Mauerstein	Festigkeitsklasse	$E_{q,i}$		μ
		n	Wertebereich	
Hbl, Vbl	2...6	8	3,6...20	0,08...0,11
PB, PP	2...6	7	5,6...25	0,15
KS, KS L, KSHbl	8...28	12	12...100	
HLz	6	4	2,7...40	0,11...0,20
	8	8	12...59	
	12	4	31...55	
	48	–	133	

n Anzahl der Versuchswerte

ziert. Nach [3] können die Wertebereiche aus Tabelle 3 für den Querdehnungsmodul von Mauersteinen angegeben werden.

2.3 Dehnung aus Schwinden und Quellen, thermische Ausdehnungskoeffizienten

Für die Steinmaterialien selbst werden eher selten Formänderungswerte aus lastunabhängiger Beanspruchung angegeben, siehe z. B. [16, 17]. Bei einem Verbundwerkstoff wie Mauerwerk hängen Formänderungswerte sehr stark ab von den jeweiligen Anteilen; z. B. schwindet großformatiges Mauerwerk mit Dünnbettfuge anders als kleinformatiges mit Dickbettfuge. Für Abschätzungen wird daher auf Abschnitt 5.5.5 verwiesen.

3 Eigenschaftswerte von Mauermörteln

3.1 Allgemeines

Mauermörtel wird durch den Kontakt mit den Steinen in mehr oder weniger starkem Umfang beeinflusst. In aller Regel wird dem Mörtel Wasser entzogen, sodass nach einer gewissen Phase der Konsolidierung – entspricht quasi einer echten Reduktion des Wasserzementwertes – der Wasserentzug leere Poren hinterlässt, die sich festigkeitsmindernd auswirken. Insofern können Eigenschaftswerte, die an nicht beeinflusstem Mörtel ermittelt werden, für weiterführende Analysen und Abschätzungen meist nicht verwendet werden. Die zur Verfügung stehenden Daten werden nachfolgend aufgeführt und sind [3] entnommen.

3.2 Festigkeitseigenschaften

3.2.1 Zugfestigkeit β_Z

Für Normalmörtel ergab sich mit 33 Versuchswerten (Mittelwerte) der folgende Zusammenhang zur Druckfestigkeit β_D :

$$\beta_Z = 0,11 \beta_D \quad (\text{Best.: } 91\%)$$

3.2.2 Scherfestigkeit β_S

Die Scherfestigkeit von Mauermörtel ist definiert als maximale Spannung bei einschnittiger Scherbeanspruchung. Ein genormtes Prüfverfahren existiert nicht. Üblicherweise wird die Scherfestigkeit an nach DIN 18555 bzw. DIN EN 1015 hergestellten Mörtelprismen 160 mm × 40 mm × 40 mm geprüft. Dabei wird das Prisma senkrecht zur Prismenlängsachse auf Scheren beansprucht.

Die Scherfestigkeit von Mauermörtel ist z. B. von Interesse bei der rechnerischen Berücksichtigung von mit Mauermörtel verfüllten Mauersteinkanälen (Verfüllziegel-Mauerwerk) und beim rechnerischen Nachweis von Verankerungen mit Haken, z. B. bei zweischaligem Mauerwerk.

Mit den für diese Auswertung vorliegenden 11 Versuchswerten für Werk-Trockenmörtel, Werk-Frischmörtel und Rezeptmörtel ergeben sich folgende Zusammenhänge zwischen der Scherfestigkeit β_S und der Normmörtelruckfestigkeit β_D , ermittelt nach DIN 18555-3 [32] oder DIN EN 1015-11 [33] (Bereich für β_D : 4 bis 18 N/mm²):

$$\beta_S = 0,55 \beta_D^{0,68} \quad (\text{Best.: } 89\%)$$

$$\beta_S = 0,25 \beta_D \quad (\text{Best.: } 76\%)$$

Die Auswertung einer Vielzahl von Festigkeitsprüfungen in [18] ergab

$$\beta_S = 0,71 \beta_D^{0,57}$$

$$\beta_S = 2 \beta_Z$$

3.3 Verformungseigenschaften

3.3.1 E-Modul (Längsdehnungsmodul) E

Der E-Modul wird in der Regel nach DIN 18555-4 [19] zusammen mit dem Querdehnungsmodul ermittelt. Nach den vorliegenden Versuchsergebnissen lassen sich folgende Beziehungen zwischen E und der Normdruckfestigkeit β_D angeben [20] (s. auch Bild 3):

- Normalmörtel
 $E = 2100 \cdot \beta_D^{0,7}$ bzw. $E \approx 700 \cdot \beta_D$
- Leichtmörtel mit Blähtonzuschlag
 $E = 1200 \beta_D^{0,6}$
- Leichtmörtel mit Perlitezuschlag
 $E = 1200 \beta_D^{0,4}$

3.3.2 Querdehnungsmodul E_q

Ist der Querdehnungsmodul des Mauermörtels deutlich kleiner als der des Steins, so entstehen durch die größere Querverformbarkeit des Lagerfugenmörtels zusätzliche Querspannungen im Stein, wodurch die Mauerwerkdruckfestigkeit verringert werden kann. Dies ist besonders bei leichten Leichtmörteln mit sehr verformbaren Zuschlägen der Fall. Ein Zusammenhang zwischen E_q und der Normdruckfestigkeit β_D kann jeweils nur für Mörtel mit gleicher Gesteinskörnung (gefüge-

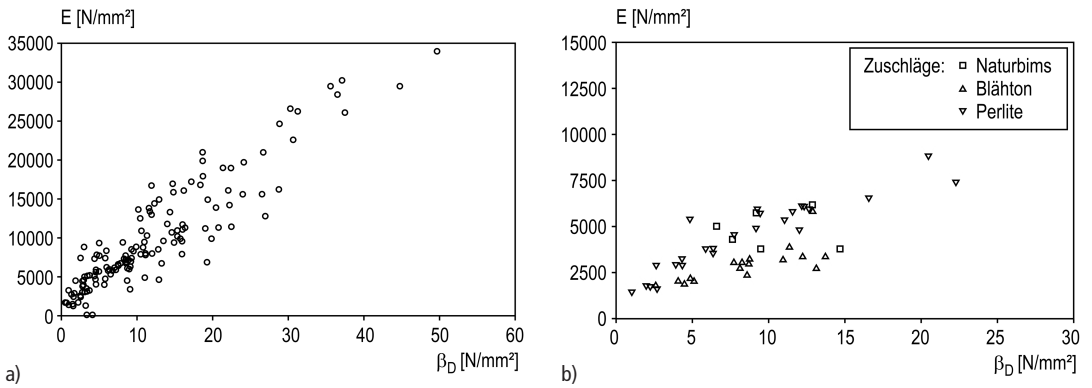


Bild 3. Mauer mörtel; Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Normdruckfestigkeit β_D [3]; a) Normalmörtel, b) Leichtmörtel

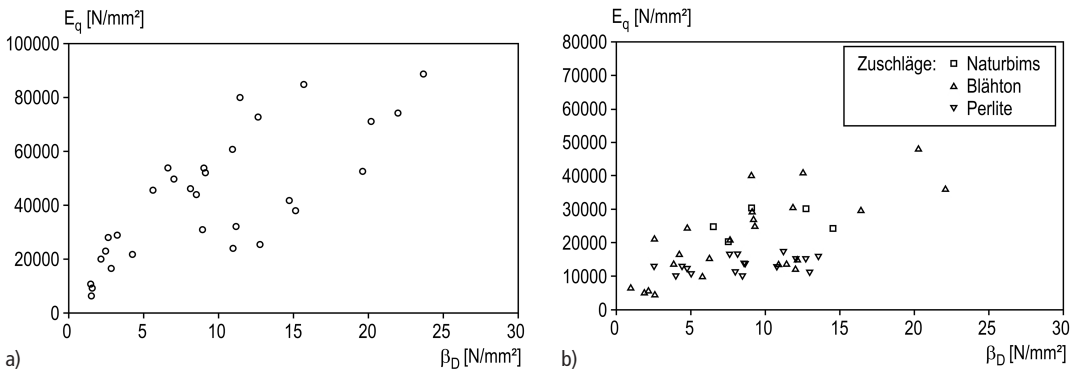


Bild 4. Mauer mörtel; Querdehnungsmodul E_q in Abhängigkeit von der Normdruckfestigkeit β_D [3]; a) Normalmörtel, b) Leichtmörtel

Tabelle 4. Mauer mörtel; Querdehnungsmodul E_q [21], aus [3]

Mörtelart	n	ρ_d	β_D	E_q
		kg/dm ³	N/mm ²	10 ³ N/mm ²
Normalmörtel	49	1,1...1,9	1,5...24	1,2...116
Dünnbettmörtel	5	1,4...1,6	14...21	36...49
Leichtmörtel LM 21 (Zuschlag, Polystyrol, Perlite, Naturbims)	23	0,6...0,8	8,4...11,6	6,7...15
Leichtmörtel LM 36 (Zuschlag, Naturbims, Blähton, Blähschiefer)	36	0,8...1,2	4,0...21	16...48

n Anzahl Versuchswerte
 ρ_d Trockenrohddichte
 β_D Normdruckfestigkeit

dichter Sand, Blähton, Naturbims, Perlite usw.) erwartet werden (Bild 4).

In Tabelle 4 sind E_q -Werte angegeben. Für Leichtmörtel wurde der Zusammenhang zwischen Quer- und Längsdehnungsmodul (bei allerdings großer Streuung)

$$E_q = 4,92 \cdot E \quad (\text{Best.: } 67\%)$$

ermittelt.

3.3.3 Feuchtedehnung (Schwinden ϵ_s)

Das Schwinden des Mauer mörtels kann die Rissicherheit von Mauerwerk beeinflussen. Schnelles und starkes Schwinden führt gelegentlich im oberflächennahen Bereich zum Ablösen des Fugenmörtels vom Mauerstein. Das Schwinden kann nach DIN 52450 [23] an gesondert in Stahlschalung hergestellten Mörtelprismen ermittelt werden. Der Mörtel im Mauerwerk schwindet in der Regel weniger, weil der Mauerstein dem Mörtel einen Teil des Anmachwassers entzieht. Quantitative Aussagen dazu liegen bislang nicht vor.

Schwindwerte $\epsilon_{s\infty}$ (rechnerische Endwerte) für Normalmauer mörtel sind in der Tabelle 5 in Abhängigkeit

Tabelle 5. Mauermörtel; Endschwindwerte $\varepsilon_{\text{scor}}$ Normalmörtel [22] – Anhaltswerte

Relative Luftfeuchte %	Rechenwerte	Wertebereich
	mm/m	
30	1,2	0,7...2,0
50	0,9	0,5...1,5
65	0,8	0,5...1,5
80	0,5	0,2...1,0

von der relativen Luftfeuchte des Schwindklimas angegeben.

Endschwindwerte von Leichtmörteln können je nach verwendetem Leichtzuschlag bis etwa doppelt so groß sein.

3.3.4 Kriechen (Kriechzahl ϕ)

Das Kriechen kann wie das Schwinden die Rissicherheit von Mauerwerk beeinflussen. Es wird in analoger Weise wie bei Beton ermittelt. Für im Alter von 7 d mit einer Kriechspannung von etwa 1/3 der Prismendruckfestigkeit belastete Mörtelprüfkörper ergaben sich Endkriechzahlen ϕ_{∞} im Bereich von rd. 5 bis 15, im Mittel von etwa 10 [24]. Auch hier gilt – wie beim Schwinden – dass sich das Kriechen des Mauermörtels im Mauerwerk wesentlich von dem der Mörtelprismen unterscheidet.

4 Verbundeigenschaften zwischen Stein und Mörtel

4.1 Allgemeines

Nahezu alle Festigkeitseigenschaften von Mauerwerk hängen von dem Verbund zwischen Stein und Mörtel ab. Erst wenn die Verbundfestigkeiten sehr hoch werden, kommt die Steinzugfestigkeit zum Tragen. Geprüft wird die Haftscherfestigkeit entweder nach DIN 18555-5 [25], wenn die Anforderungswerte des Mörtels nach DIN 1053-1 überprüft werden. Für genauere Untersuchungen verschiedener Stein-Mörtel-Kombinationen empfiehlt sich die Prüfung nach DIN EN 1052-3 [26]. Eine sehr detaillierte Zusammenfassung von Prüfmethoden und Kennwerten wurde in [27] veröffentlicht. In [28] wird auf die Beanspruchungsarten spezifisch eingegangen.

4.2 Haftscherfestigkeit

Das Institut für Bauforschung der RWTH Aachen hat im Rahmen eines Forschungsprojektes [29] eine sehr umfassende Auswertung von Haftscherfestigkeitsuntersuchungen durchgeführt und damit verdeutlicht, dass eine Differenzierung zwischen unterschiedlichen Stein-/Mörtelkombinationen bez. der tatsächlichen Werte sehr sinnvoll ist (s. Tabellen 6 a bis e).

In Tabelle 7 sind Anhaltswerte für die Haftscherfestigkeit angegeben. Dabei wurden die Versuchsergebnisse nach EN-Verfahren mit dem Faktor 2 multipliziert – in etwa ist dies zulässig, um auf den Wert nach dem DIN-Verfahren schließen zu können.

Tabelle 6 a. Kalksandsteine; Haftscherfestigkeit β_{HS}

Mauerstein	Mauermörtel	PV	n(n _i)	h_m	min \bar{x}	max \bar{x}	\bar{x}
				M.-%			
KS-Referenz	NM II	DIN	3 (> 15)	3,0...12,1 ¹⁾	0,10	0,40	0,23
		EN	2 (9)	3,0...12,1	0,10	0,24	0,17
	NM IIa	DIN	23 (> 129)	4,0...11,3 ¹⁾	0,02	0,60	0,19
		EN	10 (49)	5,5...11,3 ¹⁾	0,03	0,27	0,10
	NM IIIa	DIN	6 (30)	2,3...11,5	0,27	0,67	0,42
		EN	2 (10)	2,3...11,5	0,21	0,60	0,41
	LM 21	DIN	3 (> 14)	5,1 ¹⁾	0,37	0,58	0,47
		EN	–	–	–	–	–
	LM 36	DIN	3 (30)	5,0 ¹⁾	0,12	0,82	0,43
		EN	–	–	–	–	–
	DM	DIN	21 (170)	3,4...5,0 ¹⁾	0,37	1,68	0,94
		EN	–	–	–	–	–

Tabelle 6 a. Kalksandsteine; Haftscherfestigkeit β_{HS} (Fortsetzung)

Mauerstein	Mauermörtel	PV	n(n _i)	h _m	min \bar{x}	max \bar{x}	\bar{x}
				M.-%			
KS (ohne Referenz)	NM II	DIN	1 (-2)	1,8	–	–	0,06
		EN	4 (40)	14,4	0,16	0,64	0,37
	NM IIa	DIN	21 (> 76)	1,8...3,2 ¹⁾	0,01	0,51	0,20
		EN	21 (> 67)	1,8...10,5 ¹⁾	0,02	0,31	0,13
	NM III	DIN	2 (-2)	1,8...3,2	0,04	0,07	0,06
		EN	13 (> 27)	1,5...13,2 ¹⁾	0,03	0,35	0,16
	LM 21	DIN	2 (10)	3,2...12,1	0,36	1,64	1,00
		EN	2 (10)	3,2...12,1	0,27	1,10	0,69
	DM	DIN	8 (45)	3,9...6,7 ¹⁾	0,46	1,07	0,78
		EN	12 (56)	2,7...6,8 ¹⁾	0,10	0,90	0,43

PV Prüfverfahren
n Anzahl der Versuchsserien
(n_i) Anzahl der Einzelwerte
h_m Feuchtegehalt der Mauersteine
min \bar{x} kleinster Mittelwert
max \bar{x} größter Mittelwert; \bar{x} : Mittelwert

- 1) Feuchtegehalte liegen nicht bei allen Versuchsserien vor.
2) Anzahl der Einzelwerte nicht bekannt.

Tabelle 6 b. Hochlochziegel; Haftscherfestigkeit β_{HS}

Mauerstein	Mauermörtel	PV	n (n _i)	h _m	min \bar{x}	max \bar{x}	\bar{x}
				M.-%			
HLZ	NM II	DIN	2 (20)	0,1...10,9	0,43	0,47	0,45
		EN	4 (32)	0,1...10,9 ¹⁾	0,23	0,35	0,30
	NM IIa	DIN	8 (43)	0...11,7 ¹⁾	0,16	0,65	0,32
		EN	27 (> 111)	0...21,0 ¹⁾	0,08	0,67	0,25
	NM III	DIN	–	–	–	–	–
		EN	5 (> 16)	0...0,1 ¹⁾	0,12	0,64	0,37
	LM 21	DIN	1 (5)	2,0	–	–	0,49
		EN	7 (35)	0...19,0 ¹⁾	0,06	0,38	0,17
	LM 36	DIN	2 (15)	0...17,0	0,35	0,80	0,58
		EN	15 (73)	0...21,0	0,12	0,51	0,25
DM	DIN	–	–	–	–	–	
	EN	12 (64)	0 ¹⁾	0,18	0,93	0,43	

Kurzzeichen siehe Tabelle 6a

Tabelle 6 c. Vollziegel; Haftscherfestigkeit β_{HS}

Mauerstein	Mauermörtel	PV	n (n_i)	h_m	min \bar{x}	max \bar{x}	\bar{x}
				M.-%			
Mz	NM II	DIN	2 (10)	0,2...7,7	0,71	1,04	0,88
		EN	2 (10)	0,2...7,7	0,37	0,57	0,47
	NM IIa	DIN	15 (94)	0,1...8,0 ¹⁾	0,07	1,06	0,31
		EN	11 (50)	0,1...8,0 ¹⁾	0,04	0,73	0,20
	NM IIIa	DIN	2 (10)	0,1...6,9	1,34	2,05	1,70
		EN	2 (10)	0,1...6,9	0,97	1,00	0,99

Kurzzzeichen siehe Tabelle 6a

Tabelle 6 d. Porenbetonsteine (Blocksteine, Plansteine); Haftscherfestigkeit β_{HS}

Mauerstein	Mauermörtel	PV	n (n_i)	h_m	min \bar{x}	max \bar{x}	\bar{x}
				M.-%			
PB, PP	NM II	DIN	2 (10)	11,3...54,2	0,09	0,28	0,19
		EN	2 (10)	11,3...54,2	0,05	0,09	0,07
	NM IIa	DIN	2 (10)	10,4...54,7	0,17	0,35	0,26
		EN	6 (>10)	4,7...54,7	0,04	0,07	0,06
	LM 21	DIN	2 (9)	3,2...52,9	0,49	0,85	0,67
		EN	2 (10)	3,2...52,9	0,08	0,16	0,12
	DM	DIN	15 (111)	8,7...44,7 ¹⁾	0,41	1,28	0,75
		EN	8 (> 24)	4,9...29,0 ¹⁾	0,18	0,58	0,39

Kurzzzeichen siehe Tabelle 6a

Tabelle 6 e. Betonsteine (Leicht- und Normalbeton); Haftscherfestigkeit β_{HS}

Mauerstein	Mauermörtel	PV	n (n_i)	h_m	min \bar{x}	max \bar{x}	\bar{x}
				M.-%			
LB/BS	NM II	DIN	–	–	–	–	–
		EN	4 (21)	–	0,30	0,39	0,35
	NM IIa	DIN	11 (55)	0...7,3 ¹⁾	0,42	0,76	0,62
		EN	21 (> 89)	0...7,9 ¹⁾	0,13	0,64	0,25
	NM III	DIN	–	–	–	–	–
		EN	5 (> 16)	3,1 ¹⁾	0,31	0,67	0,51
	LM 21	DIN	1 (4)	16,8	–	–	0,95
		EN	5 (> 19)	2,8...16,8 ¹⁾	0,18	0,63	0,39
	DM	DIN	8 (68)	5,1 ¹⁾	0,68	2,57	1,78
		EN	2 (10)	5,1 ¹⁾	0,17	1,18	0,68

Kurzzzeichen siehe Tabelle 6a

Tabelle 7. Anhaltswerte für die Haftscherfestigkeit β_{HS} in N/mm²

Mauerstein	Mauermörtel				Normanforderung f_{vk0}			
	NM IIa	NM III	LM 36	DM	NM IIa	NM III	LM 36	DM
KS-Referenz	0,20	–	–	–	0,14	0,18	0,14	0,35
KS (ohne Referenzstein)	0,25	0,30	–	0,85				
HLz	0,45	–	0,50	–				
Mz	0,35		–					
PP	–			0,75				
Vbl, Hbl, Hbn	0,55			1,70				

Bei der Biegezugbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen kann zur Abschätzung der Biegezugfestigkeit bei Fugenversagen ersatzweise die Haftscherfestigkeit angesetzt werden (Gln. 4 bis 7 in Abschn. 5.4), obwohl hier die Drehbewegung des Steins einer Torsionsbeanspruchung entspricht. In [27] und [30] wird darauf speziell eingegangen.

4.3 Haftzugfestigkeit

Dieser Kennwert ist u.a. für die Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen von Relevanz. Tabelle 8 ist [3] entnommen und stellt die aktuellen Daten dar. Eine deutsche Prüfnorm bzw. -richtlinie existiert derzeit nicht. Zwei häufig angewendete Prüfverfahren – die zentrische Beanspruchung und das sogenannte Bondwrench-Prüfverfahren – sind in [8] (s. auch [31]) beschrieben.

Tabelle 8. Stein/Mörtel; Haftzugfestigkeit β_{HZ} ; Prüfalter im Allgemeinen mind. 14 d [3]

Mauerstein		Mauermörtel	Prüfverfahren ²⁾	n	\bar{x}	min x	max x
Art	Feuchtezustand ¹⁾						
1	2	3	4	5	6	7	8
HLz	I	NM IIa	Z	16	0,48	4)	4)
	I, f	NM IIa	BW	5	0,44	0,23	0,58
	I	LM 21	BW	2	0,07	4)	4)
	f	LM 21	BW	2	0,17	4)	4)
	I	DM	BW	3 (15)	0,19	0,10	0,32
KS	I	NM IIa	BW	2	0,14	4)	4)
	f	NM IIa	BW	1	0,42	4)	4)
	I, f	DM	BW	20	0,61	0,43	4)
	I	DM	Z	6 (30)	0,42	0,24	0,82
KS-PE	I	DM	Z	5	0,67	0,49	0,82
	I	DM	Z	5 ³⁾	0,29	0,26	0,36
PP	I, f	DM	Z	14	0,37	0,25	0,50

1) I, f lufttrocken, feucht

2) Z zentrisch (SM 3 in [8]); BW: Bondwrench (SM 4 in [8])

3) Prüfalter unter 14 d

4) Keine Angabe von Einzelwerten

n: Anzahl der Versuchsserien

(): Anzahl der Einzelwerte

\bar{x} , min x, max x: Mittelwert, Kleinstwert, Größtwert

5 Eigenschaftswerte von Mauerwerk

5.1 Druckfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen

Die Mauerwerkdruckfestigkeit wird von einer Vielzahl von Parametern beeinflusst, u. a. der Steindruck-/Zugfestigkeit, der Mörteldruckfestigkeit, dem Elastizitätsmodul der Einzelkomponenten und der Verbundqualität. Erschwerend kommt hinzu, dass der Mörtel in der Lagerfuge maßgeblich von der Normdruckfestigkeit abweichen kann.

Bislang wurde die Druckfestigkeit von Mauerwerk bei Berechnung nach der deutschen Mauerwerksnorm DIN 1053-1 durch die Grundwerte der zulässigen Druckspannungen σ_0 in Abhängigkeit von Steifigkeitsklassen, Mörtelarten und Mörtelgruppen festgelegt. Diese Unterteilung wurde auch in der auf das semiprobabilistische Sicherheitskonzept umgestellten DIN 1053-100 übernommen, mit dem Unterschied, dass der Nachweis nicht mehr mit den Grundwerten der zulässigen Druckspannungen σ_0 , sondern mit charakteristischen Werten f_k der Druckfestigkeit von Mauerwerk zu führen war. Eine Unterscheidung nach den verschiedenen Mauersteinarten war sowohl beim vereinfachten als auch beim genaueren Berechnungsverfahren in DIN 1053-1 und DIN 1053-100 noch nicht vorgesehen.

Nach dem genaueren Verfahren in DIN EN 1996-1-1 ist die charakteristische Druckfestigkeit von Mauerwerk unter Bezug auf eine vorgegebene Potenzfunktion und von der jeweiligen Mauerstein-Mauermörtel-Kombination abhängigen Gleichungsparametern und Exponenten zu berechnen, siehe unten. Als Grundlage für die Erarbeitung dieser Faktoren für die in Deutschland gebräuchlichen Mauerstein-Mauermörtel-Kombination wurden in den vergangenen Jahren am Institut für Bau- forschung Aachen (ibac) alle wesentlichen Eigen-

schaftswerte von Mauerwerkdruckversuchen in einer umfangreichen nach Mauerstein- und Mauermörtelarten unterschiedenen Datenbank zusammengestellt und ausgewertet. Wesentliche verwendete Literaturstellen sind u. a. [34–39].

Mit den Rechenansätzen für Mauerwerk mit Normalmörtel in Gl. (1 a) bzw. für Mauerwerk mit Leichtmörtel oder Dünnbettmörtel in Gl. (1 b) lässt sich die charakteristische Mauerwerkdruckfestigkeit mit den auf dieser Auswertung basierenden, in DIN EN 1996-1-1/NA in Abhängigkeit von der jeweiligen Mauerstein-Mauermörtel-Kombination angegebenen Gleichungsparametern und Exponenten (s. Tabellen 9 bis 15) rechnerisch ermitteln.

$$f_k = k \cdot f_{st}^\alpha \cdot f_m^\beta \quad (1 a)$$

$$f_k = k \cdot f_{st}^\alpha \quad (1 b)$$

Dabei sind:

- f_k charakteristische Druckfestigkeit von Mauerwerk in N/mm² (Schlankheit $\lambda = 5$)
- K, α, β über Regression bestimmte Faktoren
- f_{st} mittlere Mauersteindruckfestigkeit in Last- richtung in N/mm² (um den Faktor 1,25 erhöhter Nennwert der Festigkeitsklasse gemäß Anwendungsnorm und/oder Restnorm)
- f_m die der Mörtelgruppe zugeordnete Festigkeitsklasse des Mauermörtels gemäß DIN EN 998-2 in Verbindung mit DIN V 18580 in N/mm²

Neben den sich für die charakteristische Mauerwerkdruckfestigkeit nach DIN EN 1996-1-1/NA ergebenden Kurven sind in den Bildern 5 bis 15 die derzeitigen Treppenkurven für das vereinfachte Verfahren nach DIN EN 1996-3/NA dargestellt.

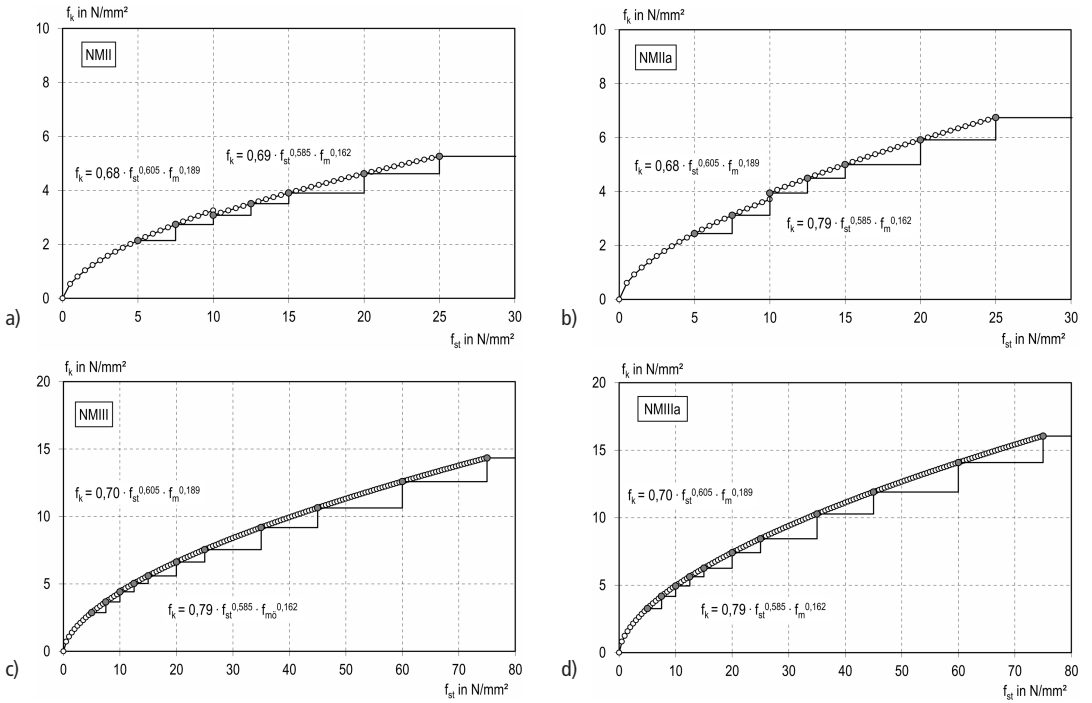


Bild 5. Druckfestigkeit von Einsteinmauerwerk aus Hochlochziegeln mit Lochung A (HLZA), Lochung B (HLZB), Mauertafelziegeln T1, sowie Kalksand-Loch- und Hohlblocksteinen mit Normalmauermörtel; a) NM II, b) NM IIa, c) NM III, d) NM IIIa

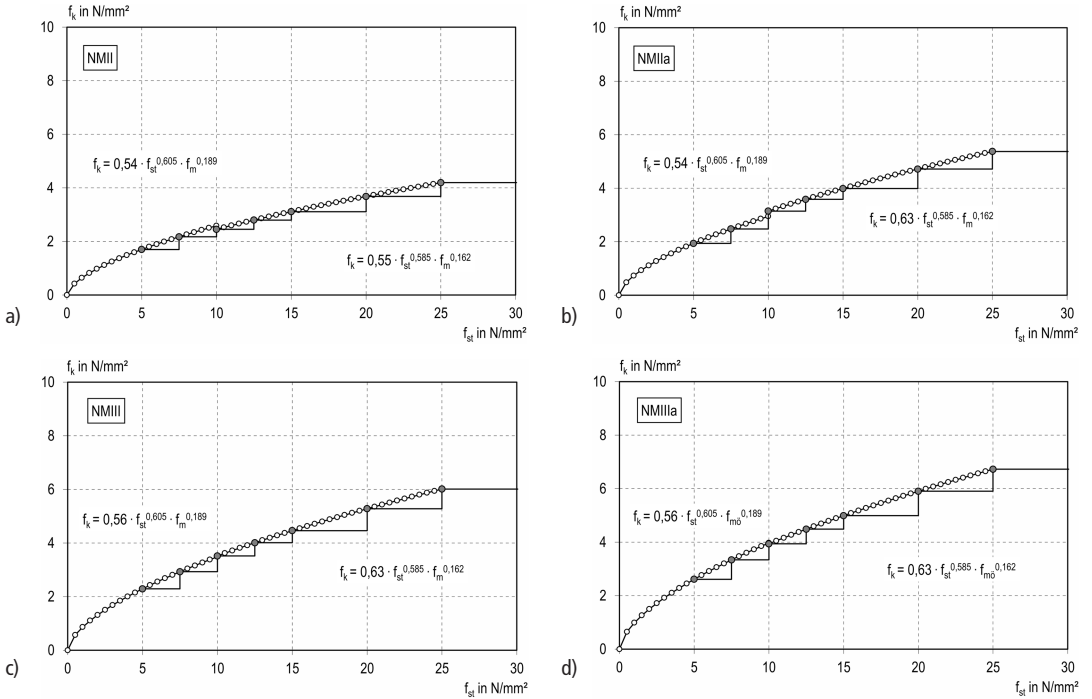


Bild 6. Druckfestigkeit von Einsteinmauerwerk aus Hochlochziegeln mit Lochung W (HLZW), Mauertafelziegeln T2, T3 und T4 sowie Langlochziegeln (LLZ) mit Normalmauermörtel; a) NM II, b) NM IIa, c) NM III, d) NM IIIa

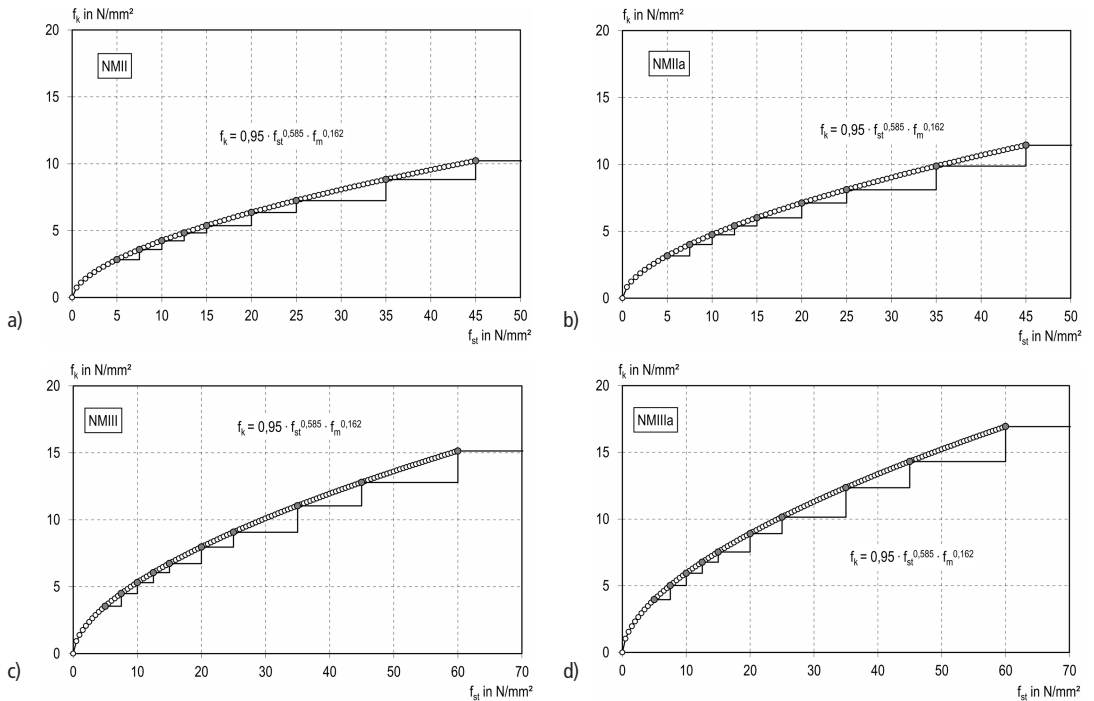


Bild 7. Druckfestigkeit von Einsteinauerwerk aus Vollziegeln sowie Kalksand-Vollsteinen und Kalksand-Blocksteinen mit Normalmauermörtel; a) NM II, b) NM IIa, c) NM III, d) NM IIIa

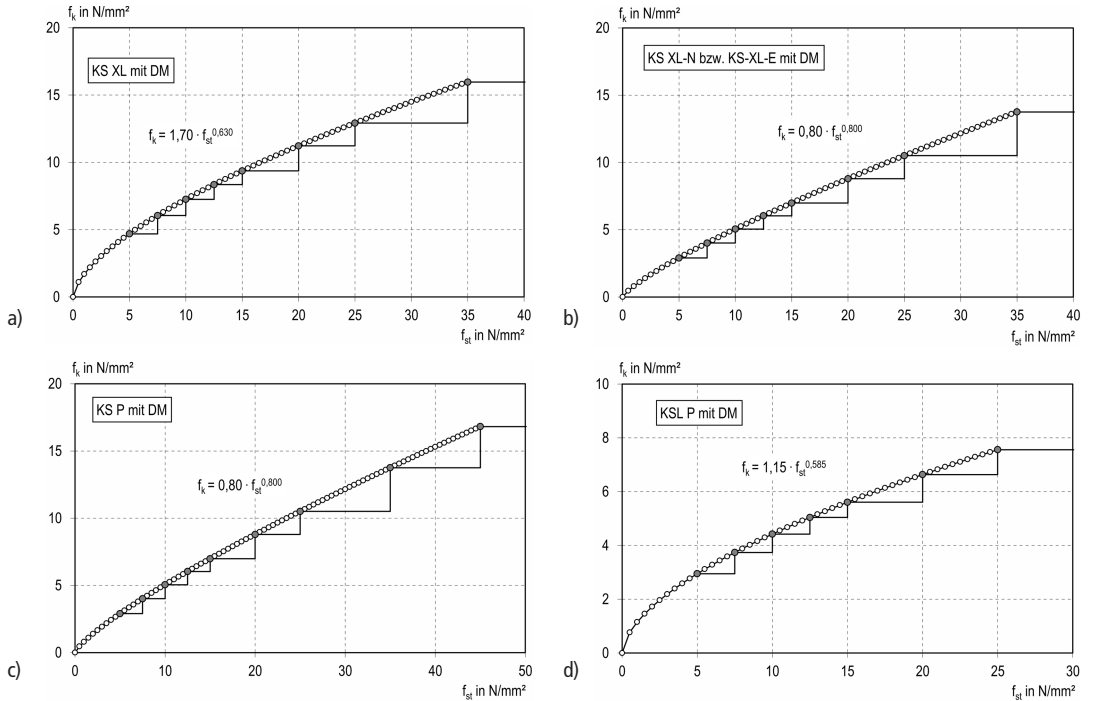


Bild 8. Druckfestigkeit von Einsteinauerwerk aus Kalksand-Plansteinen und Kalksand-Planelementen mit Dünnbettmörtel; a) KS XL, b) KS XL-N bzw. KS-XL-E, c) KS P, d) KSL P

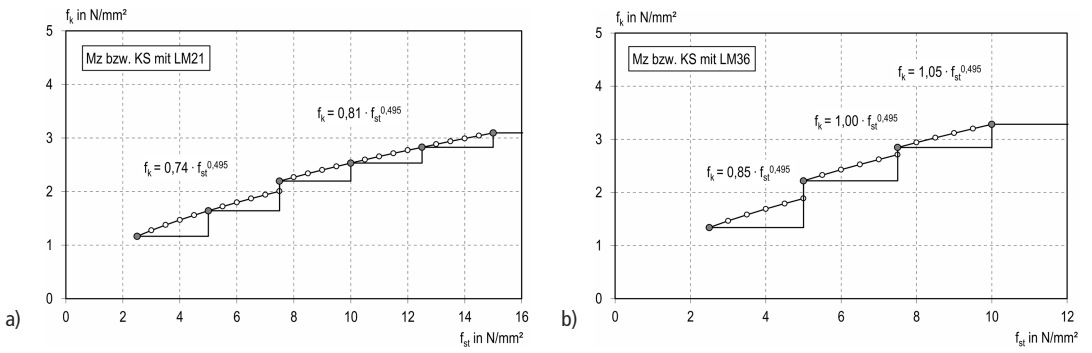


Bild 9. Druckfestigkeit von Einsteinsandsteinmauerwerk aus Mauerziegeln und Kalksandsteinen mit Leichtmauermörtel; a) LM 21, b) LM 36

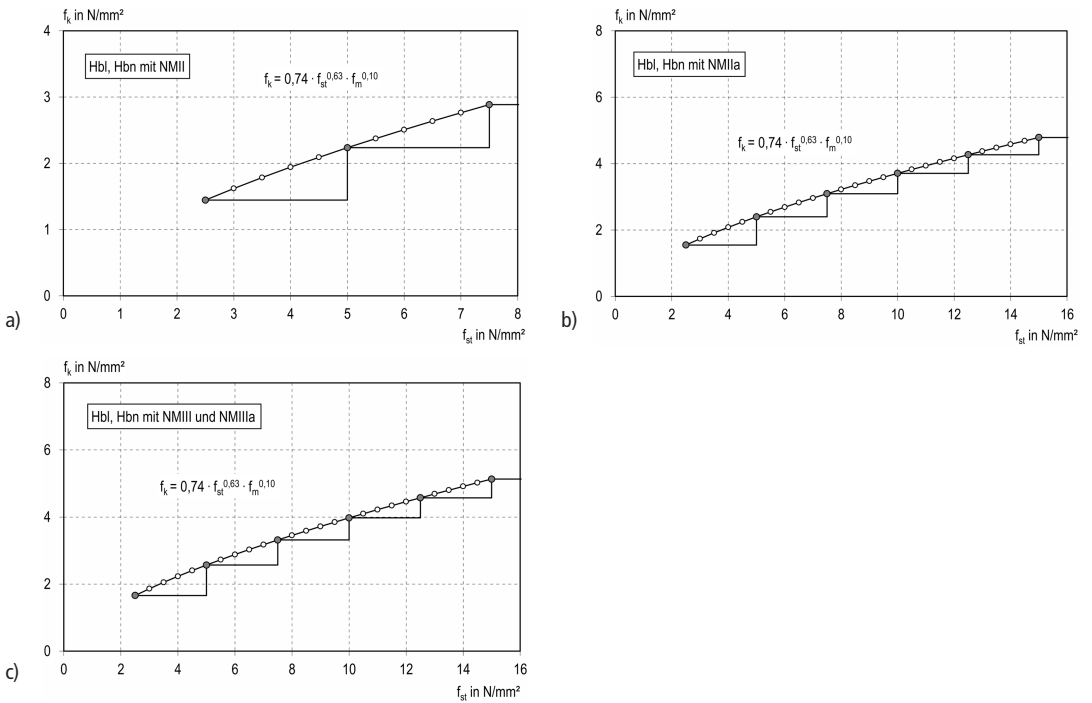


Bild 10. Druckfestigkeit von Einsteinsandsteinmauerwerk aus Leichtbeton- und Betonsteinen (Hohlblöcke)

a) Hbl, Hbn mit NM II, b) Hbl, Hbn mit NM IIa, c) Hbl, Hbn mit NM III und NM IIIa

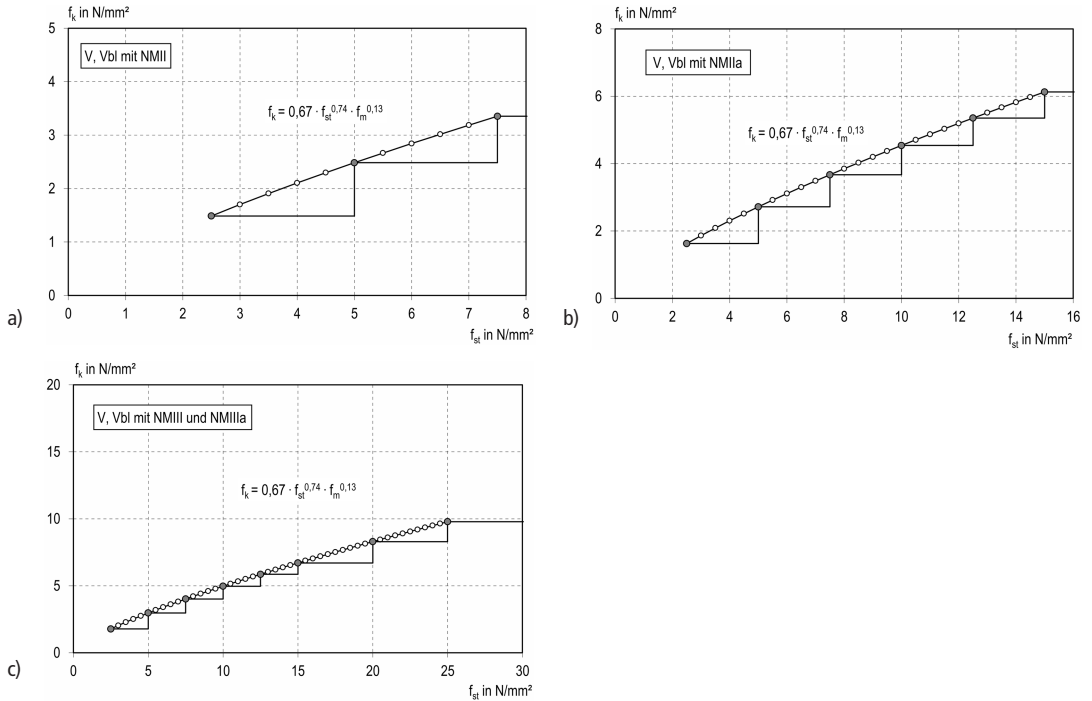


Bild 11. Druckfestigkeit von Einsteinauerwerk aus Leichtbetonsteinen (Vollsteine und Vollblöcke);

a) V, Vbl mit NM II, b) V, Vbl mit NM IIa, c) V, Vbl mit NM III und NM IIIa

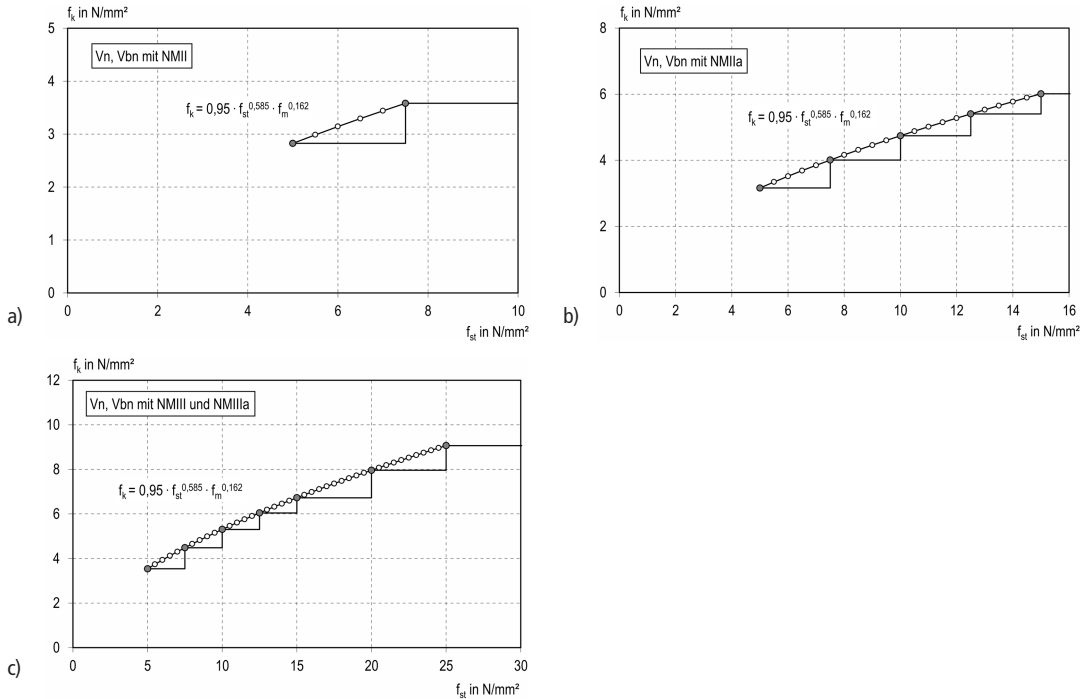


Bild 12. Druckfestigkeit von Einsteinauerwerk aus Betonsteinen (Vollsteine und Vollblöcke);

a) Vn, Vbn mit NM II, b) Vn, Vbn mit NM IIa, c) Vn, Vbn mit NM III und NM IIIa

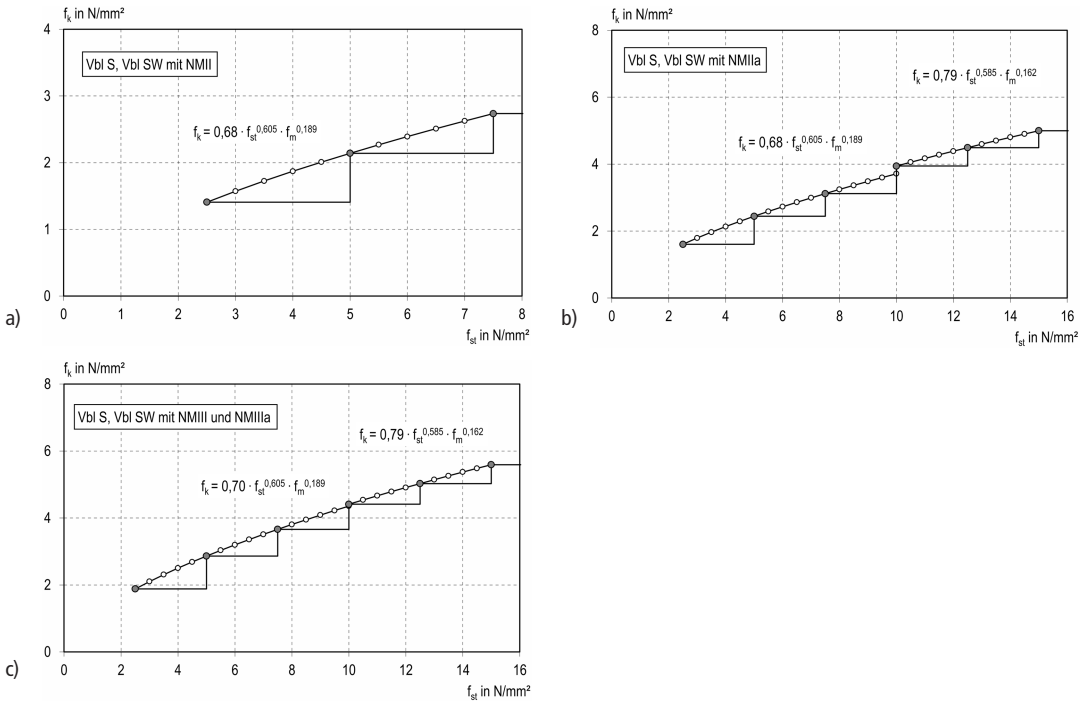


Bild 13. Druckfestigkeit von Einsteinerwerk aus Leichtbetonsteinen (Vollblöcke mit Schlitzen senkrecht zur Lagerfläche); a) Vbl S, Vbl SW mit NM II, b) Vbl S, Vbl SW mit NM IIa, c) Vbl S, Vbl SW mit NM III und NM IIIa

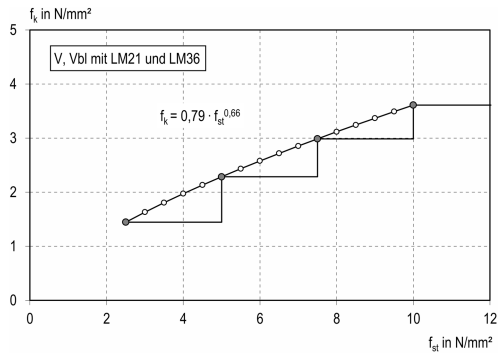


Bild 14 Druckfestigkeit von Einsteinerwerk aus Leichtbetonsteinen (Vollsteine und Vollblöcke) mit Leichtmauermörtel

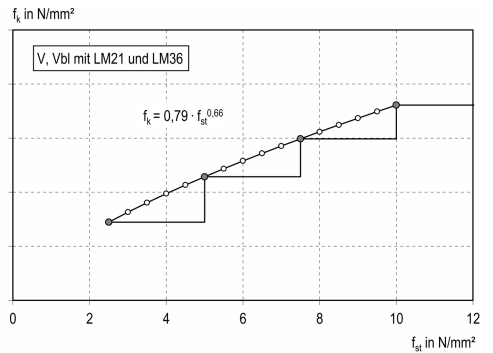


Bild 15. Druckfestigkeit von Einsteinerwerk aus Porenbeton mit Dünnbettmörtel

Tabelle 9. Parameter zur Ermittlung der Druckfestigkeit von Einsteinauermwerk aus Hochlochziegeln mit Lochung A (HLZA), Lochung B (HLZB), Mauertafelziegeln T1, sowie Kalksand-Loch- und Hohlblocksteinen mit Normalmauermörtel

Mittlere Steindruckfestigkeit N/mm ²	Mörtelart	Parameter		
		k	α	β
$5,0 \leq f_{st} < 10,0$	NM II	0,68	0,605	0,189
	NM IIa			
	NM III	0,70		
	NM IIIa			
$10,0 \leq f_{st} \leq 75,0$	NM II ¹⁾	0,69	0,585	0,162
	NM IIa ¹⁾	0,79		
	NM III			
	NM IIIa			

1) Die Druckfestigkeit des Mauerwerks darf nicht größer angenommen werden als für Steindruckfestigkeiten $f_{st} = 25$ N/mm².

Tabelle 10. Parameter zur Ermittlung der Druckfestigkeit von Einsteinauermwerk aus Hochlochziegeln mit Lochung W (HLZW), Mauertafelziegeln T2, T3 und T4 sowie Langlochziegeln (LLz) mit Normalmauermörtel

Mittlere Steindruckfestigkeit N/mm ²	Mörtelart	Parameter		
		k	α	β
$5,0 \leq f_{st} < 10,0$	NM II	0,54	0,605	0,189
	NM IIa			
	NM III	0,56		
	NM IIIa			
$10,0 \leq f_{st} \leq 75,0$	NM II ¹⁾	0,55	0,585	0,162
	NM IIa ¹⁾	0,63		
	NM III			
	NM IIIa			

1) Die Druckfestigkeit des Mauerwerks darf bei Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit Lochung W und Mauertafelziegeln T4 nicht größer angenommen werden als für Steinfestigigkeiten $f_{st} = 15$ N/mm² und bei Mauerwerk aus Mauertafelziegeln T2 und T3 nicht größer als für $f_{st} = 25$ N/mm².

Tabelle 11. Parameter zur Ermittlung der Druckfestigkeit von Einsteinauermwerk aus Vollziegeln sowie Kalksand-Vollsteinen und Kalksand-Blocksteinen mit Normalmauermörtel

Steinart	Mörtelart	Parameter		
		k	α	β
Vollziegel, KS-Vollsteine, KS-Blocksteine	NM II ¹⁾ , IIa ¹⁾	0,95	0,585	0,162
	NM III ²⁾ , IIIa ²⁾			

1) Die Druckfestigkeit des Mauerwerks darf nicht größer angenommen werden als für Steindruckfestigkeiten $f_{st} = 45$ N/mm².

2) Die Druckfestigkeit des Mauerwerks darf nicht größer angenommen werden als für Steindruckfestigkeiten $f_{st} = 60$ N/mm².

Tabelle 12. Parameter zur Ermittlung der Druckfestigkeit von Einsteinauermwerk aus Kalksand-Plansteinen und Kalksand-Planelementen mit Dünnbettmörtel

Steinsorte	Mörtelart	Parameter			
		k	a	b	
Planelemente	KS XL	DM ¹⁾	1,70	0,630	–
	KS XL-N, KS XL-E		0,80	0,800	–
Plansteine	KS P	DM ²⁾			
	KS L P		DM ³⁾	1,15	0,585

1) Die Druckfestigkeit des Mauerwerks darf nicht größer angenommen werden als für Steindruckfestigkeiten $f_{st} = 35$ N/mm².

2) Die Druckfestigkeit des Mauerwerks darf nicht größer angenommen werden als für Steindruckfestigkeiten $f_{st} = 45$ N/mm².

3) Die Druckfestigkeit des Mauerwerks darf nicht größer angenommen werden als für Steindruckfestigkeiten $f_{st} = 25$ N/mm².

Tabelle 13. Parameter zur Ermittlung der Druckfestigkeit von Einsteinauermwerk aus Mauerziegeln und Kalksandsteinen mit Leichtmauermörtel

Mittlere Steindruckfestigkeit N/mm ²	Mörtelart	Parameter		
		k	α	β
$2,5 \leq f_{st} < 5,0$	LM 21	0,74	0,495	–
	LM 36	0,85		
$5,0 \leq f_{st} < 7,5$	LM 21	0,74	0,495	–
	LM 36	1,00		
$7,5 \leq f_{st} \leq 35,0$	LM 21 ¹⁾	0,81	0,495	–
	LM 36 ²⁾	1,05		

1) Die Druckfestigkeit des Mauerwerks darf nicht größer angenommen werden als für Steindruckfestigkeiten $f_{st} = 15$ N/mm².

2) Die Druckfestigkeit des Mauerwerks darf nicht größer angenommen werden als für Steindruckfestigkeiten $f_{st} = 10$ N/mm².

Tabelle 14. Parameter zur Ermittlung der Druckfestigkeit von Einsteinmauerwerk aus Leichtbeton- und Betonsteinen

Steinsorte		Mittlere Steindruckfestigkeit N/mm ²	Mörtelart	Parameter		
				k	α	β
Vollsteine	V, Vbl	–	NM ¹⁾	0,67	0,74	0,13
	Vbl S, Vbl SW	$2,5 \leq f_{st} < 10,0$	NM II ¹⁾ , IIa ¹⁾	0,68	0,605	0,189
			NM III ¹⁾ , IIIa ¹⁾	0,70		
		$10,0 \leq f_{st} \leq 15,0$	NM IIa ¹⁾ , III ¹⁾ , IIIa ¹⁾	0,79	0,585	0,162
Vn, Vbn Vm, Vmb	–	NM ¹⁾	0,95	0,585	0,162	
Lochsteine	Hbl, Hbn			0,74	0,63	0,10
Voll- und Lochsteine			LM 21 ²⁾ , LM 36 ³⁾	0,79	0,66	–

- 1) Die umgerechnete mittlere Steindruckfestigkeit darf nicht größer angenommen werden als die dreifache Mörtelfestigkeit $f_{st} \leq 3 \cdot f_m$. Die Mörtelfestigkeit darf nicht größer angenommen werden als für Mörtelgruppe III $f_m \leq 10$ N/mm².
- 2) Die Druckfestigkeit des Mauerwerks darf nicht größer angenommen werden als für umgerechnete mittlere Steindruckfestigkeiten $f_{st} = 10$ N/mm².
- 3) Die umgerechnete mittlere Steindruckfestigkeit darf nicht größer angenommen werden als die dreifache Mörtelfestigkeit $f_{st} \leq 3 \cdot f_m$.

Tabelle 15. Parameter zur Ermittlung der Druckfestigkeit von Einsteinmauerwerk aus Porenbeton mit Dünnbettmörtel

Steinart	Mittlere Steindruckfestigkeit N/mm ²	Mörtelart	Parameter		
			k	a	b
Vollsteine aus Porenbeton	$2,5 \leq f_{st} < 5,0$	DM	0,90	0,76	–
	$5,0 \leq f_{st} \leq 10,0$		0,90	0,75	–

5.2 Druckfestigkeit parallel zu den Lagerfugen

Bei biegedruckbeanspruchtem Mauerwerk kann die Längsdruckfestigkeit eine Rolle spielen. Für weiterführende Angaben wird auf [3, 40] verwiesen.

5.3 Zugfestigkeit und -tragfähigkeit

Die Zugfestigkeit von Mauerwerk parallel zu den Lagerfugen wird bei Nachweis zur Gebrauchstauglichkeit benötigt, um z. B. die Gefahr einer Rissbildung abschätzen zu können. Dabei sind zwei Versagensarten zu untersuchen, nämlich das Steinversagen und das Fugenversagen (siehe Gln. 2, 3 a, 3 b).

$$\beta_{Z,mw} \approx \beta_{Z,st}/2 \quad \text{für Steinzugversagen} \quad (2)$$

$$\beta_{Z,mw} \approx \beta_{HS} \cdot \ddot{u}/h_{St} \quad \text{für Fugenversagen ohne Auflast} \quad (3a)$$

$$(\beta_{HS} + \mu \cdot \sigma_D) \cdot \ddot{u}/h_{St} \quad \text{für Fugenversagen mit Auflast} \quad (3b)$$

mit

$\beta_{Z,st}$ Zugfestigkeit des Steins in Längsrichtung

β_{HS} Haftscherfestigkeit

μ Reibungsbeiwert
 σ_D wirksame Auflast
 \ddot{u} Überbindemaß
 h_{St} Steinhöhe

Die zur Berechnung der Zugfestigkeit von Mauerwerk parallel zu den Lagerfugen erforderlichen Kenngrößen sind bereits in den vorhergehenden Abschnitten aufgeführt. Zur Durchführung von Versuchen zur Bestimmung der Zugfestigkeit von Mauerwerk wird auf [8] verwiesen. Untersuchungen zur Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen wurden bislang nur sehr wenige durchgeführt, sodass keine abgesicherten Werte angegeben werden können.

In Tabelle 16 sind die Bandbreiten der Werte aufgeführt. Neuere Erkenntnisse sind noch nicht eingearbeitet.

5.4 Biegezugfestigkeit und -tragfähigkeit

Die Biegezugfestigkeit von Mauerwerk ist von großer Bedeutung bei Ausfachungsflächen und Verblendschalen von zweischaligem Mauerwerk bei Einwirkung von Windlasten (Sog und Druck), aber auch bei mit

Tabelle 16. Mauerwerk; Zugfestigkeit $\beta_{z,p}$ in N/mm² – Zugbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen [41–43], aus [3]

Mauerstein			Mauermörtel		SF	n	$\beta_{z,p}$ (Mittelwerte bzw. Einzelwerte)
Art, Sorte	Format	Festigkeitsklasse	Art	Gruppe			
Mz, KMz	NF	28, 60	NM	Ila, IIIa	vm	5	0,45; 0,51
HLz	2DF	12	NM	II...III	vm	8	0,12; 0,20; 0,21
HLz	2DF	60	NM	III	vm	3	0,82
KS, KS L	2DF, 5DF	12...36	NM	II...III	vm, um	30	0,07...0,41
KS	2DF	20	DM	III	vm	2	0,65
PB	2DF	2, 6	NM	Ila, IIIa	vm	6	0,09; 0,11
PP	2DF, 16DF	2	DM	III	um	4	0,04...0,14
PP	2DF	2	DM	III	vm	1	0,16
Vbl	10DF	2	LM21	Ila	um	1	0,03
V, Vbl	2DF, 8DF	2	NM	II, IIIa	vm	6	0,16; 0,18; 0,24; 0,26
V	2DF	2	DM	III	vm, um	2	0,25; 0,21
V	2DF	12	NM	III	vm	3	0,58
Hbl	10DF	2	NM	Ila	vm	1	0,13
Hbl	10DF	2	LM36	Ila	vm	1	0,17

NM: Normalmörtel; DM: Dünnbettmörtel; LM: Leichtmörtel; SF: Stoßfugen
vm: vermörtelt; um: unvermörtelt; n: Anzahl der Einzelwerte

Erddruck belasteten Kellerwänden. Bei dem anisotropen Baustoff Mauerwerk muss unterschieden werden zwischen der Beanspruchung senkrecht zur Lagerfuge und parallel zur Lagerfuge. In Ausfachungsflächen und bei Verblendschalen treten meist zweiaxiale Beanspruchungen auf, d. h., dass die Biegezugfestigkeiten parallel und senkrecht zu den Lagerfugen bekannt sein müssen.

Ähnlich wie bei der Druckfestigkeitsprüfung von Mauerwerk, die an kleinen, repräsentativen Wandprüfkörpern durchgeführt wird, erfolgt auch die Biegezugprüfung an kleinen Mauerwerkkörpern. Dabei werden die einachsigen Biegezugfestigkeiten parallel und senkrecht zu den Lagerfugen an jeweils gesonderten Prüfkörpern ermittelt (s. dazu [44]). Eine deutsche Prüfnorm für die Bestimmung der Biegezugfestigkeit existiert nicht, in der europäischen Norm DIN EN 1052-2 [45] ist die Biegezugfestigkeit an solchen kleinen wandartigen Mauerwerkkörpern zusammen mit der Auswertung und Bewertung der Versuchsergebnisse beschrieben.

Bei der Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen ist die Haftzugfestigkeit zwischen Stein und Mörtel ausschlaggebend. Eher selten ist die Steinzugfestigkeit in Steinhöhe geringer als die Haftzugfestigkeit zwischen Stein und Mörtel. In Bild 16 sind die verfügbaren Ergebnisse zu Untersuchungen der Biegezugfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge dargestellt. Es fasst die Ergebnisse der Auswertung in [44, 46] zusammen. Neuere Erkenntnisse werden in [30] bekanntgegeben und sind noch nicht eingearbeitet.

Die Bandbreite der Werte ist verhältnismäßig groß, was auf die Versuchsdurchführung einerseits und auf tatsäch-

liche Materialstreuungen andererseits zurückzuführen ist. Für Mauerwerk mit Dünnbettmörtel wird derzeit ein charakteristischer Wert von 0,2 N/mm² diskutiert, der für Normalmörtel konnte bislang nicht festgelegt werden. Für die Nachweisführung der Biegetragfähigkeit ist jedoch ein Wert zwingend erforderlich.

In den Bildern 17 bis 19 sind Auswertungen von Untersuchungsergebnissen zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge für Ziegelmauerwerk (Bild 17), Kalksandsteinmauerwerk (Bild 18) und Porenbetonmauerwerk (Bild 19) dargestellt. Die Ergebnisse machen deutlich, dass ein Wert zwischen 0,15 N/mm² und 0,20 N/mm² auch für Normalmörtel gerechtfertigt ist.

Bei der Biegezugfestigkeit parallel zur Lagerfuge kann sowohl Steinzug- als auch Haftscherversagen eintreten. Generell ist davon auszugehen, dass die Wanddicke und das Überbindemaß, neben den mechanischen Eigenschaften, Einfluss auf die Biegezugfestigkeit des Mauerwerks parallel zu den Lagerfugen ausüben. Eine genauere Analyse geometrischer Einflussgrößen auf die Biegezugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen gibt [30].

Am Institut für Bauforschung wurden im Rahmen der Normungsarbeit folgende Formeln zur Berechnung der Biegetragfähigkeit erarbeitet, die in DIN EN 1996-1-1/NA [7] jedoch keine Berücksichtigung gefunden haben:

Unvermörtelte Stoßfugen

$$f_{x,k2,1} = (0,8 \cdot f_{vk0} + \mu \cdot \sigma_{Dd}) \cdot \ddot{u} / h_{St} \quad (4)$$

$$f_{x,k2,2} = 0,5 \cdot f_{bz} \leq 0,7 \text{ N/mm}^2 \quad (5)$$

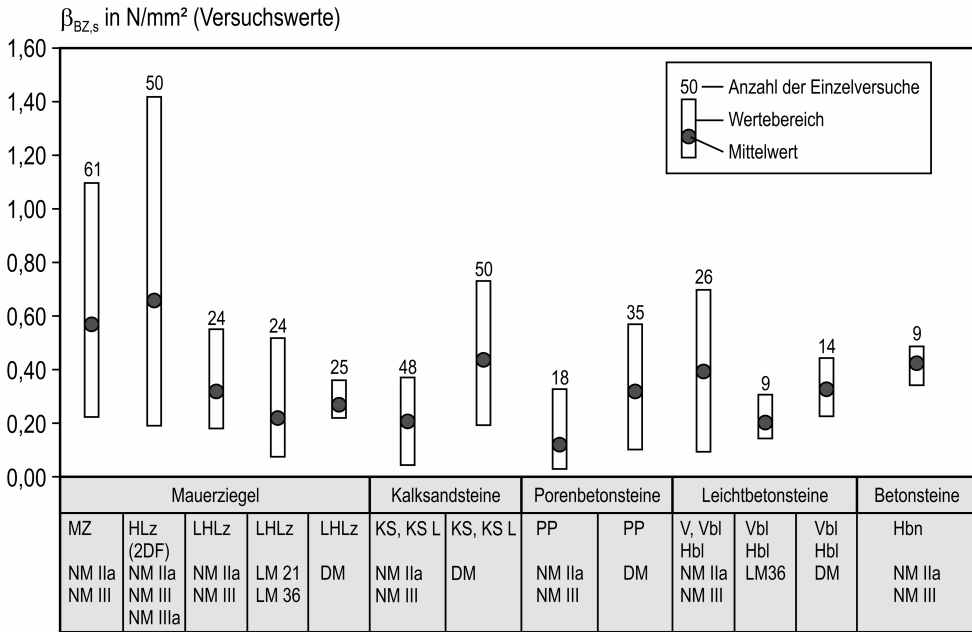


Bild 16. Bandbreite der Biegezugfestigkeitswerte senkrecht zur Lagerfuge, aus [46]

Vermörtelte Stoßfugen

$$f_{x,k2,1} = (1,5 \cdot f_{vk0} + \mu \cdot \sigma_{Dd}) \cdot \ddot{u}/h_{St} \quad (6)$$

$$f_{x,k2,2} = 0,5 \cdot f_{bz} \leq 0,7 \text{ N/mm}^2 \quad (7)$$

mit

f_{vk0} charakteristischer Wert der Anfangsscherfestigkeit in der Lagerfuge (s. Tabelle 17), entspricht der alten Bezeichnung β_{HS} (siehe z. B. 4.2)

μ Reibungsbeiwert: 0,6

σ_{Dd} Bemessungswert der zugehörigen Druckspannung rechtwinkelig zur Lagerfuge

\ddot{u}/h_{st} Verhältnis Überbindemaß/Steinhöhe

f_{bz} Rechenwert der charakteristischen Steinzugfestigkeit = $\delta_i \cdot f_{st}$ (siehe Tabelle 18), in vielen Fällen kann f_{st} , der in Abschnitt 2.1 verwendeten Bezeichnung $\beta_{D,st}$ gleichgesetzt werden.

Durch die Bestimmung von Anfangsscherfestigkeit und Steinlängszugfestigkeit der gewählten Kombination besteht die Möglichkeit, über die Anforderungswerte hinaus höhere Biegezugfestigkeiten zu ermöglichen. Hier muss dann dieser neu zu findende charakteristische Wert über das Verfahren der Zustimmung im Einzelfall abgesichert werden.

Tabelle 17. Charakteristischer Wert der Anfangsscherfestigkeit f_{vk0} in der Lagerfuge in N/mm²

Mörtelart, Mörtelgruppe	NM I	NM II	NM IIa LM 21 LM 36	NM III	NM IIIa	DM 1)
f_{vk0}	0,02	0,07	0,14	0,18	0,21	0,35

1) Für Mauerwerk aus Mauersteinen oder Elementen mit einem Lochanteil größer als 15 % ist der Wert zu halbieren.

Tabelle 18. Faktor zur Berechnung von $f_{bt,cal}$

Steinart	δ_i
Hohlblocksteine	0,020
Hochlochsteine	0,026
Steine mit Grifflöchern oder Griff-taschen	0,026
Vollsteine ohne Grifflöcher oder Griff-taschen	0,032
Porenbeton	$0,082 \cdot \frac{1}{1,25 \cdot \left(0,7 + \left(\frac{f_{st}}{25}\right)^{0,5}\right)}$

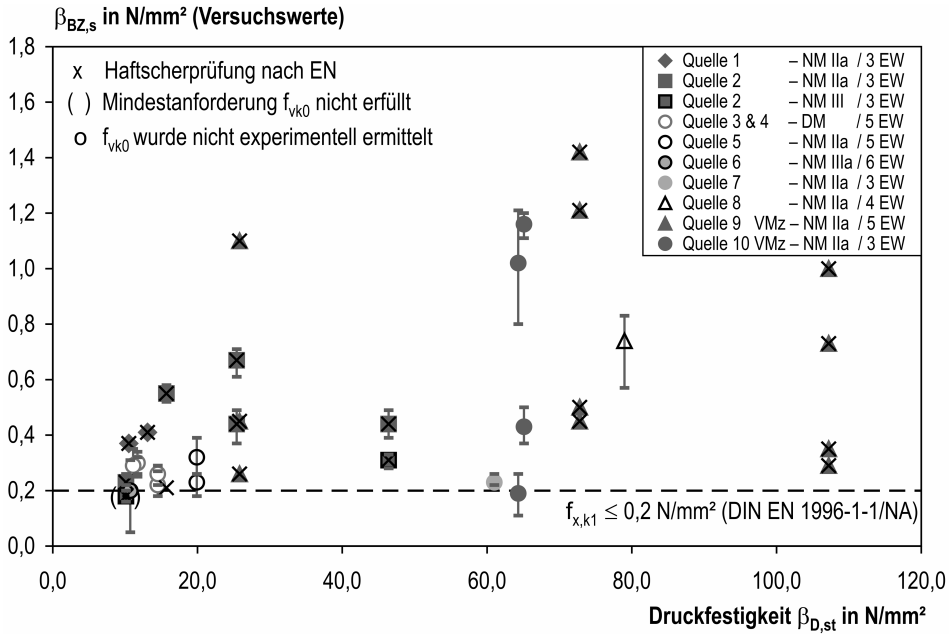


Bild 17. Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen in Abhängigkeit von der Steindruckfestigkeit unter Berücksichtigung von Vormauerziegel-Mauerwerk, Mittelwerte und Streubereich der Einzelwerte, Prüfkörperanzahl, Vergleich der Versuchsergebnisse mit [47]

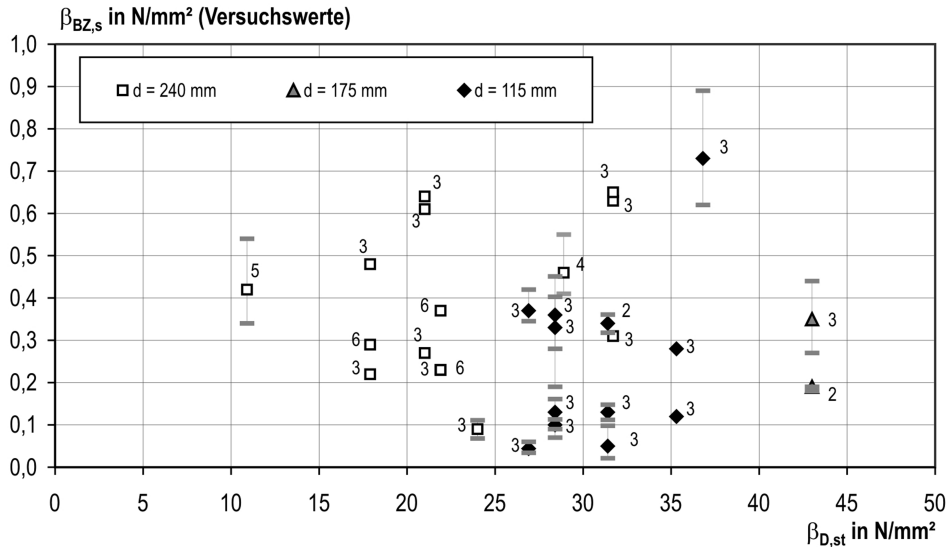


Bild 18. Biegezugfestigkeit von Kalksandsteinmauerwerk senkrecht zu den Lagerfugen in Abhängigkeit von der Steindruckfestigkeit $\beta_{D,st}$ [10]

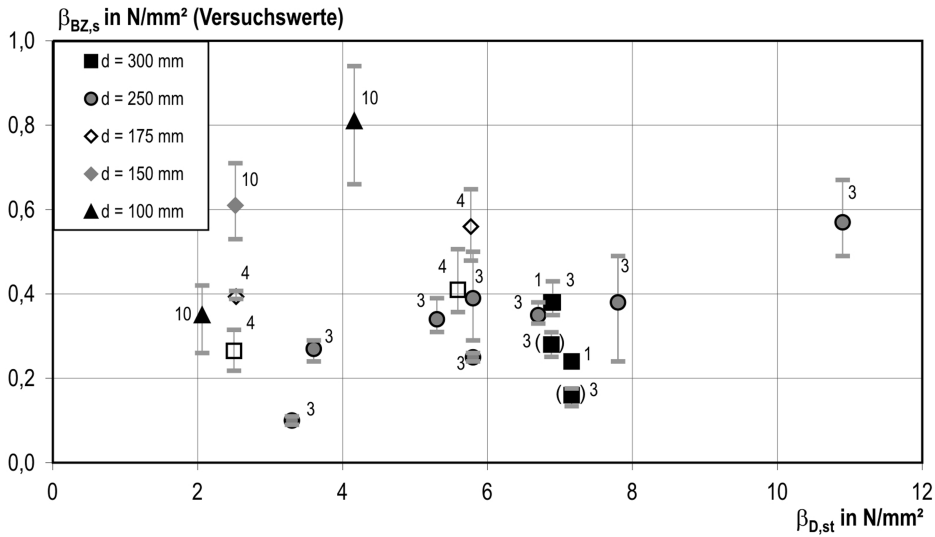


Bild 19. Biegezugfestigkeit von Porenbetonmauerwerk senkrecht zu den Lagerfugen in Abhängigkeit von der Steindruckfestigkeit $\beta_{D,st}$ (mit Formfaktor) [9]

5.5 Verformungseigenschaften

5.5.1 Allgemeines

Die nachfolgenden Kennwerte wurden von *Schubert* [3] zusammengestellt und veröffentlicht. Da sich an der Datenlage nichts verändert hat, werden diese Daten übernommen.

5.5.2 Druckbeanspruchung senkrecht zu den Lagerfugen

5.5.2.1 Druck-E-Modul E_D

Der Elastizitätsmodul ist als Sekantenmodul bei 1/3 der Höchstspannung (Druckspannung senkrecht zu den Lagerfugen) und einmaliger Belastung definiert.

$$E_D = \frac{\max \sigma_D}{3 \cdot \epsilon_1}$$

mit

ϵ_1 Längsdehnung bei 1/3 max σ_D .

Er wird für bestimmte Bemessungsfälle und für die Beurteilung der Rissicherheit benötigt. Ermittelt wird E_D nach DIN 18554-1 [48] bzw. DIN EN 1052-1 [49]. Bezogen auf die Mauerwerkdruckfestigkeit β_D ist im Mittel $E_D = 1000 \cdot \beta_D$. Je nach Stein-Mörtel-Kombination ergeben sich E_D -Werte im Bereich von etwa $500 \cdot \beta_D$ bis $1500 \cdot \beta_D$.

Aus z. T. veröffentlichten Auswertungen [35, 37–39, 50, 51], ergaben sich folgende Zusammenhänge:

- Mauerwerk aus Kalksandstein
 $E_D = 500 \cdot \beta_D$ Normal-, Dünnbettmörtel (grobe Näherung, Streubereich der Einzelwerte etwa 50%)

- Mauerwerk aus Leichtbetonsteinen
 $E_D = 1240 \cdot \beta_D^{0,77}$ Leichtmörtel
 $E_D = 1040 \cdot \beta_D$ Normalmörtel
 $E_D = 930 \cdot \beta_D$ Dünnbettmörtel bzw.
 $E_D = 600 \cdot \beta_{D,st}$ Dünnbettmörtel
 (Streubereich der Einzelwerte etwa $\pm 20\%$)

- Mauerwerk aus Porenbetonsteinen
 $E_D = 520 \cdot \beta_D$ Normalmörtel bzw.
 $E_D = 570 \cdot \beta_{D,st}^{0,69}$ Normalmörtel
 (Streubereich der Einzelwerte etwa $\pm 50\%$)
 $E_D = 560 \cdot \beta_D$ Dünnbettmörtel bzw.
 $E_D = 470 \cdot \beta_{D,st}^{0,86}$ Dünnbettmörtel bzw.
 $E_D = 350 \cdot \beta_{D,st}$ Dünnbettmörtel
 (Streubereich der Einzelwerte etwa $\pm 20\%$)

- Mauerwerk aus Leichthochlochziegeln
 $E_D = 1480 \cdot \beta_D$ Leichtmörtel
 $E_D = 1170 \cdot \beta_D$ Normalmörtel
 $E_D = 1190 \cdot \beta_D$ Dünnbettmörtel bzw.
 $E_D = 460 \cdot \beta_{D,st}$ Dünnbettmörtel
 (Streubereich der Einzelwerte etwa $\pm 50\%$)
 $\beta_{D,st}$ Steindruckfestigkeit
 E_D, β_D Bezogen auf Mauerwerk mit Schlankheit $\lambda = 10$

In Tabelle 19 sind unter Bezug auf die neuesten Auswertungen E_D -Werte für Mauerwerk aus Normal-, Leicht- und Dünnbettmörtel angegeben. Für die Berechnung der E_D -Werte wurden Stein- und Mörteldruckfestigkeitswerte zugrunde gelegt, die jeweils 10% größer sind als die Mindestmittelwerte nach Norm.

Tabelle 19. Mauerwerk; Druck-E-Modul E_D gerundet in 10^3 N/mm² (Druckbeanspruchung senkrecht zu den Lagerfugen) [35, 37–40, 51, 52]

Mauersteine			Mauermörtel					
Steinsorte	DIN V	Festigkeits- klasse	Normalmörtel, Gruppe				Leichtmörtel	Dünnbettmörtel
			II	IIa	III	IIIa		
HLz, Mz (HD-Ziegel- Rohdichteklasse $\rho_N \leq 1,2$)	105-100	4	–	–	–	–	2,5	4,0
		6	–	–	–	–	4,0	4,5
		8	–	–	–	–	5,0	5,5
		12	3,5	5,0	6,0	8,0	6,5	
		20	5,0	6,5	8,5	11,0		
		28	6,5	8,5	10,5	13,5		
		36	–	–	12,5	16,0	–	–
		48	–	–	15,0	19,0		
		60	–	–	18,0	22,5		
Leichthochloch- ziegel	105-100 und Zulassung	4	2,0	2,5	3,0	4,5	3,0	2,5
		6	2,5	3,5	4,5	6,0	4,0	4,0
		8	3,0	4,0	5,5	7,5	5,0	5,0
		12	4,5	6,0	8,0	10,0	6,5	7,5
		20	7,0	9,0	12,0	15,0	9,0	–
KS	106	4	1,9	2,2	2,5	2,9		
		6	2,6	3,0	3,4	4,0		
		8	3,2	3,7	4,2	4,9		
		12	4,3	5,0	5,7	6,6		
		20	6,3	7,2	8,4	9,7	–	8,0
		28	8,1	9,3	10,7	12,4		10,0
		36	9,7	11,2	12,9	15,0		
		48	12,0	13,9	16,0	18,5		
		60	14,2	16,4	18,9	21,8		
KS L	106	12	3,2	3,7	4,2	4,9		
		20	5,0	5,8	6,6	7,7	–	–
		28	6,1	7,0	8,0	9,3		
Hbl	18151-100	2	2,2	2,2	2,3	–	2,2	2,0
		4	3,5	3,6	3,8	–	3,0	3,5
		6	4,6	4,8	5,0	–	3,6	4,5
		8	5,6	5,9	6,1	–	4,1	–
V, Vbl	18152-100	2	2,2	2,4	2,5	–	2,0	1,6
		4	3,7	3,9	4,1	–	3,0	3,3
		6	4,9	5,2	5,6	–	3,7	5,0
		8	6,0	6,4	6,8	–	4,3	6,6
Hbn	18153-100	4	4,5	5,8	7,6	–		
		6	5,8	7,5	9,8	–		
		8	6,9	9,0	11,7	15,2	–	–
		12	8,8	11,5	15,0	19,5		
PB, PP	4165-100	2	1,1	–	–	–	–	1,1
		4	1,8	–	–	–	–	2,0
		6	2,4	–	–	–	–	2,9
		8	3,0	–	–	–	–	3,7

Tabelle 20. Mauerwerk; Druck-E-Modul E_D gerundet in Abhängigkeit vom Grundwert der zulässigen Druckspannung σ_0 nach DIN 1053-1 [1] $E_D = k \cdot \sigma_0$ bzw. $E_D = k/3 \cdot f_k$

Mauerstein	k-Werte	
	Rechenwert	Wertebereich
Mauerziegel	3500	3000...4000
Kalksandsteine	3000	2500...4000
Leichtbetonsteine	5000	4000...5500
Betonsteine	7500	6500...8500
Porenbetonsteine	2500	2000...3000

Die Tabelle 20 enthält E_D -Werte in Abhängigkeit vom Grundwert der zulässigen Druckspannung nach DIN 1053-1 [1].

Durch die Division der Werte für σ_0 mit dem Faktor 3 können auch bei Verwendung des Teilsicherheitskonzepts mit f_k -Werten entsprechende Elastizitätsmodul abgeschätzt werden.

5.5.2.2 Querdehnungszahl μ_D und Dehnung bei Höchstspannung $\varepsilon_{u,D}$

Die Eigenschaftswerte μ_D und $\varepsilon_{u,D}$ für auf Druck senkrecht zu den Lagerfugen beanspruchtes Mauerwerk können bei der Prüfung nach DIN 18554-1 bzw. DIN EN 1052-1 mitbestimmt werden. Vorliegende Zahlenwerte enthält Tabelle 21.

5.5.2.3 Völligkeitsgrad α_0

Der geometrische Völligkeitsgrad α_0 im Bereich der Spannungs-Dehnungs-Linie bis zur Höchstspannung (Druckfestigkeit $\beta_{D,mw}$) bzw. zur Dehnung bei Höchst-

spannung $\varepsilon_{u,D}$ ist ein Maß für die Nichtlinearität der σ - ε -Linie im ansteigenden Ast und kann aus

$$\alpha_0 = 1/(\varepsilon_{u,D} \cdot \beta_{D,mw}) \cdot \int_0^{\varepsilon_{u,D}} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (8)$$

errechnet werden.

In Tabelle 21 sind α_0 -Werte angegeben.

5.5.3 Druckbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen

5.5.3.1 Druck-E-Modul $E_{D,p}$

Der E-Modul $E_{D,p}$ wird wie in Abschnitt 5.5.2.1 beschrieben ermittelt. Aus den wenigen vorliegenden auswertbaren Versuchsergebnissen lassen sich für Mauerwerk mit vermörtelten Stoßfugen folgende Zusammenhänge zwischen Druckfestigkeit parallel zu den Lagerfugen und dem E-Modul als *Anhaltswerte* herleiten:

- Mauerwerk aus Kalksandsteinen

$$E_{D,p} = 300 \cdot \beta_{D,p} \text{ (Kalksandvollsteine)}$$

$$E_{D,p} = 700 \cdot \beta_{D,p} \text{ (Kalksandlochsteine)}$$

(Streubereich der Einzelwerte etwa $\pm 50\%$)

- Dünnbettmauerwerk aus Porenbeton-Plansteinen

$$E_{D,p} = 600 \cdot \beta_{D,p}$$

(Streubereich der Einzelwerte etwa $\pm 30\%$)

Der Zusammenhang entspricht etwa dem bei Druckbeanspruchung senkrecht zu den Lagerfugen. Für Mauerwerk mit unvermörtelten Stoßfugen ergaben sich, bei allerdings sehr wenigen Versuchswerten, etwa halb so hohe E-Modul-Werte wie bei Mauerwerk mit vermörtelten Stoßfugen.

5.5.3.2 Dehnung bei Höchstspannung $\varepsilon_{u,D,p}$

Anhaltswerte für $\varepsilon_{u,D,p}$ sind:

- Mauerwerk aus Hochlochziegeln: 2,3 mm/m,
- Mauerwerk aus Kalksandvollsteinen: 3,5 mm/m,

Tabelle 21. Mauerwerk; Querdehnungszahl μ_D , Dehnungswerte bei Höchstspannung $\varepsilon_{u,D}$ in mm/m und Völligkeitsgrad α_0 (Druckbeanspruchung senkrecht zu den Lagerfugen, Normalmörtel) [14, 15, 50]

Mauersteine		μ_D		$\varepsilon_{u,D}$		α_0	
Steinsorte	DIN V	Rechenwert	Wertebereich	Rechenwert	Wertebereich	Rechenwert	Wertebereich
HLz	105-100	0,1	0,05...0,23	1,8	1,0...2,6	0,55	0,51...0,65
KS, KS L	106	0,1	0,07...0,12	2,5	1,3...3,9	0,65	0,57...0,75
Hbl	18151-100	0,2	0,11...0,34	1,6	0,9...2,5	0,60	0,57...0,68
V, Vbl	18152-100			1,7	0,6...4,0		
Hbn	18153-100	0,2	–	1,0	0,5...2,5	0,65	0,63...0,70
PB, PP	4165	0,25	0,17...0,32	2,0	1,4...3,7	0,55	0,53...0,60
PP	4165-100	–	–	1,8	1,5...2,2	–	–

- Mauerwerk aus Kalksandlochsteinen: 2,2 mm/m,
- Dünnbettmauerwerk aus Porenbeton-Plansteinen: 2,8 mm/m.

Die $\varepsilon_{u,D,p}$ -Werte für Mauerwerk mit unvermörtelten Stoßfugen sind deutlich höher als die von Mauerwerk mit vermörtelten Stoßfugen (rd. 30 bis 80%).

5.5.4 Zug-E-Modul E_z (Zugbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen)

Der Zug-E-Modul wird analog zum Druck-E-Modul als Sekantenmodul bei 1/3 der Höchstspannung und der bei dieser Spannung auftretenden Dehnung definiert.

$$E_{z,p} = \frac{\max \sigma_z}{3 \cdot \varepsilon_{1,z}}$$

Er wird vor allem für die Beurteilung der Rissicherheit benötigt. Nach Versuchsergebnissen, im Wesentlichen aus [41, 42], kann $E_{z,p}$ für Mauerwerk aus Normalmörtel mit vermörtelten Stoßfugen näherungsweise wie folgt aus der Mauerwerkzugfestigkeit $\beta_{z,p}$ bestimmt werden [43] (Best.: Bestimmtheitsmaß):

- Mauerwerk aus Kalksandsteinen
 $E_{z,p} = 24\,500 \cdot \beta_{z,p}$ (Best.: 77%)
- Mauerwerk aus Mauerziegeln
 $E_{z,p} = 15\,300 \cdot \beta_{z,p}$ (Best.: 99%)
- Mauerwerk aus Leichtbetonsteinen
 $E_{z,p} = 14\,800 \cdot \beta_{z,p}$ (Best.: 99%)
- Mauerwerk aus Porenbeton-Plansteinen PP2 und Dünnbettmörtel
 $E_{z,p} = 13\,000 \cdot \beta_{z,p}$ (sehr unsicher)

Druck- und Zugelastizitätsmodul weichen etwas voneinander ab, da die σ - ε -Linien bei Druck- und Zugbeanspruchung unterschiedlich nichtlinear sind.

Der Sekantenmodul bei max. σ_z ist bis auf sehr wenige Ausnahmen deutlich niedriger als $E_{z,p}$, s. [43].

5.5.5 Feuchtedehnung ε_f (Schwinden ε_s , irreversibles Quellen ε_q), Kriechen (Kriechzahl φ), Wärmedehnungskoeffizient α_T

Die Verformungskennwerte werden vorwiegend für die Beurteilung der Rissicherheit, z. T. aber auch für Bemessungsfälle, benötigt. Zur Ermittlung der Kennwerte existiert derzeit keine Prüfnorm bzw. Richtlinie. Einen Vorschlag für ein Schwindprüfverfahren für Mauersteine enthält [17].

In Tabelle 22 sind Endwerte für Feuchtedehnung ($\varepsilon_{f,\infty}$) und Kriechen (φ_∞) sowie α_T -Werte als „Rechenwerte“ (in etwa häufigste Werte) und in der Regel zutreffende Wertebereiche angegeben (s. auch DIN 1053-1 [1]). Die Wertebereiche können in Ausnahmefällen größer sein. Die Werte gelten für Mauerwerk mit Normalmörtel. Sie können näherungsweise auch für Mauerwerk mit Leicht- und Dünnbettmörtel angenommen werden. Empfohlen wird, für Leichtmauerwerk die in Tabelle 23 angegebenen Werte anzusetzen.

Die Zahlenwerte gelten für Mauerwerk mit Normalmörtel. Die $\varepsilon_{f,\infty}$ - und α_T -Werte können sowohl in Richtung senkrecht zu den Lagerfugen als auch in Richtung parallel zu den Lagerfugen angesetzt werden. Die φ_∞ -Werte gelten für Druckbeanspruchung senkrecht zu den Lagerfugen. Für Leichtmauerwerk mit Leicht- bzw. Dünnbettmörtel sind die Auswertergebnisse neuester Versuche in Tabelle 23 zusammengestellt. Der Kenntnisstand über Feuchtedehnung, Kriechen und Wärmedehnung ist zusammen mit neuesten Auswertergebnissen und Hinweisen für Prüfverfahren in [17] dargestellt.

Die Tabellen 24 und 25 enthalten Endschwindwerte mit statistischen Kennzahlen aus [16].

Tabelle 22. Mauerwerk; Endwerte der Feuchtedehnung $\varepsilon_{f,\infty}$, Endkriechzahl φ_∞ und Wärmedehnungskoeffizient α_T [16, 22, 24], s. auch DIN 1053-1:1996-11 [2], aus [3]

Mauersteine		$\varepsilon_{f,\infty}$ ¹⁾		φ_∞		α_T	
Steinart	DIN V	Rechenwert	Wertebereich ²⁾	Rechenwert	Wertebereich	Rechenwert	Wertebereich
		mm/m					
Mauerziegel	105-100	0	+0,3...-0,2 ³⁾	1,0	0,5...1,5	6	5...7
Kalksandsteine	106	-0,2	-0,1...-0,3	1,5	1,0...2,0	8	7...9
Leichtbetonsteine	18151-100 18152-100	-0,4	-0,2...-0,5	2,0	1,5...2,5	10; 8 ⁴⁾	8...12
Betonsteine	18153-100	-0,2	-0,1...-0,3	1,0	–	10	8...12
Porenbetonsteine	4165-100	-0,2	+0,1...-0,3	1,5	1,0...2,5	8	7...9

1) Vorzeichen minus: Schwinden, Vorzeichen plus: Quellen

2) Bereich üblicher Werte

3) Für Mauerwerk aus kleinformatigen Mauersteinen (≤ 2 DF), sonst -0,1

4) Für Leichtbetonsteine mit überwiegend Blähton als Gesteinskörnung

Tabelle 23. Leichtmauerwerk; Endwerte der Feuchtedehnung $\varepsilon_{\text{foor}}$ Endkriechzahlen φ_{oor} Lagerungsklima 20/65 (s. auch [17, 38]), aus [3]

Mauerstein		Mauermörtel	Anzahl d. Versuchs-serien	$\varepsilon_{\text{foor}}^{1)}$		φ_{oor}	
Steinart/-sorte	DIN V			Rechenwert	Wertebereich ²⁾	Rechenwert	Wertebereich ²⁾
				mm/m			
HLz ³⁾	105-100	Leichtmörtel	4	+0,1	0 bis +0,3	2,0	1,1 bis 2,7
		Dünnbettmörtel	1	–	0	–	0,1
PP	4165-100	Dünnbettmörtel	10	–0,1	–0,2 bis +0,1	0,5	0,2 bis 0,7
Vbl	18151-100	Leichtmörtel	1	–	bis –0,6	–	2,3
		Dünnbettmörtel	1	–	bis –0,6	–	1,9

1) Vorzeichen minus: Schwinden, Vorzeichen plus: Quellen

2) Bereich der vorliegenden Versuchswerte

3) Rohdichteklassen $\rho_N \leq 1,00$ **Tabelle 24.** Kalksandsteine und Kalksandsteinmauerwerk; Engschwindwerte ε_{soo} in mm/m, Schwindklima 20/65 [3]

Statistischer Kennwert	Einzelsteine		Mauerwerk	
	H ¹⁾	W ²⁾	H ¹⁾	W ²⁾
n	8	146	8	11
x	0,14	0,30	0,16	0,26
min x	0,03	0,10	0,01	0,13
max x	0,22	0,52	0,29	0,42
x ₁₀	–	0,18	–	0,07
x ₉₀	0,31	0,42	0,42	0,46

1) H: Steine etwa herstellfeucht

2) W: wasservorgelagerte Steine; bei Einzelsteinen: 2 d Wasser; Steine für Mauerwerk: 2 d Wasser, 1 d Raumluft

n Anzahl der Versuchsreihen

x min x, max x: Mittel-, Kleinst-, Größtwert

x₁₀, x₉₀ 10%-, 90%-Quantilwert**Tabelle 25.** Leichtbetonsteine und Leichtbetonmauersteinwerk; Endschwindwerte ε_{soo} in mm/m, Schwindklima 20/65, hoher Anfangsfeuchtegehalt der Steine (in der Regel Wasservorlagerung) [3]

Statistischer Kennwert	Hbl, V, Vbl		KLB ¹⁾	
	Einzelsteine	Mauerwerk	Einzelsteine	Mauerwerk
n	19	24	3	9
x	0,40	0,41	0,25	0,32
min x	0,16	0,23	0,17	0,23
max x	0,67	0,57	0,33	0,49
x ₁₀	0,11	0,24	–	0,09
x ₉₀	0,67	0,58	–	0,55

1) Klimaleichtblöcke

6 Feuchtigkeits-technische Kennwerte von Mauersteinen, Mauermörtel und Mauerwerk

6.1 Kapillare Wasseraufnahme

Die Wasseraufnahmefähigkeit von Mauersteinen, Mauermörtel und Putz kann durch die kapillare Wasseraufnahme bzw. den Wasseraufnahmekoeffizienten ω gekennzeichnet werden. Diese sind wichtige Kenngrößen für die Beurteilung des Wasserabsaugens – aus dem Fugenmörtel bzw. aus dem Putzmörtel durch den Mauerstein – für die Wasseraufnahme von Sichtflächen bei Beregnung, vor allem bei Schlagregen (→Anforderun-

gen an den Wasseraufnahmekoeffizienten von Außenputzen) sowie für die Beurteilung des Austrocknungsverhaltens.

Werden Mauersteine mit hoher Wasseraufnahmefähigkeit – gekennzeichnet durch hohe Wasseraufnahmekoeffizienten ω – vor dem Vermörteln nicht vorgemischt, so kann dem Mörtel nach dem Vermauern zu viel Wasser entzogen werden. Mögliche Folgen sind zu geringe Verbundfestigkeit zwischen Mauermörtel und Mauerstein (Haftscher- und Haftzugfestigkeit) und zu geringe Mörteldruckfestigkeit in der Fuge. Deshalb sollen auch nach DIN 1053-1 Mauersteine mit hoher Wasseraufnahmefähigkeit vor dem Vermörteln vorgemischt werden. Dies trifft stets für Mauersteine mit einem hohen Anteil

Tabelle 26. Mauersteine; Wasseraufnahmekoeffizient ω ermittelt nach DIN 52617 [3]

Mauerstein	n	Mittlerer Wert	Wertebereich
		kg/(m ² · h ^{0,5})	
Mauerziegel	36		4...16
Kalksandsteine	42	3	1,5...20
Porenbetonsteine	5		3...9
Leichtbetonsteine	7		1...2
Betonsteine	1		2

n Anzahl der Versuchswerte

an kleinen Kapillarporen und geringem Feuchtegehalt vor dem Vermörteln zu (Kalksandsteine). Die kapillare Wasseraufnahme wird i. d. R. nach DIN EN ISO 15148 [53] – bisher DIN 52617:1987-05 – geprüft. Ausgehend vom getrockneten Zustand wird bei ständigem Wasserkontakt der Saugfläche der zeitliche Verlauf der Wasseraufnahme ermittelt. Dieser ist im Allgemeinen im Wurzelmaßstab annähernd linear. Der Anstieg wird durch den Wasseraufnahmekoeffizienten ω in kg/(m² · h^{0,5}) gekennzeichnet.

Tabelle 26 enthält ω -Werte von Mauersteinen. Die Ergänzung der Tabelle sowie Angaben für Putze sind in den folgenden Ausgaben vorgesehen.

6.2 Wasserdampfdurchlässigkeit

Die Wasserdampfdurchlässigkeit kann durch die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ gekennzeichnet werden. Der Wert μ gibt an, um wieviel mal größer der Diffusionswiderstand eines Materials ist als der einer gleichdicken Luftschicht. Die μ -Werte werden zur Beurteilung der Tauwasserbildung und der Austrocknung in Bauteilen – vor allem Außenbauteilen – benötigt. Die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl wird i. d. R. nach DIN EN ISO 12572 [54] ermittelt.

Tabelle 27 enthält μ -Werte aus DIN 4108-4 [55].

7 Natursteine, Natursteinmauerwerk

Die Bedeutung von Natursteinmauerwerk im Vergleich zu Mauerwerk aus künstlichen Steinen ist für den Neubereich gering, jedoch für die Erhaltung von wertvollen Bauwerken groß. Gerade auch im letztgenannten Anwendungsbereich ist die Kenntnis der wichtigsten Festigkeits- und Verformungseigenschaften sowie feuchtetechnischer Kennwerte häufig wesentliche Voraussetzung für eine erfolgreiche Instandsetzung und Erhaltung der Bauwerke. Es ist deshalb sinnvoll, vorliegende Werteangaben über die Druck- und Biegezugfestigkeit, den Druck-E-Modul, den Schleifverschleiß als Kennwert für das Abnutzungsverhalten, den Wär-

Tabelle 27. Mauerwerk; Wasserdampf-Diffusionswiderstand μ nach DIN V 4108-4:2007-06 [55]

Mauersteine	ρ_N	μ
Vollklinker, Hochlochklinker, Keramikklinker	$\geq 1,80$ $\leq 2,40$	50/100
Vollziegel, Hochlochziegel, Füllziegel	$\geq 1,80$ $\leq 2,40$	5/10
Hochlochziegel DIN V 105-100, DIN V 105-6	$\geq 0,55$ $\leq 1,00$	5/10
Kalksandsteine	$\geq 1,00$ $\leq 1,40$	5/10
	$\geq 1,60$ $\leq 2,20$	15/25
Porenbetonsteine	$\geq 0,35$ $\leq 0,80$	5/10
Hohlblöcke aus Leichtbeton	$\geq 0,45$ $\leq 1,60$	5/10
Vollsteine und Vollblöcke aus Leichtbeton	$\geq 0,45$ $\leq 1,40$	5/10
	$\geq 1,60$ $\leq 2,00$	10/15
Betonsteine	$\geq 0,80$ $\leq 1,20$	5/15
	$\geq 1,40$ $\leq 2,40$	20/30

ρ_N Rohdichteklasse Mauersteine

medehnungskoeffizienten, die Schwind- und Quelldehnung sowie die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck und die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl zusammenzustellen (s. Tabellen 28 bis 30). Die Zahlenangaben stammen im Wesentlichen aus [56-58]. Für vulkanische Tuffsteine lagen umfangreiche Untersuchungsergebnisse aus [59] vor.

Bemessungsgrundlagen, d. h. im Wesentlichen Angaben zur zulässigen Beanspruchung von Tuffsteinmauerwerk, können [60] entnommen werden. Informationen, die der weiteren Vervollständigung und Aktualisierung der Eigenschaftswerte dienen, werden gern berücksichtigt. Verschiedene Eigenschaftswerte finden sich auch in [61].

8 Eigenschaftswerte von Putzen (Außenputz)

8.1 Allgemeines

Der Außenputz als „Außenhaut“ des Gebäudes soll vor allem ein Eindringen von Niederschlagsfeuchte sicher und dauerhaft verhindern, also den ausreichenden Feuchteschutz gewährleisten. Voraussetzung dafür ist,

Tabelle 28. Natursteine; Druckfestigkeit β_D , Biegezugfestigkeit β_{BZ} , Druck-E-Modul E_D , Schleifverschleiß – Anhaltswerte, aus [3]

Naturstein	β_D	β_{BZ}	E_D 10 ³ N/mm ²	Schleifverschleiß cm ³ /50 cm ²
	N/mm ²			
Granit, Syenit	160...240	10...20	40...60	5...8
Diorit, Gabbro	170...300	10...22	100...120	
Porphyre	180...300	15...20	20...160	
Basalt	250...400	15...25	50...100	
Basaltlava	80...150	8...12		12...15
Diabas	180...250	15...25	60...120	5...8
Quarzit, Grauwacke	150...300	13...25	50...80	5...10
Quarzitische Sandsteine	120...200	12...20	20...70	
Sonstige Sandsteine	30...180	3...15	5...30	10...30
Dichte Kalksteine, Dolomite, Marmor	80...180	6...15	60...90	15...40
Sonstige Kalksteine	20...90	5...8	40...70	35...100
Travertin	20...60	4...10	20...60	
Vulkanische Tuffsteine	5...25	1...4	4...10	20...60
Gneise, Granulit	160...280	13...25	30...80	4...10
Serpentin	140...250	25...35		5...20

Tabelle 29. Natursteine; Wasseraufnahme bei Atmosphärendruck W_a und Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahlen¹⁾

Naturstein	W_a M.-%	μ (0/50)	μ (50/100)
Granit, Syenit	0,2...0,5	> 400	> 20
Diorit, Gabbro	0,2...0,4		
Porphyre	0,2...0,7		
Basalt	0,1...0,3		
Basaltlava	4...10		
Diabas	0,1...0,4		
Trachyt			
Quarzit, Grauwacke	0,2...0,5	> 400	> 20
Quarzitische Sandsteine	0,2...0,6	20...50	8...20
Sonstige Sandsteine	0,2...9		
Dichte Kalksteine	0,2...0,6	50...200	20...40
Sonstige Kalksteine	0,2...10		
Travertin	2...5		
Vulkanische Tuffsteine	6...15	10	
Tonschiefer	0,5...0,6		
Gneise, Granulit	0,1...0,6		
Serpentin	0,1...0,7		

1) siehe auch DIN EN 12524 [62]

 μ (0/50): Trockenbereich μ (50/100): Feuchtbereich**Tabelle 30.** Natursteine; Wärmedehnungskoeffizient α_T , Schwind- und Quelldehnung $\varepsilon_s, \varepsilon_q$ -Anhaltswerte, aus [3]

Naturstein	α_T 10 ⁻⁶ /K	$\varepsilon_s, \varepsilon_q$ mm/m
Granit, Syenit	5...11	0...0,2
Diorit, Gabbro	4...8	
Porphyre	5	
Basalt	5...8	0,4
Basaltlava		
Diabas	4...7	0...0,2
Trachyt	12,5	
Quarzit, Grauwacke	10...12	0...0,1
Quarzitische Sandsteine, sonstige Sandsteine	8...12	0,3...0,7
Dichte Kalksteine, Dolomite, Marmor	5...10	
Sonstige Kalksteine	4...12	0,1...0,2
Travertin		
Vulkanische Tuffsteine	6...10	0,2...0,6
Gneise, Granulit		
Serpentin		0,1...0,2

dass der Außenputz wasserabweisend eingestellt ist und frei von Rissen bleibt, über die Wasser in den Putzgrund eindringen kann. Derartige „schädliche“ Risse mit einer Rissbreite ab meist 0,2 mm können die Funktionsfähigkeit der Gebäudehülle beeinträchtigen (Verringerung des Wärmeschutzes, Feuchteschäden, Frostschäden) und müssen deshalb sicher vermieden werden.

Schädliche Risse können durch verschiedene Ursachen entstehen [63], so durch Unverträglichkeiten von Putz und Putzgrund. Grundsätzlich gilt, dass der Putz „weicher“ als der Putzgrund sein muss, damit breitere, schädliche Risse vermieden werden. Um dies sicherzustellen, müssen die dafür wesentlichen mechanischen und physikalischen Putzeigenschaften bekannt sein. Diesbezügliche Prüfverfahren sind in [63, 64] aufgeführt. Die Beurteilung, ob schädliche Risse auftreten können, ist in guter Näherung rechnerisch möglich [63]. Nachfolgend werden die derzeit bekannten Eigenschaftswerte und Eigenschaftszusammenhänge angegeben. Da sich diese mehr oder weniger für Putzmörtel (ohne Kontakt zum Putzgrund) und Putz auf Putzgrund unterscheiden können, wird entsprechend differenziert.

8.2 Festigkeitseigenschaften

8.2.1 Druckfestigkeit β_D

Die Druckfestigkeit ist in DIN EN 998-1 [65] bzw. DIN V 18550 [66] klassifiziert. Bei *Putzmörtel* nimmt β_D im Allgemeinen bis zum Alter von 28 d zu. Der Feuchtezustand beeinflusst β_D deutlich: Im nassen Zustand ist β_D im Mittel um rd. 25% kleiner als im lufttrockenen Zustand. Die Druckfestigkeit von *Putz auf Putzgrund* kann sich – abhängig von Art und Feuchtezustand des Putzgrundes – wesentlich von der Druckfestigkeit des *Putzmörtels* unterscheiden.

8.2.1 Zugfestigkeit β_Z

Bei *Putzmörtel* nimmt β_Z meist bis zum Alter von 28 d zu. Der Einfluss des Feuchtezustandes ist geringer als bei der Druckfestigkeit: Im Mittel verringert sich β_Z um rd. 15% vom lufttrockenen zum nassen Zustand.

8.3 Verformungseigenschaften

8.3.1 Zug-E-Modul E_Z , dynamischer E-Modul dyn E

Der Zug-E-Modul $E_{Z,33}$ von *Putzmörteln* ist im Mittel rd. 10% höher als der E-Modul bei Höchstspannung, d.h. die Spannungs-Dehnungs-Linie ist leicht gekrümmt. Der dynamische E-Modul und $E_{Z,33}$ unterscheiden sich um maximal $\pm 10\%$, im Mittel sind beide gleich groß.

8.3.2 Zugbruchdehnung $\varepsilon_{Z,u}$

Für *Putzmörtel* wurden folgende $\varepsilon_{Z,u}$ -Werte in mm/m ermittelt [3]:

- Normalputz:
0,15 bis 0,27; im Mittel: 0,21
- Leichtputz:
0,11 bis 0,23; im Mittel: 0,18

8.3.3 Zugrelaxation ψ

Der Abbau von Zugspannungen durch Relaxation lässt sich mit der Relaxationszahl ψ kennzeichnen:

$$\psi = 1 - \frac{\sigma_t}{\sigma_0}; \quad \psi_\infty = 1 - \frac{\sigma_\infty}{\sigma_0}$$

σ_t, σ_∞ Zugspannung nach der Zeit t, nach $t = \infty$
 σ_0 anfängliche Zugspannung

Zugspannungen im *Putzmörtel* verringern sich sehr schnell und in hohem Anteil durch Relaxation. Nach 100 h wurde ein Spannungsabbau um 20 bis 60% festgestellt.

Die ψ -Werte betragen bei allerdings sehr wenigen Versuchen [3]:

- Normalputz:
0,12 (Spannungsabbau um rd. 90%)
- Leichtputz:
0,06...0,27 (Spannungsabbau um 90 bis 70%).

8.3.4 Schwinden ε_s , Quellen ε_q

Schwind- und Quellwerte von *Putzmörteln* enthält Tabelle 31. Das Schwinden ist meist nach drei Monaten beendet. Das zweite Schwinden – nach dem Erstsichwinden und darauffolgendem Quellen – ist deutlich kleiner als das Erstsichwinden, nach vorliegenden Werten um etwa 50%. *Putz auf Putzgrund* schwindet erheblich weniger als *Putzmörtel*; und zwar um 30 bis 80%, meistens um 70%.

Tabelle 31. Endsichwindwerte und Quellwerte von Putzmörteln, aus [3]

Putzart	Endsichwindwerte (Normalklima 20/65)	Quellwerte (nach 2 d Wasserlagerung)
	mm/m	
Normalputz		
– Kalk-Zement	0,56...1,20	0,12...0,41
– Zement	0,99 / 1,22	0,22 / 0,24
Leichtputz	0,88...2,22	0,14...0,58

8.4 Eigenschaftszusammenhänge

In Tabelle 32 sind Zusammenhänge zwischen verschiedenen Eigenschaften angegeben. Wie aus der Tabelle zu entnehmen ist, kann in erster grober Näherung davon ausgegangen werden, dass die Zusammenhänge für den *Putzmörtel* in etwa auch für den *Putz auf Putzgrund*

Tabelle 32. Außenputze; Eigenschaftszusammenhänge, aus [3]

Zusammenhang zwischen	Putzmörtel (PM) Putz auf Putzgrund (PG)	Putzart Normalputz (NP) Leichtputz (LP)	Zusammenhang	Korrelationskoeffizient R^2
Zugfestigkeit β_Z – Druckfestigkeit β_D	PM	NP, LP	$\beta_Z = 0,15 \beta_D$	0,92
	PG	NP	$\beta_Z = 0,09 \beta_D$	0,89
		LP	$\beta_Z = 0,16 \beta_D^{1)}$ $\beta_Z = 0,11 \beta_D^{1)}$	0,95 0,96
Zug-E-Modul $E_{Z,33}$ – Zugfestigkeit β_Z	PM	NP, LP	$E_{Z,33} = 6050 \beta_Z$	0,86
	PG	NP	$E_{Z,33} = 11150 \beta_{20,73}$	0,90
		LP	$E_{Z,33} = 6500 \beta_Z^{1)}$ $E_{Z,33} = 7000 \beta_Z^{1)}$	0,92 0,85

1) Ergebnisse aus zwei Forschungsarbeiten

gelten. Damit ergibt sich die Möglichkeit, von Ausgangskennwerten des *Putzmörtels* Anhaltswerte für Eigenschaftskennwerte des *Putzes auf Putzgrund* zu ermitteln. Durch Anwendung der Eigenschaftszusammenhänge lässt sich die Anzahl der jeweils durch Prüfung zu ermittelnden Eigenschaftswerte wesentlich verringern.

9 Literatur

- [1] DIN 1053-1, 11.96. Mauerwerk; Berechnung und Ausführung.
- [2] DIN EN 1996-1-1:2010-12: Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten; Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk; Deutsche Fassung EN 1996-1-1:2010.
- [3] Schubert, P.: Eigenschaftswerte von Mauerwerk, Mauersteinen, Mauermörtel und Putzen. Mauerwerk-Kalender 2010, S. 3–25. Berlin: Ernst & Sohn.
- [4] Glitza, H.: Druckbeanspruchung parallel zur Lagerfuge. Mauerwerk-Kalender 13 (1988), S. 489-496. Berlin: Ernst & Sohn.
- [5] Schubert, P., Metzemacher, H.: Biegezugfestigkeit von Mauerwerk senkrecht und parallel zur Lagerfuge. Aachen: Institut für Bauforschung, 1987. Forschungsbericht Nr. F 275.
- [6] Schubert, P., Hoffmann, G.: Druckfestigkeit von Mauerwerk parallel zu den Lagerfugen. Mauerwerk-Kalender 19 (1994), S. 715. Berlin: Ernst & Sohn.
- [7] DIN EN 1996-1-1/NA:2012-05: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1/NA: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk.
- [8] Schubert, P.: Prüfverfahren für Mauerwerk, Mauersteine und Mauermörtel. Mauerwerk-Kalender 16 (1991), S. 685-697. Berlin: Ernst & Sohn.
- [9] Schmidt, U., Graubohm, M., Brameshuber, W.: Porenbetoneigenschaften für DIN 1053-1. Aachen: Institut für Bauforschung, 2008. Forschungsbericht Nr. F 7057.
- [10] Brameshuber, W.; Graubohm M.; Schmidt, U.: Festigkeitseigenschaften von Mauerwerk; Teil 4: Scherfestigkeit. Berlin: Ernst & Sohn. Mauerwerk-Kalender 31 (2006), S. 193–225.
- [11] Schubert, P.; Friede, H.: Spaltzugfestigkeit von Mauersteinen. Die Bautechnik (1980), Nr. 4, S. 117–122.
- [12] Kirtschig, K.; Metje, W.-R.: Leichtzuschläge für Mauermörtel. Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Universität Hannover (Hrsg.). Forschungsbericht, September 1979.
- [13] Institut für Ziegelforschung, Essen (Hrsg.): Verformungsverhalten und Tragfähigkeit von Mauerwerk mit Leichtmauermörtel, Forschungsschlussbericht, September 1983.
- [14] Schubert, P., Meyer, U.: Harmonisierung europäischer Baubestimmungen – Eurocode 6 Mauerwerksbau; Ermittlung von charakteristischen Spannungs-Dehnungs-Linien von Mauerwerk. Aachen: Institut für Bauforschung, 1990. Forschungsbericht Nr. F 330.
- [15] Schubert, P., Meyer, U.: Verbesserung der Druckfestigkeit von Naturbimsbetonmauerwerk durch Optimierung der Mörtel­eigenschaften. Aachen: Institut für Bauforschung, 1991. Forschungsbericht Nr. F 308.
- [16] Schubert, P.: Formänderungen von Mauersteinen, Mauermörtel und Mauerwerk. Mauerwerk-Kalender 17 (1992), S. 623. Berlin: Ernst & Sohn.
- [17] Schubert, P.: Schadensfreies Konstruieren mit Mauerwerk; Teil 1: Formänderungen von Mauerwerk – Nachweisverfahren, Untersuchungsergebnisse, Rechenwerte. Mauerwerk-Kalender 27 (2002), S. 313–331. Berlin: Ernst & Sohn.
- [18] Siech, H. J.: Scherfestigkeit, Haftscherfestigkeit und Fugendruckfestigkeit. Mauerwerk 12 (2008), Nr. 6, S. 340–345.

- [19] DIN 18555-4:1986-03: Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln; Festmörtel, Bestimmung der Längs- und Querdehnung sowie von Verformungskenngrößen von Mauermörteln im statischen Druckversuch.
- [20] Schubert, P.: Einfluss von Leichtmörtel auf Tragfähigkeit und Verformungseigenschaften von Mauerwerk. In: Ziegelindustrie International 38 (1985), Nr. 6, S. 327–335.
- [21] Kirtschig, K., Metje, W.-R.: Auswertung von Versuchsergebnissen zur Überprüfung der Vorstellungen über den Bruchmechanismus von Mauerwerk und zur Festlegung von zulässigen Spannungen bei Verwendung von Leichtmauermörtel. Hannover: Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung (Eigenverlag). In: Mitteilungen aus dem Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Universität Hannover (1984), Nr. 53.
- [22] Schubert, P.: Zur Feuchtedehnung von Mauerwerk. Dissertation, RWTH Aachen, 1982.
- [23] DIN 52450:1985-08: Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Probekörpern; Prüfung anorganischer nichtmetallischer Baustoffe.
- [24] Institut für Bauforschung, Aachen (Hrsg.): Kriechverhalten von Mauerwerk. Forschungsbericht Nr. F 163, 1984, sowie Glitza, H.: Zum Kriechen von Mauerwerk. Die Bautechnik (1985), Nr. 12, S. 415–418.
- [25] DIN 18555-5:1986-03: Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln; Festmörtel, Bestimmung der Haftscherfestigkeit von Mauermörteln.
- [26] DIN EN 1052-3:2007-06: Prüfverfahren für Mauerwerk; Teil 3: Bestimmung der Anfangsscherfestigkeit (Haftscherfestigkeit).
- [27] Brameshuber, W.; Saenger, D.: Auswertung Biegezugfestigkeit von Mauerwerk aus Kalksandstein. Institut für Bauforschung, RWTH Aachen University, 2009. Forschungsbericht Nr. F 7066, noch nicht abgeschlossen.
- [28] Schubert, P.: Zur Haftscherfestigkeit zwischen Mörtel und Stein. Mauerwerk-Kalender 12 (1987), S. 497–506. Berlin: Ernst & Sohn.
- [29] Brameshuber, W.; Schmidt, U.; Graubohm, M.: Auswertung Haftscherfestigkeit. Aachen: Institut für Bauforschung, RWTH Aachen University, 2005. Forschungsbericht Nr. F 7018.
- [30] Schmidt, U.: Biegezugfestigkeit von Mauerwerk. Dissertation, in: Schriftenreihe Aachener Beiträge zur Bauforschung, Institut für Bauforschung der RWTH Aachen, (in Vorbereitung, siehe auch Beitrag F II Schmidt/Brameshuber „Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Biegezugfestigkeit von Mauerwerk“ in diesem Mauerwerk-Kalender).
- [31] DIN EN 1052-5:2005-06: Prüfverfahren für Mauerwerk; Teil 5: Bestimmung der Biegehaftzugfestigkeit.
- [32] DIN 18555-3:1982-09: Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln; Festmörtel; Bestimmung der Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit und Rohdichte.
- [33] DIN EN 1015-11:1999-10: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk; Teil 11: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel.
- [34] Schubert, P.: Druckfestigkeit von Mauerwerk aus Leichtbetonsteinen und Dünnbettmörtel; Auswertung von Untersuchungsergebnissen im Hinblick auf zulässige Grundspannungen nach DIN 1053-1, 02.90. 1993, nicht veröffentlicht.
- [35] Schubert, P., Meyer, U.: Druckfestigkeit von Porenbeton- und Leichtbetonmauerwerk. Mauerwerk-Kalender 18 (1993), S. 627–634. Berlin: Ernst & Sohn.
- [36] Kirtschig, K., Meyer, J.: Auswertung von Mauerwerksversuchen zur Festlegung von zulässigen Spannungen und charakteristischen Mauerwerksfestigkeiten; Teil 1: Auswertung. Hannover: Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Universität Hannover. Mitteilungen aus dem Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung (1987), Nr. 54.
- [37] Schubert, P., Meyer, U.: Druckfestigkeit von Mauerwerk mit Leichthochlochziegeln. Das Mauerwerk 3 (1999), Nr. 1, S. 34–41; sowie Schubert, P.: Druckfestigkeit und Kennwerte der Spannungsdehnungslinie von Mauerwerk aus Leichthochlochziegeln mit Normal-, Leicht- und Dünnbettmörtel. Aachen: Institut für Bauforschung, 1998. Forschungsbericht Nr. F 632/1.
- [38] Schubert, P.: Festigkeits- und Verformungseigenschaften von modernem Mauerwerk. Weimar: Bauhaus-Universität, 2003. In: 15. Internationale Baustofftagung – ibausil, 24.–27.09.2003, Weimar, S. 1–1043–1065.
- [39] Schubert, P., Beer, I.; Graubohm, M.: Druckfestigkeit und E-Modul von Dünnbettmauerwerk; Teil 1: Dünnbettmauerwerk aus Porenbeton-Plansteinen. Mauerwerk 8 (2004), Nr. 5, S. 209–221.
- [40] Schubert, P.; Graubohm, M.: Druckfestigkeit von Mauerwerk parallel zu den Lagerfugen. Mauerwerk 8 (2004), Nr. 5, S. 198–208.
- [41] Backes, H.-P.: Zum Verhalten von Mauerwerk bei Zugbeanspruchung in Richtung der Lagerfugen. Dissertation RWTH Aachen, 1985 sowie auch Institut für Bauforschung, Aachen (Hrsg.): Zugfestigkeit von Mauerwerk und Verformungsverhalten unter Zugbeanspruchung. Forschungsbericht Nr. F 124, 1983.
- [42] Metzemacher, H.: Verformungsverhalten von Mauerwerk unter Zugbeanspruchung (Zugspannungsrelaxation). Forschungsbericht des Instituts für Bauforschung, Aachen, Nr. F 225, 1988.
- [43] Schubert, P.: Festigkeit und Verformungseigenschaften von Mauerwerk unter Zugbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen. Mauerwerk 13 (2009), Nr. 6, S. 364–370.
- [44] Schubert, P.: Biegezugfestigkeit von Mauerwerk – Untersuchungsergebnisse an kleinen Wandprüfkörpern. Mauerwerk-Kalender 22 (1997), S. 611–628. Berlin: Ernst & Sohn.
- [45] DIN EN 1052-2:1999-10: Prüfverfahren für Mauerwerk; Teil 2: Bestimmung der Biegezugfestigkeit.
- [46] Schmidt, U.; Schubert, P.: Festigkeitseigenschaften von Mauerwerk; Teil 2: Biegezugfestigkeit. Mauerwerk-Kalender 29 (2004), S. 31–63. Berlin: Ernst & Sohn.
- [47] Brameshuber, W.; Saenger, D.: Auswertung der Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen von Ziegel-

- Mauerwerk mit Normalmauermörtel und Dünnbettmörtel. Aachen: Institut für Bauforschung, RWTH Aachen University, 2010. Forschungsbericht Nr. F 7080.
- [48] DIN 18554-1:1985-12: Prüfung von Mauerwerk; Ermittlung der Druckfestigkeit und des Elastizitätsmoduls.
- [49] DIN EN 1052-1:1998-12: Prüfverfahren für Mauerwerk; Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit.
- [50] Schubert, P.: E-Moduln von Mauerwerk aus Leichtbeton- und Porenbetonsteinen. Ehningen: Expert, 1993. In: Werkstoffwissenschaften und Bausanierung. Tagungsbericht des dritten Internationalen Kolloquiums. Wittmann, F. H.; Bartz, W. J. (Ed.), Teil 2, S. 1355–1365.
- [51] Schubert, P.: Mauerwerk aus Leichtbetonsteinen mit Dünnbettmörtel – Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul und Bruchdehnung. Mauerwerk 6 (2002), Nr. 2, S. 55-61.
- [52] Schubert, P.: E-Moduln von Mauerwerk in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit des Mauerwerks, der Mauersteine und des Mauermörtels. Mauerwerk-Kalender 10 (1985), S. 705–717. Berlin: Ernst & Sohn. Sowie Institut für Bauforschung, Aachen (Hrsg.): Mathematische Beschreibung der Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls von Mauerwerk von Stein- und Mörteleneigenschaften. Forschungsbericht Nr. F 162, 1983.
- [53] DIN EN ISO 15148:2003-03: Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen.
- [54] DIN EN ISO 12572:2001-09: Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit.
- [55] DIN V 4108-4:2007-06: Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden; Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte.
- [56] Naturstein-Lexikon, 2. Aufl. München: Verlag Georg D. W. Callwey, 1981.
- [57] DIN 52100:1939-07: Prüfung von Naturstein; Richtlinien zur Prüfung und Auswahl von Naturstein (zurückgezogen).
- [58] Wendehorst, R., Mutz, H., Achten, H. et al.: Bautechnische Zahlentafeln, 23. Aufl. Stuttgart: Teubner, 1987.
- [59] Sybertz, F.: Ermittlung von Baustoffkennwerten von Tuffgestein und Möglichkeiten zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit von Tuffsteinmauerwerk. Aachen: Institut für Bauforschung der RWTH Aachen. Forschungsbericht Nr. F 168, 1986.
- [60] Schubert, P.: Tuffsteinmauerwerk – Standsicherheit und Gebrauchsfähigkeit; Bemessungsgrundlagen. In: Mauerwerk aus Tuffstein. Landesinstitut für Bauwesen und angewandte Bauschadensforschung (LBB), Aachen (Hrsg.), 1992.
- [61] Siedel, H.: Arten, Klassifizierung, technische Eigenschaften und Kennwerte von Naturstein. Mauerwerk-Kalender 29 (2004), S. 5–29. Berlin: Ernst & Sohn.
- [62] DIN EN 12524:2000-07: Wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswerte.
- [63] Schubert, P.: Außenputz auf Leichtmauerwerk – Vermeiden schädlicher Risse. Mauerwerk 10 (2006), Nr. 3, S. 87–101.
- [64] Schubert, P.; Beer, I.: Außenputz auf Leichtmauerwerk – Einfluss der Putzgrundfeuchte auf die Putzeigenschaften, Teile 1 und 2. Mauerwerk 7 (2003), Nr. 2, S. 66–71, Nr. 3, S. 94–107.
- [65] DIN EN 998-1:2010-12: Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau, Teil 1: Putzmörtel. Deutsche Fassung EN 998-1:2010, NA Bau im DIN, Berlin 2003.
- [66] DIN V 18550:2005-04: Putz und Putzsysteme – Ausführung.