

## **A Baustoffe ■ Bauprodukte**

### **I Eigenschaften von Mauersteinen, Mauermörtel, Mauerwerk und Putzen 3**

Wolfgang Brameshuber und Peter Schubert, Aachen

### **II Mauerwerksbau mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung 35**

Wolfram Jäger, Dresden und Roland Hirsch, Berlin



# I Eigenschaften von Mauersteinen, Mauermörtel, Mauerwerk und Putzen

Wolfgang Brameshuber und Peter Schubert, Aachen

## 1 Allgemeines

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

Im Zuge der Einführung des EC 6 [1] werden die Rechenansätze zur Bemessung von Mauerwerk insofern eine Veränderung herbeiführen, dass auch europäische Steine und Mörtel mit teilweise anderen Eigenschaften ihr Einsatzgebiet in Deutschland finden werden. 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.

Da sich mit Einführung des EC 6 [1] Bezeichnungen und Bedeutung von Eigenschaftskennwerten ändern werden – und hier noch zur Umsetzung der Deutschen Norm in den Eurocode Diskussionen laufen – wurden insbesondere bei der Bezeichnung der Druck- und Zugfestigkeit die in DIN 1053-1 [2] üblichen verwendet.

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 Risssicherheit von Mauerwerk (Gebrauchsfähigkeitsnachweis), 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 Artikel des Mauerwerk-Kalenders. In anderen Fällen wurde eine Aktualisierung vorgenommen. Der Bezug bei einer unveränderten Datenlage ist dann der Beitrag aus dem Mauerwerk-Kalender 2010 [3]. 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 <sup>2</sup>	$\beta_{D,st,l}/\beta_{D,st}$		
			$\bar{x}$	min x	max x
Mz	2	21,9/22,7	0,67	0,64	0,70
HLz <sup>1)</sup>	5	20...47	0,23	0,12	0,33
HLz <sup>2)</sup>	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 Versuchsreihen

$\bar{x}$  Mittelwert

min x; max x = Kleinst-, Größtwert

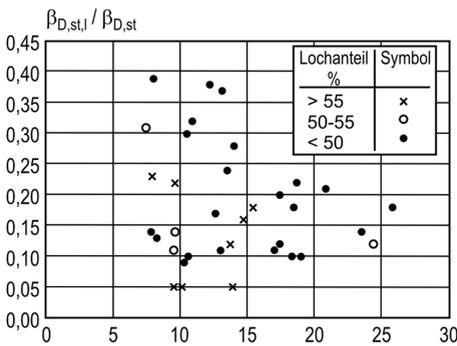
1) Trockenrohdichte  $\rho_d > 1,0 \text{ kg/dm}^3$

2)  $\rho_d \leq 1,0 \text{ kg/dm}^3$

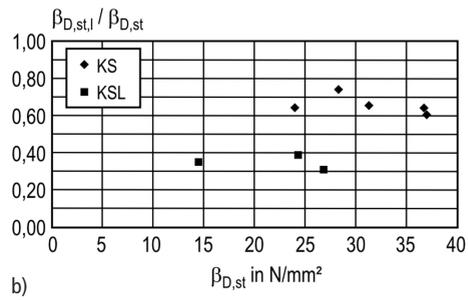
eine für die Druckfestigkeit von Mauerwerk maßgebende Größe. Für die Schubtragfähigkeit und die Biegezugfestigkeit in Wandebene kann die Steinzugfestigkeit maßgebend werden. Es ist daher sehr hilfreich, etwas detailliertere Angaben im Vergleich zu den Normangaben zu erhalten. Bislang gilt, und dies ist im Entwurf DIN EN 1996-1-1/NA [7] auch so von DIN 1053-1 [2] übernommen worden (2. Spalte der Tabelle 2), die Einteilung nach Hohlblocksteinen, Hochlochsteinen, Steinen mit Grifflöchern oder Griffaschen, Vollsteinen ohne Grifflöcher oder Griffaschen. Hinzugenommen wurde im Entwurf 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  $\beta_{z,b}/\beta_{D,st} = 0,003 \dots 0,026$ , 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.

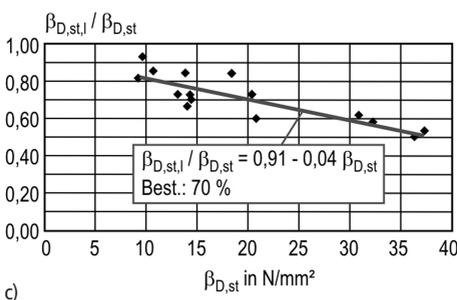
Tabelle 2 gibt den heutigen Stand der Auswertung [3, 9, 10] wieder.



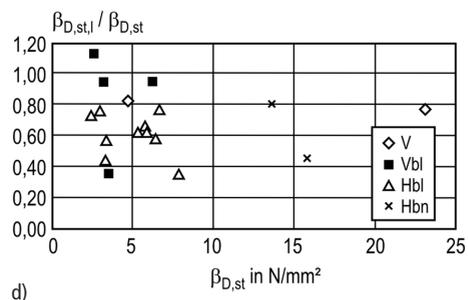
a)



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]		
	Entwurf 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 $\geq 4$	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 $\geq 4$	0,07	0,05...0,09	7
Porenbeton	0,082 $\cdot \frac{1}{1,25 \cdot 0,7 + \left(\frac{f_{st}}{25}\right)^{0,5}}$	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 Entwurf DIN EN 1996-1-1/NA  
 $f_{st}$  umgerechnete mittlere Steindruckfestigkeit nach Entwurf 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 der Verfasser 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

$\varepsilon_1$  Längsdehnung bei 1/3  $\max \sigma_D$

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

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

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

Die Verfasser empfehlen, 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)

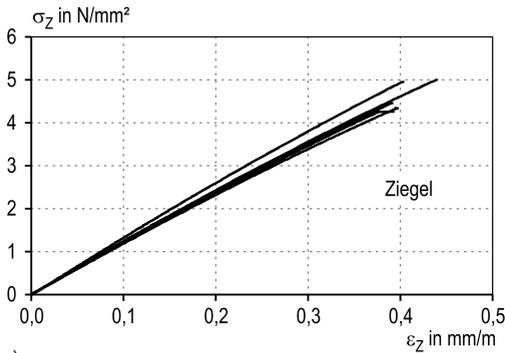
$E_Z = 1,01 E_D$  (Best.: 93%)  
 (Zylinder; 11 Mittelwerte)

**2.2.3 Spannungs-Dehnungs-Linie**

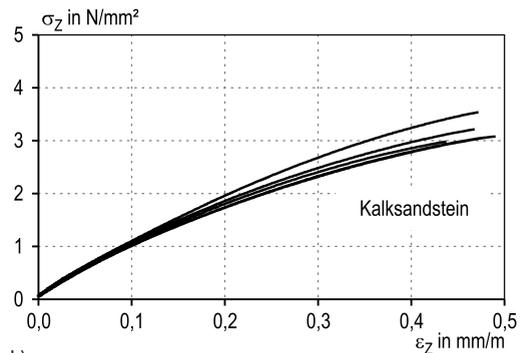
In den nachfolgenden vier Diagrammen sind die Spannungs-Dehnungs-Linien von Ziegeln, Kalksandstein, Leichtbeton und Porenbeton, wie man sie am Vollmaterial ermittelt, beispielhaft dargestellt.

**2.2.4 Querdehnungsmodul**

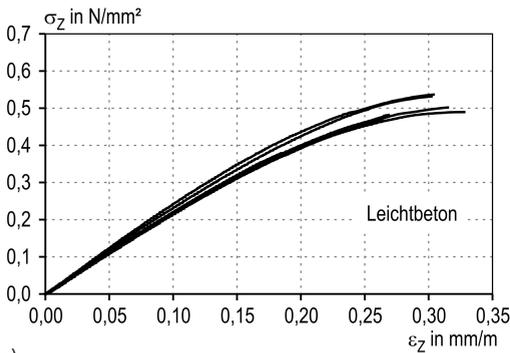
Diese Kenngröße ist von maßgebender Bedeutung für die Drucktragfähigkeit von Mauerwerk. Bei einem ungünstigen Verhältnis der Querdehnungsmodul von Mörtel und Stein wird letzterer stärker auf Zug beansprucht, was die Druckfestigkeit des Mauerwerks redu-



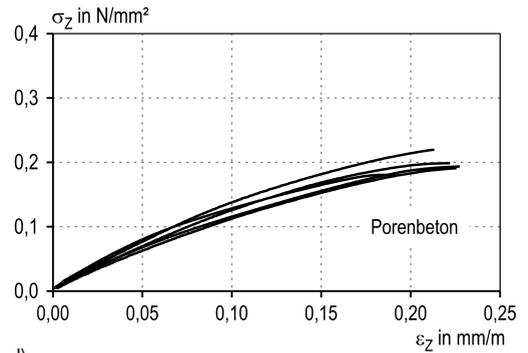
a)



b)



c)



d)

**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/mm<sup>2</sup>, Querdehnungszahl  $\mu$ , Anhaltswerte [12–15], aus [3]

Mauerstein	Festigkeitsklasse	$E_{q,i}$		$\mu$
		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 $\beta_Z$

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

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

#### 3.2.2 Scherfestigkeit $\beta_S$

Die Scherfestigkeit von Mauermörtel ist definiert als maximale Spannung bei einschrittiger Scherbeanspruchung. Ein genormtes Prüfverfahren existiert nicht. Üblicherweise wird die Scherfestigkeit an nach DIN 18555 bzw. DIN EN 1015 hergestellten Mörtelprismen  $160 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$  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  $\beta_S$  und der Normdruckfestigkeit  $\beta_D$  (Bereich für  $\beta_S$ : 4 bis 18 N/mm<sup>2</sup>):

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

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

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  $\beta_D$  angeben [20] (s. auch Bild 3):

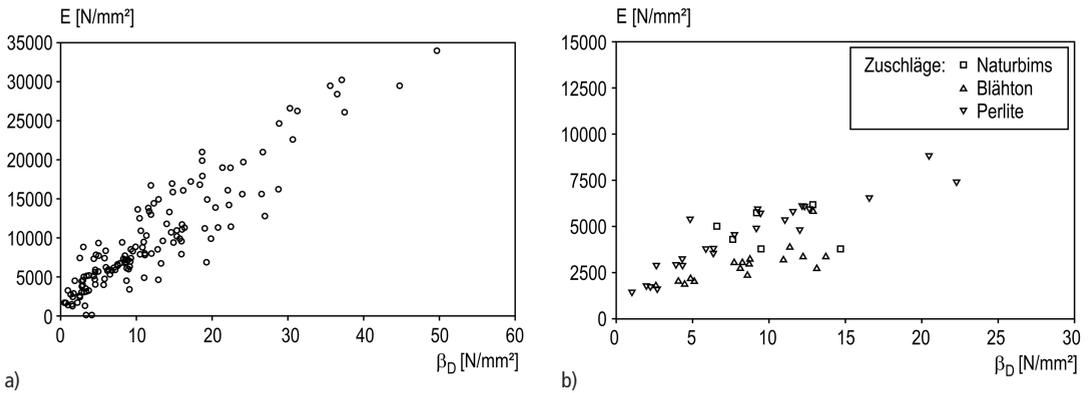
a) Normalmörtel  
 $E = 2100 \cdot \beta_D^{0,7}$  bzw.  $E \approx 700 \cdot \beta_D$

b) Leichtmörtel mit Blähtonzuschlag  
 $E = 1200 \beta_D^{0,6}$

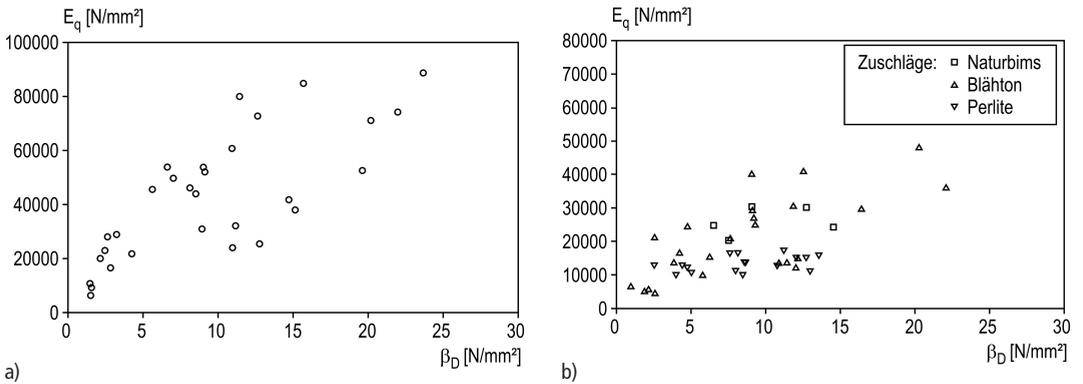
c) Leichtmörtel mit Perlitezuschlag  
 $E = 1200 \beta_D^{0,4}$

#### 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 Querzugspannungen 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  $\beta_D$  kann jeweils nur für Mörtel mit gleicher Gesteinskörnung (gefügdichter Sand, Blähton, Naturbims, Perlite usw.) erwartet werden (Bild 4).



**Bild 3.** Mauermörtel; Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Normdruckfestigkeit  $\beta_D$  [3]; a) Normalmörtel, b) Leichtmörtel



**Bild 4.** Mauermörtel; Querdehnungsmodul  $E_q$  in Abhängigkeit von der Normdruckfestigkeit  $\beta_D$  [3]; a) Normalmörtel, b) Leichtmörtel

**Tabelle 4.** Mauermörtel; Querdehnungsmodul  $E_q$  [21], aus [3]

Mörtelart	n	$\rho_d$	$\beta_D$	$E_q$
		kg/dm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup>
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  
 $\rho_d$  Trockenrohddichte  
 $\beta_D$  Normdruckfestigkeit

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 $\epsilon_s$ )

Das Schwinden des Mauermörtels 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 Normalmauermörtel 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 $\phi$ )

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  $\phi_{\infty}$  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  $\beta_{\text{HS}}$ 

Mauerstein	Mauermörtel	PV	n(n <sub>i</sub> )	$h_m$	min $\bar{x}$	max $\bar{x}$	$\bar{x}$
				M.-%			
KS-Referenz	NM II	DIN	3 (> 15)	3,0...12,1 <sup>1)</sup>	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 <sup>1)</sup>	0,02	0,60	0,19
		EN	10 (49)	5,5...11,3 <sup>1)</sup>	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 <sup>1)</sup>	0,37	0,58	0,47
		EN	–	–	–	–	–
	LM 36	DIN	3 (30)	5,0 <sup>1)</sup>	0,12	0,82	0,43
		EN	–	–	–	–	–
	DM	DIN	21 (170)	3,4...5,0 <sup>1)</sup>	0,37	1,68	0,94
		EN	–	–	–	–	–

**Tabelle 6 a.** Kalksandsteine; Haftscherfestigkeit  $\beta_{HS}$  (Fortsetzung)

Mauerstein	Mauermörtel	PV	n(n <sub>i</sub> )	h <sub>m</sub>	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 <sup>1)</sup>	0,01	0,51	0,20
		EN	21 (> 67)	1,8...10,5 <sup>1)</sup>	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 <sup>1)</sup>	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 <sup>1)</sup>	0,46	1,07	0,78
		EN	12 (56)	2,7...6,8 <sup>1)</sup>	0,10	0,90	0,43

PV Prüfverfahren  
n Anzahl der Versuchsserien  
(n<sub>i</sub>) Anzahl der Einzelwerte  
h<sub>m</sub> 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  $\beta_{HS}$ 

Mauerstein	Mauermörtel	PV	n (n <sub>i</sub> )	h <sub>m</sub>	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 <sup>1)</sup>	0,23	0,35	0,30
	NM IIa	DIN	8 (43)	0...11,7 <sup>1)</sup>	0,16	0,65	0,32
		EN	27 (> 111)	0...21,0 <sup>1)</sup>	0,08	0,67	0,25
	NM III	DIN	–	–	–	–	–
		EN	5 (> 16)	0...0,1 <sup>1)</sup>	0,12	0,64	0,37
	LM 21	DIN	1 (5)	2,0	–	–	0,49
		EN	7 (35)	0...19,0 <sup>1)</sup>	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 <sup>1)</sup>	0,18	0,93	0,43

Kurzzeichen siehe Tabelle 6a

**Tabelle 6 c.** Vollziegel; Haftscherfestigkeit  $\beta_{HS}$ 

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 <sup>1)</sup>	0,07	1,06	0,31
		EN	11 (50)	0,1...8,0 <sup>1)</sup>	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  $\beta_{HS}$ 

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 <sup>1)</sup>	0,41	1,28	0,75
		EN	8 (> 24)	4,9...29,0 <sup>1)</sup>	0,18	0,58	0,39

Kurzzzeichen siehe Tabelle 6a

**Tabelle 6 e.** Betonsteine (Leicht- und Normalbeton); Haftscherfestigkeit  $\beta_{HS}$ 

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 <sup>1)</sup>	0,42	0,76	0,62
		EN	21 (> 89)	0...7,9 <sup>1)</sup>	0,13	0,64	0,25
	NM III	DIN	–	–	–	–	–
		EN	5 (> 16)	3,1 <sup>1)</sup>	0,31	0,67	0,51
	LM 21	DIN	1 (4)	16,8	–	–	0,95
		EN	5 (> 19)	2,8...16,8 <sup>1)</sup>	0,18	0,63	0,39
	DM	DIN	8 (68)	5,1 <sup>1)</sup>	0,68	2,57	1,78
		EN	2 (10)	5,1 <sup>1)</sup>	0,17	1,18	0,68

Kurzzzeichen siehe Tabelle 6a

**Tabelle 7.** Anhaltswerte für die Haftscherfestigkeit  $\beta_{HS}$  in N/mm<sup>2</sup>

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  $\beta_{HZ}$ ; Prüfalter im Allgemeinen mind. 14 d [3]

Mauerstein		Mauermörtel	Prüfverfahren <sup>2)</sup>	n	$\bar{x}$	min x	max x
Art	Feuchtezustand <sup>1)</sup>						
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 <sup>3)</sup>	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.

Am Institut für Bauforschung der RWTH Aachen wurde in den vergangenen Jahren eine Datenbank erstellt, die maßgebenden Parameter eingegeben und schließlich eine Auswertung vorgenommen. In den nachfolgenden Bildern sind für die verschiedenen Steinarten und Mörteldruckfestigkeiten die Mauerwerkdruckfestigkeiten dargestellt. Neben der sich ergebenden Mittelwertkurve, wobei als Grundform die bekannte Potenzfunktion

$$\beta_{D,mw,\lambda=0} = K \cdot \beta_{D,st}^{\alpha} \cdot \beta_{D,m\ddot{o}}^{\beta} \quad (1)$$

mit

$K$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  über Regression bestimmte Faktoren

$\beta_{D,st}$  Steindruckfestigkeit, ermittelt nach der jeweiligen Mauersteinnorm bzw. Zulassung

$\beta_{D,m\ddot{o}}$  Mörteldruckfestigkeit, ermittelt nach DIN 18555-3 [32] oder DIN EN 1015-11 [33]

$\beta_{D,mw,\lambda=0}$  Mauerwerkdruckfestigkeit, rückgerechnet aus der im Versuch tatsächlich vorhandenen Schlankheit auf die theoretische Schlankheit  $\lambda = 0$

gewählt wurde, sind in den Bildern 5 bis 10 zusätzlich noch die 5%-Quantilkurve (Mittelwert  $\cdot 0,8$  als Ersatzgröße) und die derzeitige Treppenkurve nach DIN 1053-100 dargestellt. Die sich durch Angleichung an die Regression ergebende Treppenkurve wurde ebenfalls in die Diagramme aufgenommen. Auf Basis dieser Auswertungen wurden die  $K$ -,  $\alpha$ - und  $\beta$ -Werte, wie sie heute im Entwurf DIN EN 1996-1-1/NA [7] enthalten sind – nach einigen Anpassungen – festgelegt. Für Mauerziegel wurde derzeit auf die bestehenden Treppenkurven Bezug genommen, sodass bislang keine Werte aus der Datenbank zur Auswertung herangezogen wurden. Auch verwendete Literaturstellen sind [34–39].

Die Auswertung der Datensätze ergab die in Tabelle 9 zusammengestellten Faktoren in Abhängigkeit von Stein- und Mörtelart. Diskussionen in den Normungsgremien haben schließlich zu etwas anderen Faktoren im Entwurf DIN EN 1996-1-1/NA [7] geführt.

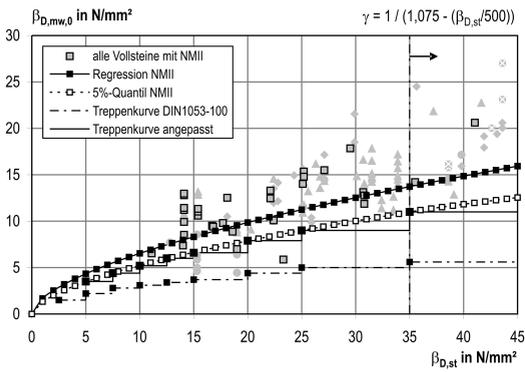
**Tabelle 9.** Parameter für die charakteristische Druckfestigkeit  $\beta_{D,mw}$  von Mauerwerk

$\beta_{D,mw} = K \beta_{D,st}^{\alpha} \cdot \beta_{D,m\ddot{o}}^{\beta}$  in (N/mm<sup>2</sup>); mit  $K$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ : Faktoren gemäß Tabelle;

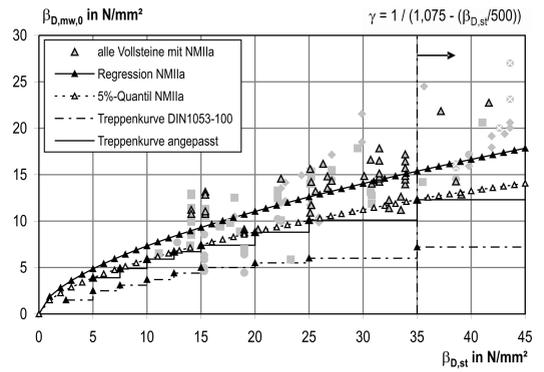
$\beta_{D,st}$ : Steindruckfestigkeit (N/mm<sup>2</sup>);  $\beta_{D,m\ddot{o}}$ : Mörteldruckfestigkeit (N/mm<sup>2</sup>)

Steinart	Steinsorte	Mörtelart	Parameter			
			K	$\alpha$	$\beta$	
Kalksandsteine	Vollsteine <sup>1)</sup>	NM	1,150	0,592	0,164	
		DM	2,259	0,570	–	
	Lochsteine	NM	0,649	0,736	0,066	
		DM	0,619	0,854	–	
Leichtbetonsteine	Vollsteine	NM	0,953	0,649	0,100	
		DM	0,763	0,892	–	
		LM21	$\beta_{D,st} < 5,0$ N/mm <sup>2</sup>	1,050	0,459	–
			$\beta_{D,st} \geq 5,0$ N/mm <sup>2</sup>	1,545	0,220	–
		LM 36	0,674	0,810	0,075	
	Lochsteine	NM	0,770	0,738	0,087	
		DM	0,951	0,689	–	
		LM21	$\beta_{D,st} < 5,0$ N/mm <sup>2</sup>	1,050	0,459	–
			$\beta_{D,st} \geq 5,0$ N/mm <sup>2</sup>	1,545	0,220	–
		LM36	0,647	0,810	0,075	
Porenbetonsteine	Vollsteine	DM	0,864	0,827	–	
Mauerziegel	Voll- und Lochsteine	NM	0,659	0,566	0,258	
		LM21	$\beta_{D,st} < 7,5$ N/mm <sup>2</sup>	0,658	0,599	–
			$\beta_{D,st} \geq 7,5$ N/mm <sup>2</sup>	1,035	0,374	–
		LM36	$\beta_{D,st} < 7,5$ N/mm <sup>2</sup>	0,618	0,750	–
			$\beta_{D,st} \geq 7,5$ N/mm <sup>2</sup>	1,528	0,301	–

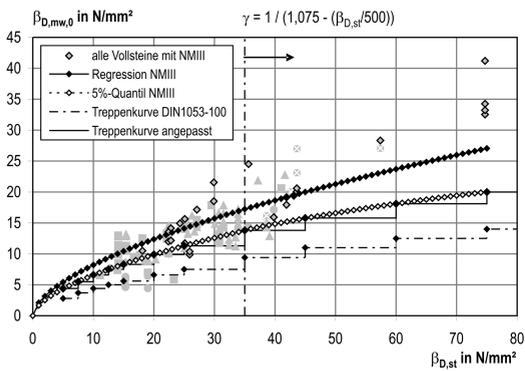
1) Für Kalksandvollsteine mit  $\beta_{D,st} \geq 35,0$  N/mm<sup>2</sup> sind die angegebenen k-Faktoren durch einen von der Steindruckfestigkeit abhängigen Faktor  $\gamma = 1/(1,075 - (\beta_{D,st}/500))$  abzumindern.



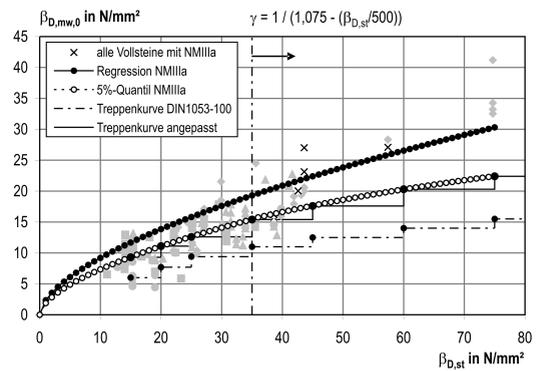
a)



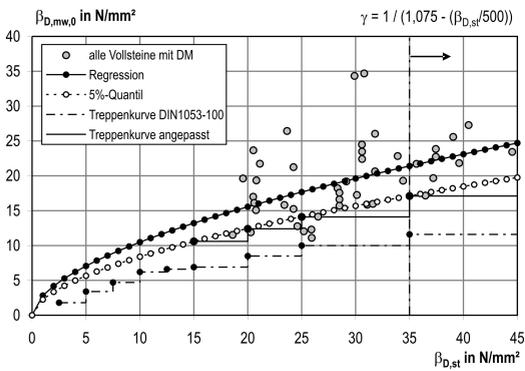
b)



c)

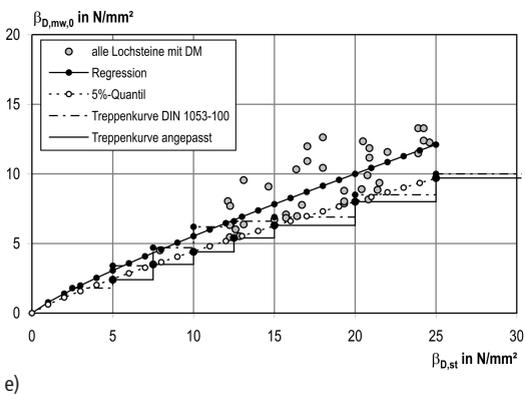
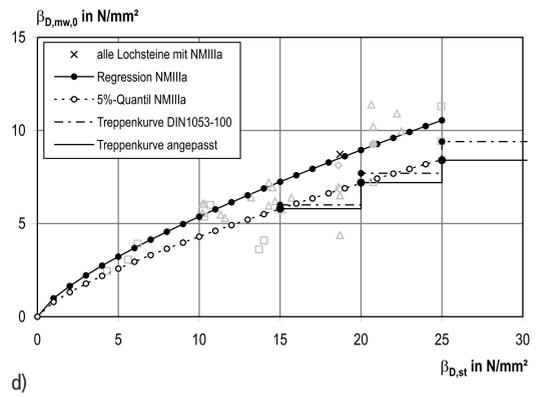
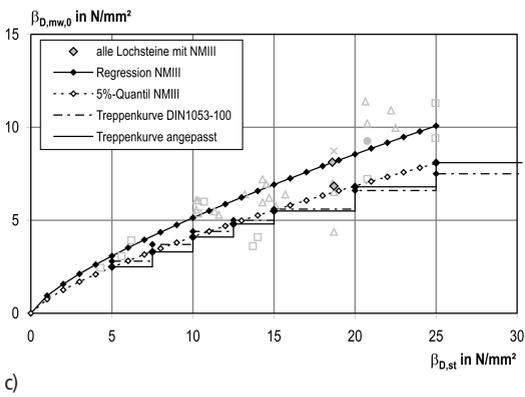
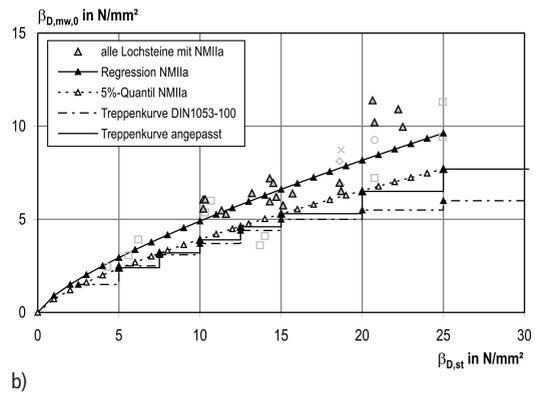
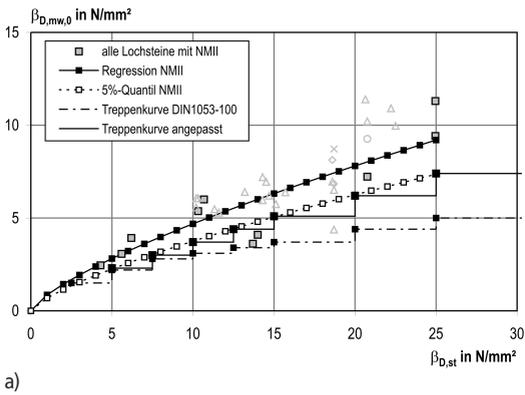


d)



e)

**Bild 5.** Ergebnisse der Datenbankauswertung zur Mauerwerkdruckfestigkeit für Kalksand-Vollsteine;  
 a) NM II, b) NM IIIa, c) NM III, d) NM IIIa, e) DM



**Bild 6.** Ergebnisse der Datenbankauswertung zur Mauerwerkdruckfestigkeit für Kalksand-Lochsteine; a) NM II, b) NM IIa, c) NM III, d) NM IIIa, e) DM

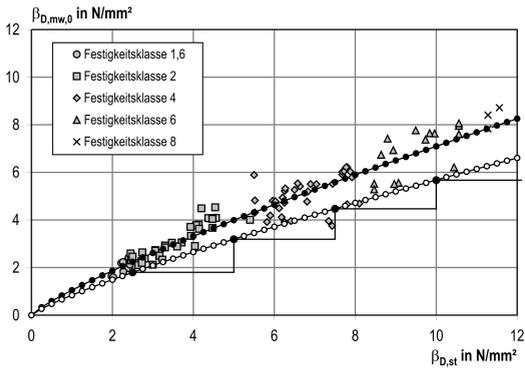
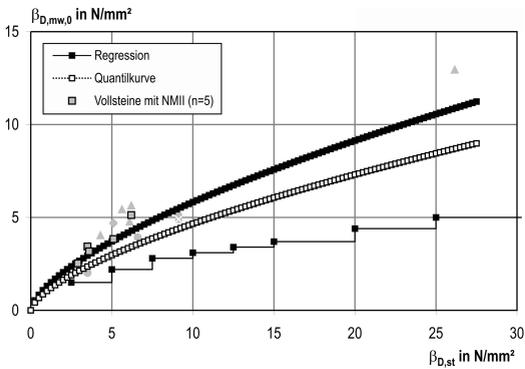
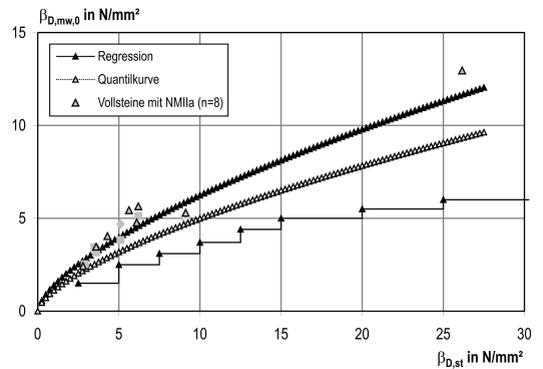


Bild 7. Ergebnisse der Datenbankauswertung zur Mauerwerkdruckfestigkeit für Porenbeton-Plansteine mit DM

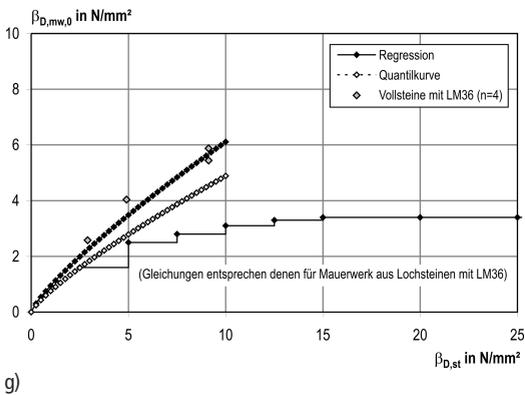
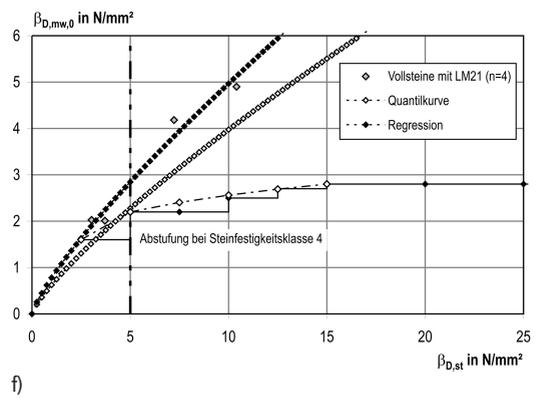
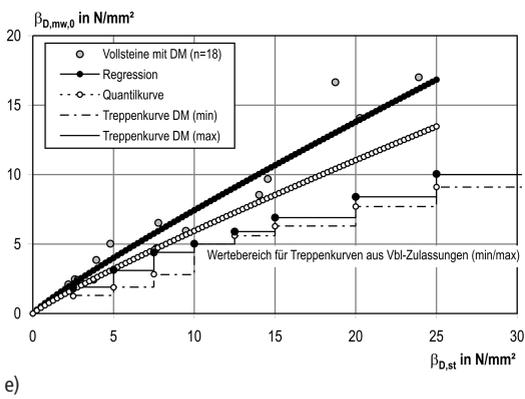
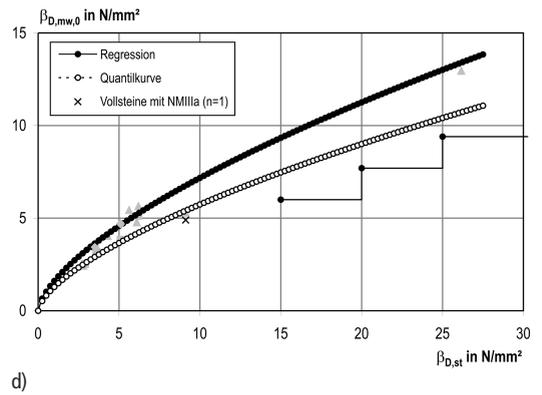
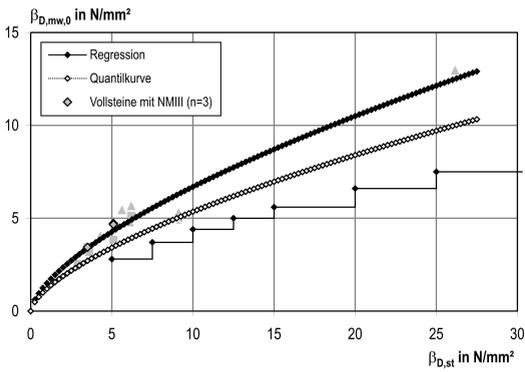


a)

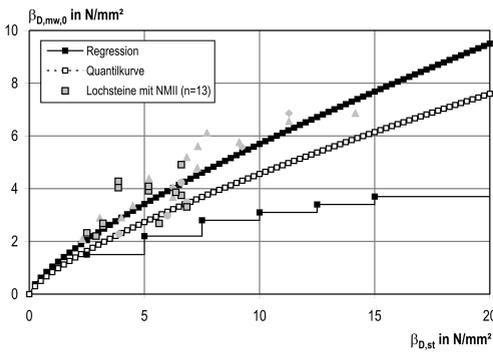


b)

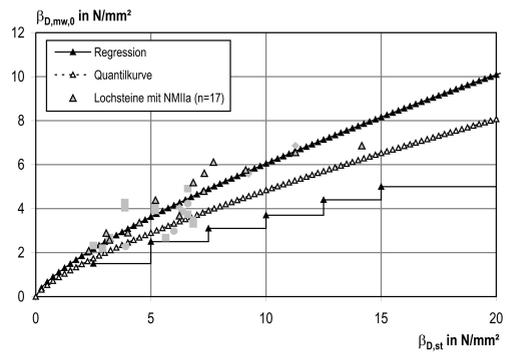
Bild 8. Ergebnisse der Datenbankauswertung zur Mauerwerkdruckfestigkeit für Leichtbeton-Vollsteine;  
a) NM II, b) NM IIa, c) NM III, d) NM IIIa, e) DM, f) LM 21, g) LM 36



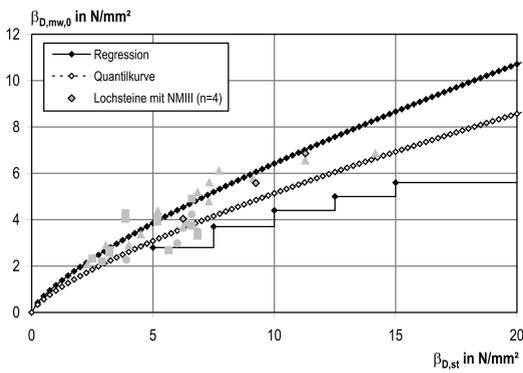
zu Bild 8.



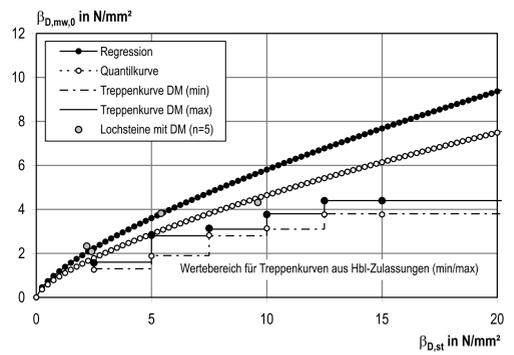
a)



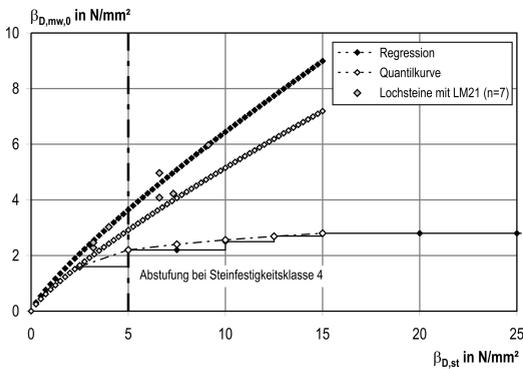
b)



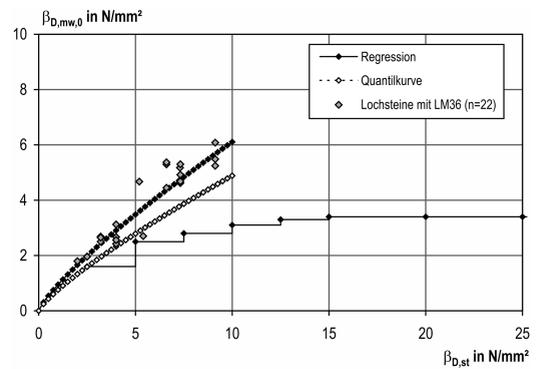
c)



d)

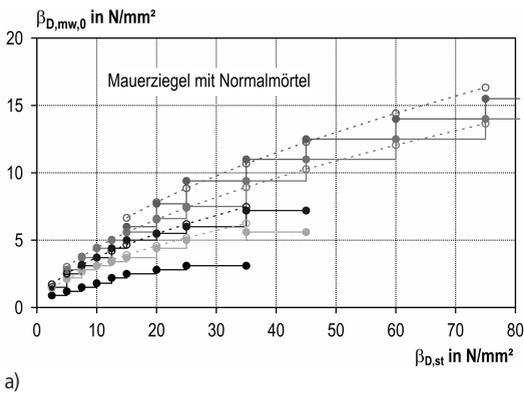


e)

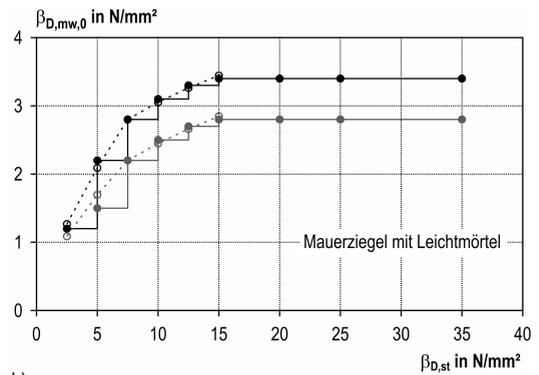


f)

**Bild 9.** Ergebnisse der Datenbankauswertung zur Mauerwerkdruckfestigkeit für Leichtbeton-Lochsteine; a) NM II, b) NM IIa, c) NM III, d) DM, e) LM 21, f) LM 36



a)



b)

Bild 10. Treppenkurven für Mauerziegel; a) NM, b) LM

## 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

$\beta_{HS}$  Haftscherfestigkeit

$\mu$  Reibungsbeiwert

$\sigma_D$  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 10 sind die Bandbreiten der Werte aufgeführt. Neuere Erkenntnisse sind noch nicht eingearbeitet. Tabelle 10 wurde [3] entnommen.

## 5.4 Biegezugfestigkeit und -tragfähigkeit

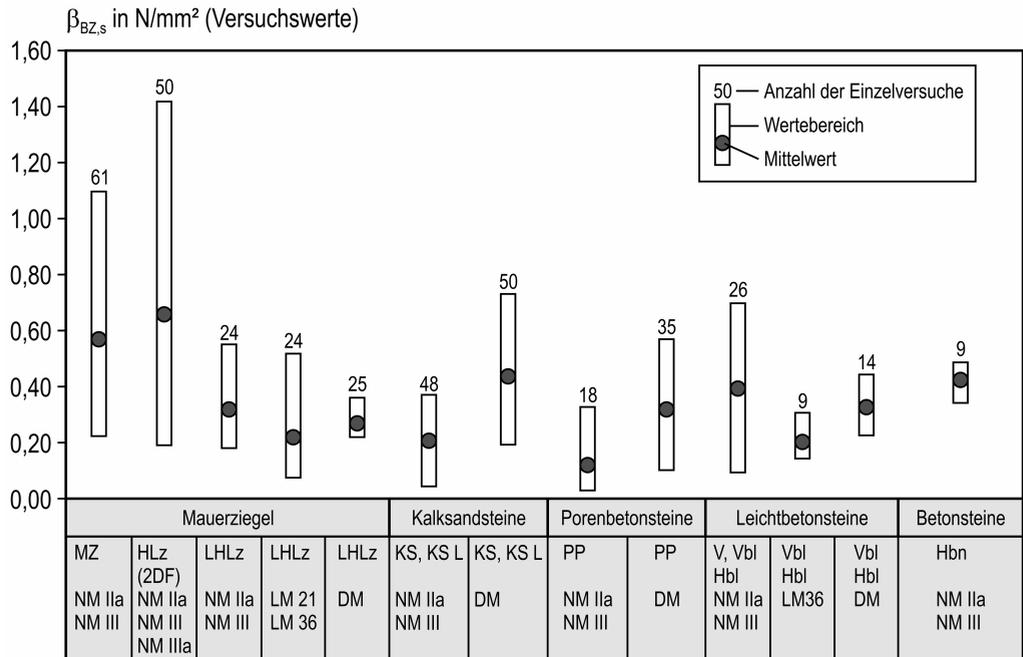
Die Biegezugfestigkeit von Mauerwerk ist von großer Bedeutung bei Ausfachungsflächen und Verblendschalen von zweischaligem Mauerwerk bei Einwirkung von Windlasten (Sog und Druck), aber auch bei mit Erd-druck belasteten Kellerwänden. Bei dem anisotropen Baustoff Mauerwerk muss unterschieden werden zwischen der Beanspruchung senkrecht zur Lagerfuge und parallel zur Lagerfuge. In Ausfachungsflächen und bei Verblendschalen treten meist zweiachsig 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 11 sind die verfügbaren Ergebnisse zu Untersuchungen der Biegezugfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge dargestellt. Es fasst die Ergebnisse der Auswertung in [44, 46] zusammen. Neuere

**Tabelle 10.** Mauerwerk; Zugfestigkeit  $\beta_{z,p}$  in N/mm<sup>2</sup> – 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	IIa, 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	IIa, 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	IIa	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	IIa	vm	1	0,13
Hbl	10DF	2	LM36	IIa	vm	1	0,17

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



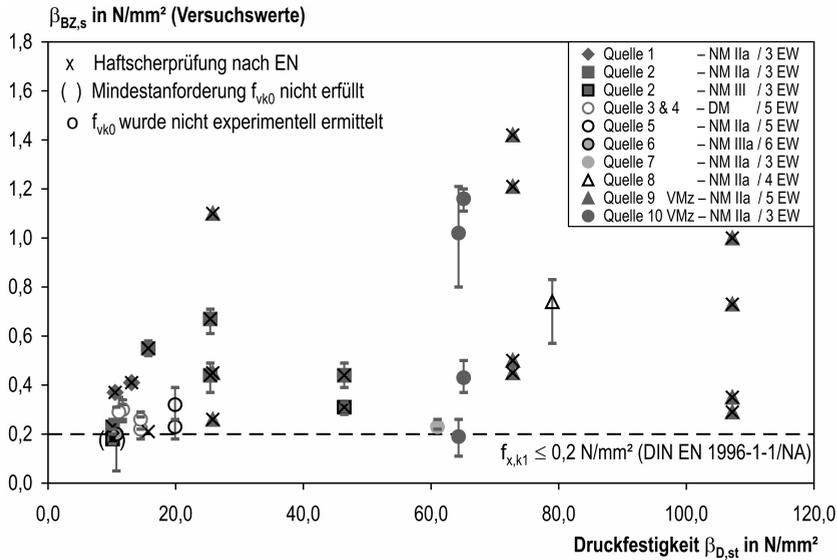
**Bild 11.** Bandbreite der Biegezugfestigkeitswerte senkrecht zur Lagerfuge, aus [46]

Erkenntnisse werden in [30] bekanntgegeben und sind noch nicht eingearbeitet.

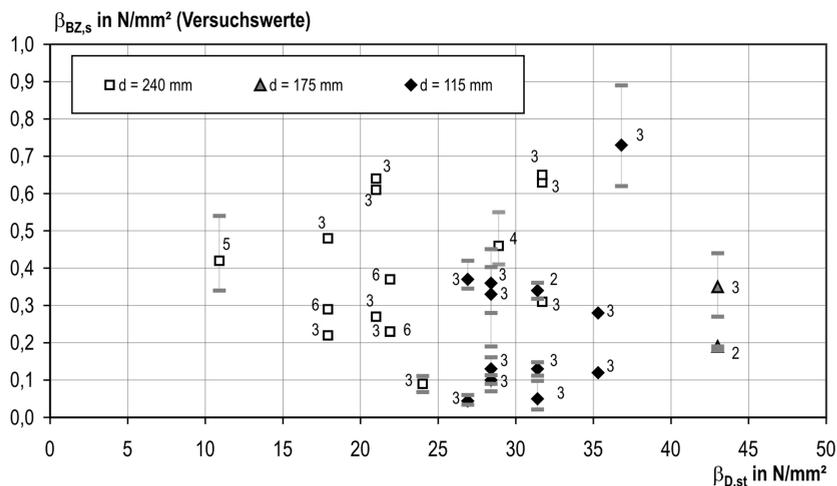
Die Bandbreite der Werte ist verhältnismäßig groß, was auf die Versuchsdurchführung einerseits und auf tatsächliche Materialstreuungen andererseits zurückzuführen ist. Für Mauerwerk mit Dünnbettmörtel wird derzeit ein charakteristischer Wert von  $0,2 \text{ N/mm}^2$  diskutiert, der für Normalmörtel konnte bislang nicht festgelegt werden. Für die Nachweisführung der Biegetragfähigkeit ist jedoch ein Wert zwingend erforderlich.

In den Bildern 12 bis 14 sind Auswertungen von Untersuchungsergebnissen zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge für Ziegelmauerwerk (Bild 12), Kalksandsteinmauerwerk (Bild 13) und Porenbetonmauerwerk (Bild 14) dargestellt. Die Ergebnisse machen deutlich, dass ein Wert zwischen  $0,15 \text{ N/mm}^2$  und  $0,20 \text{ N/mm}^2$  auch für Normalmörtel gerechtfertigt ist.

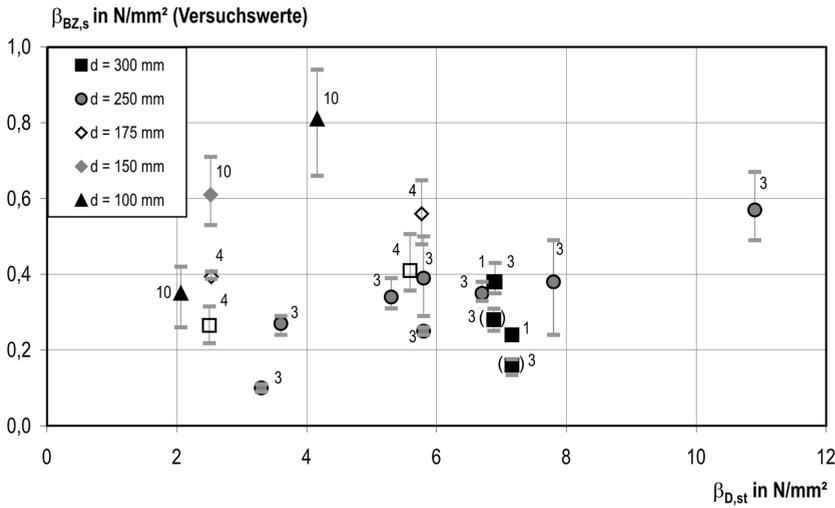
Bei der Biegezugfestigkeit parallel zur Lagerfuge kann sowohl Steinzug- als auch Haftscherversagen eintreten.



**Bild 12.** 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 13.** Biegezugfestigkeit von Kalksandsteinmauerwerk senkrecht zu den Lagerfugen in Abhängigkeit von der Steindruckfestigkeit  $\beta_{D,st}$  [10]



**Bild 14.** Biegezugfestigkeit von Porenbetonmauerwerk senkrecht zu den Lagerfugen in Abhängigkeit von der Steindruckfestigkeit  $\beta_{D,st}$  (mit Formfaktor) [9]

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 werden im Rahmen der Normungsarbeit folgende Formeln zur Berechnung der Biegetragfähigkeit erarbeitet, die im Entwurf DIN EN 1996-1-1/NA [7] bislang keine Berücksichtigung gefunden haben:

*Unvermörtelte Stoßfugen*

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

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

*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 11), entspricht der alten Bezeichnung  $\beta_{HS}$  (siehe z. B. 4.2)

$\mu$  Reibungsbeiwert: 0,6

$\sigma_{Dd}$  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 12), 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 be-

**Tabelle 11.** Charakteristischer Wert der Anfangsscherfestigkeit  $f_{vk0}$  in der Lagerfuge in N/mm<sup>2</sup>

Mörtelart, Mörtelgruppe	NM I	NM II	NM IIa LM 21 LM 36	NM III	NM IIIa	DM <sup>1)</sup>
$f_{vk0}$	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 12.** Faktor zur Berechnung von  $f_{bt,cal}$

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

steht 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.

## 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.

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

mit

$\varepsilon_1$  Längsdehnung bei 1/3 max  $\sigma_D$ .

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  $\beta_D$  ist im Mittel  $E_D = 1000 \beta_D$ . Je nach Stein-Mörtel-Kombination ergeben sich  $E_D$ -Werte im Bereich von etwa 500  $\beta_D$  bis 1500  $\beta_D$ .

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

- Mauerwerk aus Kalksandsteinen

$$E_D = 500 \cdot \beta_D \quad \text{Normal-, Dünnbettmörtel (grobe Näherung, Streubereich der Einzelwerte etwa 50\%)}$$

- Mauerwerk aus Leichtbetonsteinen

$$\begin{aligned} E_D &= 1240 \cdot \beta_D^{0,77} && \text{Leichtmörtel} \\ E_D &= 1040 \cdot \beta_D && \text{Normalmörtel} \\ E_D &= 930 \cdot \beta_D && \text{Dünnbettmörtel bzw.} \\ E_D &= 600 \cdot \beta_{D,st} && \text{Dünnbettmörtel} \end{aligned}$$

(Streubereich der Einzelwerte etwa  $\pm 20\%$ )

- Mauerwerk aus Porenbetonsteinen

$$\begin{aligned} E_D &= 520 \cdot \beta_D && \text{Normalmörtel bzw.} \\ E_D &= 570 \cdot \beta_{D,st}^{0,69} && \text{Normalmörtel} \end{aligned}$$

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

$$E_D = 560 \cdot \beta_D \quad \text{Dünnbettmörtel bzw.}$$

$$E_D = 470 \cdot \beta_{D,st}^{0,86} \quad \text{Dünnbettmörtel bzw.}$$

$$E_D = 350 \cdot \beta_{D,st} \quad \text{Dünnbettmörtel}$$

(Streubereich der Einzelwerte etwa  $\pm 20\%$ )

- Mauerwerk aus Leichthochlochziegeln

$$E_D = 1480 \cdot \beta_D \quad \text{Leichtmörtel}$$

$$E_D = 1170 \cdot \beta_D \quad \text{Normalmörtel}$$

$$E_D = 1190 \cdot \beta_D \quad \text{Dünnbettmörtel bzw.}$$

$$E_D = 460 \cdot \beta_{D,st} \quad \text{Dünnbettmörtel}$$

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

$$\beta_{D,st} \quad \text{Steindruckfestigkeit}$$

$$E_D, \beta_D \quad \text{Bezogen auf Mauerwerk mit Schlankheit } \lambda = 10$$

In Tabelle 13 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 Mörtel-druckfestigkeitswerte zugrunde gelegt, die jeweils

**Tabelle 13.** Mauerwerk; Druck-E-Modul  $E_D$  gerundet in  $10^3 \text{ N/mm}^2$  (Druckbeanspruchung senkrecht zu den Lagerfugen) [35, 37–40, 51, 52]

Mauersteine			Mauermörtel					
Steinsorte	DIN V	Festigkeitsklasse	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		
Leichthochlochziegel	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	–

**Tabelle 13.** Mauerwerk; Druck-E-Modul  $E_D$  gerundet in  $10^3$  N/mm<sup>2</sup> (Druckbeanspruchung senkrecht zu den Lagerfugen) [35, 37–40, 51, 52] (Fortsetzung)

Mauersteine			Mauermörtel					
Steinsorte	DIN V	Festigkeits- klasse	Normalmörtel, Gruppe				Leichtmörtel	Dünnbettmörtel
			II	IIa	III	IIIa		
KS	106	4	1,9	2,2	2,5	2,9	–	8,0 10,0
		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		
		28	8,1	9,3	10,7	12,4		
		36	9,7	11,2	12,9	15,0		
		48	12,0	13,9	16,0	18,5		
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 14.** Mauerwerk; Druck-E-Modul  $E_D$  gerundet in Abhängigkeit vom Grundwert der zulässigen Druckspannung  $\sigma_0$  nach DIN 1053-1 [2]  $E_D = k \sigma_0$  bzw.  $E_D = k/3 f_k$ 

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

10% größer sind als die Mindestmittelwerte nach Norm.

Die Tabelle 14 enthält  $E_D$ -Werte in Abhängigkeit vom Grundwert der zulässigen Druckspannung nach DIN 1053-1 [2].

Durch die Division der Werte für  $\sigma_0$  mit dem Faktor 3 können auch bei Verwendung des Teilsicherheitskonzepts mit  $f_k$ -Werten entsprechende Elastizitätsmodul abgeschätzt werden.

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

Die Eigenschaftswerte  $\mu_D$  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 15.

**Tabelle 15.** Mauerwerk; Querdehnungszahl  $\mu_D$ , Dehnungswerte bei Höchstspannung  $\epsilon_{u,D}$  in mm/m und Völligkeitsgrad  $\alpha_0$  (Druckbeanspruchung senkrecht zu den Lagerfugen, Normalmörtel) [14, 15, 50]

Mauersteine		$\mu_D$		$\epsilon_{u,D}$		$\alpha_0$	
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	–	–

### 5.5.2.3 Völligkeitsgrad $\alpha_0$

Der geometrische Völligkeitsgrad  $\alpha_0$  im Bereich der Spannungs-Dehnungs-Linie bis zur Höchstspannung (Druckfestigkeit  $\beta_{D,mw}$ ) bzw. zur Dehnung bei Höchstspannung  $\epsilon_{u,D}$  ist ein Maß für die Nichtlinearität der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie im ansteigenden Ast und kann aus

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

errechnet werden.

In Tabelle 15 sind  $\alpha_0$ -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 $\epsilon_{u,D,p}$

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

- Mauerwerk aus Hochlochziegeln: 2,3 mm/m,
- Mauerwerk aus Kalksandvollsteinen: 3,5 mm/m,
- Mauerwerk aus Kalksandlochsteinen: 2,2 mm/m,
- Dünnbettmauerwerk aus Porenbeton-Plansteinen: 2,8 mm/m.

Die  $\epsilon_{u,D,p}$ -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.

$$E_{Z,p} = \frac{\max \sigma_Z}{3 \cdot \epsilon_{1,Z}}$$

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  $\sigma$ - $\varepsilon$ -Linien bei Druck- und Zugbeanspruchung unterschiedlich nichtlinear sind. Der Sekantenmodul bei max.  $\sigma_Z$  ist bis auf sehr wenige Ausnahmen deutlich niedriger als  $E_{Z,p}$ , s. [43].

### 5.5.5 Feuchtedehnung $\varepsilon_f$ , (Schwinden $\varepsilon_s$ , irreversibles Quellen $\varepsilon_q$ ), Kriechen (Kriechzahl $\varphi$ ), Wärmedehnungskoeffizient $\alpha_T$

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 16 sind Endwerte für Feuchtedehnung ( $\varepsilon_{f\infty}$ ) und Kriechen ( $\varphi_\infty$ ) sowie  $\alpha_T$ -Werte als „Rechenwerte“ (in etwa häufigste Werte) und in der Regel zutreffende

Wertebereiche angegeben (s. auch DIN 1053-1 [2]). 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 17 angegebenen Werte anzusetzen.

Die Tabellen 18 und 19 enthalten Endschwindwerte mit statistischen Kennzahlen aus [16]. Die Zahlenwerte gelten für Mauerwerk mit Normalmörtel. Die  $\varepsilon_{f\infty}$ - und  $\alpha_T$ -Werte können sowohl in Richtung senkrecht zu den Lagerfugen als auch in Richtung parallel zu den Lagerfugen angesetzt werden. Die  $\varphi_\infty$ -Werte gelten für Druckbeanspruchung senkrecht zu den Lagerfugen. Für Leichtmauerwerk mit Leicht- bzw. Dünnbettmörtel sind die Auswertergebnisse neuester Versuche in Tabelle 17 zusammengestellt. Der Kenntnisstand über Feuchtedehnung, Kriechen und Wärmedehnung ist zusammen mit neuesten Auswertergebnissen und Hinweisen für Prüfverfahren in [17] dargestellt.

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

Mauersteine		$\varepsilon_{f\infty}$ <sup>1)</sup>		$\varphi_\infty$		$\alpha_T$	
Steinart	DIN V	Rechenwert	Wertebereich <sup>2)</sup>	Rechenwert	Wertebereich	Rechenwert	Wertebereich
		mm/m					10 <sup>-6</sup> /K
Mauerziegel	105-100	0	+0,3...-0,2 <sup>3)</sup>	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 <sup>4)</sup>	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 kleinformigen Mauersteinen ( $\leq 2$  DF), sonst -0,1

4) Für Leichtbetonsteine mit überwiegend Blähton als Gesteinskörnung

**Tabelle 17.** Leichtmauerwerk; Endwerte der Feuchtedehnung  $\varepsilon_{f\infty}$ , Endkriechzahlen  $\varphi_\infty$  Lagerungsklima 20/65 (s. auch [17, 38]), aus [3]

Mauerstein		Mauermörtel	Anzahl d. Versuchsserien	$\varepsilon_{f\infty}$ <sup>1)</sup>		$\varphi_\infty$	
Steinart/-sorte	DIN V			Rechenwert	Wertebereich <sup>2)</sup>	Rechenwert	Wertebereich <sup>2)</sup>
				mm/m			
HLz <sup>3)</sup>	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 18.** Kalksandsteine und Kalksandsteinmauerwerk; Schwindendwerte  $\varepsilon_{500}$  in mm/m, Schwindklima 20/65 [3]

Statistischer Kennwert	Einzelsteine		Mauerwerk	
	H1)	W2)	H1)	W2)
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 Versuchsserien

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

 $x_{10}$ ,  $x_{90}$  10%-, 90%-Quantilwert

## 6 Feuchtigkeitstechnische Kennwerte von Mauersteinen, Mauermörtel und Mauerwerk

### 6.1 Kapillare Wasseraufnahme

Die Wasseraufsaugfähigkeit von Mauersteinen, Mauermörtel und Putz kann durch die kapillare Wasseraufnahme bzw. den Wasseraufnahmekoeffizienten  $\omega$  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 (→Anforderungen an den Wasseraufnahmekoeffizienten von Außenputzen) sowie für die Beurteilung des Austrocknungsverhaltens. Werden Mauersteine mit hoher Wasseraufsaugfähigkeit – gekennzeichnet durch hohe Wasseraufnahmekoeffi-

**Tabelle 20.** Mauersteine; Wasseraufnahmekoeffizient  $\omega$  ermittelt nach DIN 52617, [3]

Mauerstein	n	Mittlerer Wert	Wertebereich
		kg/(m <sup>2</sup> · h <sup>0,5</sup> )	
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

**Tabelle 19.** Leichtbetonsteine und Leichtbetonmauersteinwerk; Schwindendwerte  $\varepsilon_{500}$  in mm/m, Schwindklima 20/65, hoher Anfangsfeuchtegehalt der Steine (in der Regel Wasservorlagerung) [3]

Statistischer Kennwert	Hbl, V, Vbl		KLB <sup>1)</sup>	
	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

zienten  $\omega$  – vor dem Vermörteln nicht vorgelagert, so kann dem Mörtel nach dem Vermauern zuviel 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 Wasseraufsaugfähigkeit vor dem Vermörteln vorgelagert werden. Dies trifft stets für Mauersteine mit einem hohen Anteil 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  $\omega$  in kg/(m<sup>2</sup> · h<sup>0,5</sup>) gekennzeichnet.

Tabelle 20 enthält  $\omega$ -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  $\mu$  gekennzeichnet werden. Der Wert  $\mu$  gibt an, um wieviel mal größer der Diffusionswiderstand eines Materials ist als der einer gleichdicken Luftschicht. Die  $\mu$ -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 21 enthält  $\mu$ -Werte aus DIN 4108-4 [55].

**Tabelle 21.** Mauerwerk; Wasserdampf-Diffusionswiderstand  $\mu$  nach DIN V 4108-4:2004-07 [55]

Mauersteine	$\rho_N$	$\mu$
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
Leichtbetonsteine – Hohlblöcke – Vollblöcke, Vollsteine	$\geq 0,45$ $\leq 1,60$	5/10
	$\geq 0,45$ $\leq 1,40$	
Vollsteine, Vollblöcke	$\geq 1,60$ $\leq 2,00$	10/15
Betonsteine	$\geq 0,80$ $\leq 1,20$	5/15
	$\geq 1,40$ $\leq 2,40$	20/30

 $\rho_N$  Rohdichteklasse Mauersteine

## 7 Natursteine, Natursteinmauerwerk

Die Bedeutung von Natursteinmauerwerk im Vergleich zu Mauerwerk aus künstlichen Steinen ist für den Neubaubereich 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 Wärmedehnungskoeffizienten, die Schwind- und Quellung sowie die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck und die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl zusammenzustellen (s. Tabellen 22 bis 24). 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].

**Tabelle 22.** Natursteine; Druckfestigkeit  $\beta_D$ , Biegezugfestigkeit  $\beta_{BZ}$ , Druck-E-Modul  $E_D$ , Schleifverschleiß – Anhaltswerte, aus [3]

Naturstein	$\beta_D$	$\beta_{BZ}$	$E_D$ 10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup>	Schleifverschleiß cm <sup>3</sup> /50 cm <sup>2</sup>
	N/mm <sup>2</sup>			
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 23.** Natursteine; Wasseraufnahme bei Atmosphärendruck  $W_a$  und Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahlen<sup>1)</sup>

Naturstein	$W_a$ M.-%	$\mu$ (0/50)	$\mu$ (50/100)
Granit, Syenit	0,2...0,5	> 400	> 20
Dionit, 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 [64]

$\mu$  (0/50): Trockenbereich

$\mu$  (50/100): Feuchtbereich

## 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, 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 sicher-

**Tabelle 24.** Natursteine; Wärmedehnungskoeffizient  $\alpha_T$ , Schwind- und Quelldehnung  $\epsilon_s$ ,  $\epsilon_q$ -Anhaltswerte, aus [3]

Naturstein	$\alpha_T$ 10 <sup>-6</sup> /K	$\epsilon_s$ , $\epsilon_q$ 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

zustellen, 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 $\beta_D$

Die Druckfestigkeit ist in DIN EN 998-1 [65] bzw. DIN V 18550 [66] klassifiziert. Bei *Putzmörtel* nimmt  $\beta_D$  im Allgemeinen bis zum Alter von 28 d zu. Der Feuchtezustand beeinflusst  $\beta_D$  deutlich: Im nassen Zustand ist  $\beta_D$  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 $\beta_Z$

Bei *Putzmörtel* nimmt  $\beta_Z$  meist bis zum Alter von 28 d zu. Der Einfluss des Feuchtezustandes ist geringer als bei der Druckfestigkeit: Im Mittel verringert sich  $\beta_Z$  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 $\psi$

Der Abbau von Zugspannungen durch Relaxation lässt sich mit der Relaxationszahl  $\psi$  kennzeichnen:

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

$\sigma_t, \sigma_\infty$  Zugspannung nach der Zeit  $t$ , nach  $t = \infty$   
 $\sigma_0$  anfängliche Zugspannung

**Tabelle 25.** Endschwindwerte und Quellwerte von Putzmörteln, aus [3]

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

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  $\psi$ -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 $\varepsilon_s$ , Quellen $\varepsilon_q$

Schwind- und Quellwerte von *Putzmörteln* enthält Tabelle 25. 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 %.

## 8.4 Eigenschaftszusammenhänge

In Tabelle 26 sind Zusammenhänge zwischen verschiedenen Eigenschaften angegeben. Wie aus der Tabelle

**Tabelle 26.** Außenputz; Eigenschaftszusammenhänge, aus [3]

Zusammenhang zwischen	Putzmörtel (PM) Putz auf Putzgrund (PG)	Putzart Normalputz (NP) Leichtputz (LP)	Zusammenhang	Korrelations- koeffizient $R^2$
Zugfestigkeit $\beta_Z$ – Druckfestigkeit $\beta_D$	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 $\beta_Z$	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

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* 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 EN 1996-1-1:2006-01: Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten; Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk; Deutsche Fassung EN 1996-1-1:2005.
- [2] DIN 1053-1, 11.96. Mauerwerk; Berechnung und Ausführung.
- [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., Metzemaker, 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: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1/NA: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk (Entwurf 2011-10).
- [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 Mörtel Eigenschaften. 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).
- [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 Mauer Mörtels. 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 Mörtel Eigenschaften. 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 4108-4:2004-07-06. Wärmeschutz und Energie-Einsparung 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 998-1:2003-09: Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau, Teil 1: Putzmörtel. Deutsche Fassung EN 998-1:2003, NA Bau im DIN, Berlin 2003.
- [66] DIN V 18550:2005-04: Putz und Putzsysteme – Ausführung.

