

A Baustoffe ■ Bauprodukte

I Eigenschaften von Mauersteinen, Mauermörtel, Mauerwerk und Putzen 3

Wolfgang Brameshuber, Aachen

II Neuentwicklungen beim Mauerwerksbau mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (abZ) 31

Wolfram Jäger, Dresden und Roland Hirsch, Berlin

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 Autor bedankt sich ausdrücklich bei den Mitarbeitern/-innen der Arbeitsgruppe Mauerwerk am Lehrstuhl für Baustoffkunde der RWTH Aachen (Dorothea Saenger, Markus Graubohm) für die Zuarbeiten zur Fortschreibung dieses Beitrags.

Im Zuge der Ablösung der nationalen Bemessungsnorm DIN 1053-1 [1] bzw. DIN 1053-100 [2] durch den Eurocode 6 [3–6] inklusive der zugehörigen Nationalen Anhänge [7–9] 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.

Der Eurocode 6 teilt die Mauersteine in vier Kategorien ein, die den Lochanteil berücksichtigen. Diese Klassen werden in Deutschland bislang nicht übernommen, da die Lochanteile nicht zu Gruppierungen passen, wie sie sich national seit Jahrzehnten entwickelt haben. Daher wurde hier im Nationalen Anhang zum EC6 eine stark abweichende Regel in Form von Stein- und Lochgeometrie abhängigen Tabellen eingeführt. Dies bewirkt, dass die Materialausnutzung dem Steinmaterial deutlich besser angepasst wurde – ein wichtiger Beitrag zur Nachhaltigkeit, neben der ökonomischen Optimierung. Es zeigt sich somit auch ein Trend, den der Verfasser dieses ständigen Beitrags im Mauerwerk-Kalender vollumfänglich unterstützt, nämlich der Weg zum materialbegründeten Kennwert. Dies gilt nicht nur für die Druckfestigkeit, sondern insbesondere für Haftscher- und Haftzugfestigkeiten, die einen unmittelbaren Einfluss auf die Schub- und Biegezugfestigkeit von Mauerwerk haben. Wir unterscheiden hier derzeit nur auf Basis der Mörtelklassen. Warum? Weil es immer so war? Im Rahmen eines Entwicklungsprojekts zur Vereinfachung des EC6 wurde vom ibac ein Vorschlag für eine Umordnung und klarere Struktur bezüglich der Trennung von Bemessung, Konstruktion, Ausführung und Baustoffen erarbeitet. Dabei soll auch eine stärkere Spezifizierung der Haftscherfestigkeiten und Mauersteinzugfestigkeiten be-

rücksichtigt werden. Über das Projekt wird an anderer Stelle berichtet werden.

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 [10]. Wenn Materialkennwerte/Rechenwerte aus dem Eurocode 6 entnommen wurden, wird hierfür auf die Kommentierung zum EC6 [11] verwiesen, die noch weiterführende Erläuterungen enthält.

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 [10] ergibt sich nach Auswertung der Literatur [12–14] folgendes Bild: Für Hochlochziegel lässt sich kein Zusammenhang zwischen dem Nennwert der Steindruckfestigkeit und der Längsdruckfestigkeit angeben, unabhängig vom Lochanteil, genausowenig für Leichtbeton. Dies hat im Wesentlichen den Einfluss der Loch-/Steganordnung als Ursache. Im Einzelfall wird empfohlen, den Nachweis experimentell zu führen. Für

Tabelle 1. Verhältniswerte Steinlängs- $(\beta_{D,st,l})$ /Normdruckfestigkeit $(\beta_{D,st})$, aus [10]

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

Kalksandvollsteine und Kalksandlochsteine ergibt sich nach [10] ein durchaus verwertbarer Zusammenhang. Für Mauerziegel, Kalksandvollsteine und Kalksandlochsteine 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 $\beta_{D,st,l} / \beta_{D,st} = 0,91 - 0,04 \beta_{D,st}$ [10]. 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

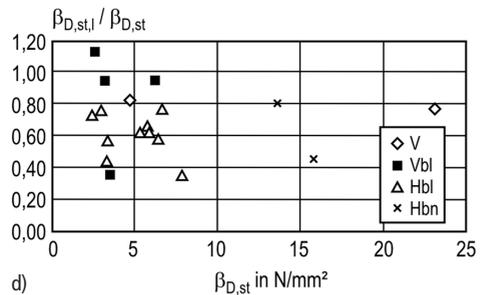
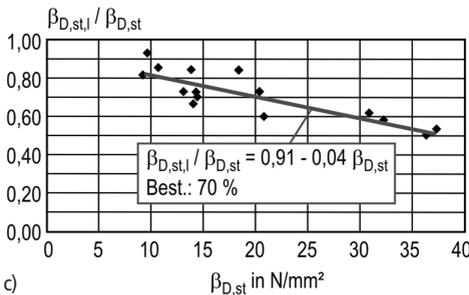
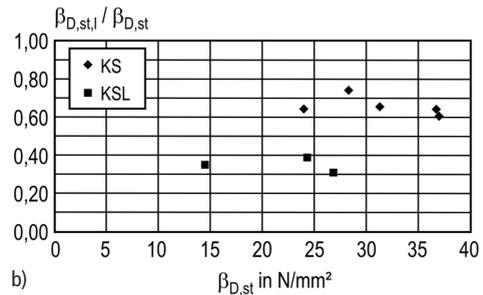
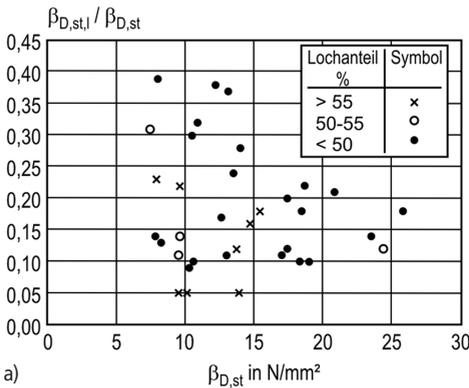


Bild 1. Steinlängs- $(\beta_{D,st,l})$ / Normdruckfestigkeit $(\beta_{D,st})$ in Abhängigkeit von der Normdruckfestigkeit [10]; a) Leichtlochziegel, b) Kalksandvollsteine, Kalksandlochsteine, c) Porenbeton-Blocksteine, Porenbeton-Plansteine, d) Leichtbetonsteine, Betonsteine

Tabelle 2. Verhältniswerte Steinzug-/Steindruckfestigkeit

| Steinart | $\delta_i = f_{bt,cal} / f_{st}$ DIN EN 1996-1-1/NA [7] | Mauerstein | $\beta_{z,l} / \beta_{D,st,prüf}$ [10] | | |
|---|---|-------------------|--|---------------|----------------------|
| | | | 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 Grifföchern 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 in Richtung Steinlänge
 $\beta_{D,st,prüf}$ Prüfwert der Steindruckfestigkeit in Richtung Steinhöhe

zur Lagerfuge bei bestimmten Verhältnissen Stein-/Mörteldruckfestigkeit wegen des entstehenden mehraxialen Spannungszustandes die Zugfestigkeit der Mauersteine 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 in 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 Grifföchern 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 [15]). 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 in Richtung Steinlänge bestimmten Zugfestigkeitswerte auf die in Richtung Steinhöhe geprüften Druckfestigkeitswerte bezogen als Verhältniswerte $\beta_{z,l}/\beta_{D,st}$ angegeben.

Tabelle 2 gibt den heutigen Stand der Auswertung [10, 16, 17] wieder.

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 [18] 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 σ_D

Nach [10] können für eine erste Abschätzung des Druck-E-Moduls folgende Beziehungen gewählt werden:

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

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

Der Verfasser empfiehlt, bei den wenigen Einzelfällen, wo der Elastizitätsmodul des Mauerwerks für Nachweise 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-Dehnungslinien 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 [10] (Best.: Bestimmtheitsmaß):

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

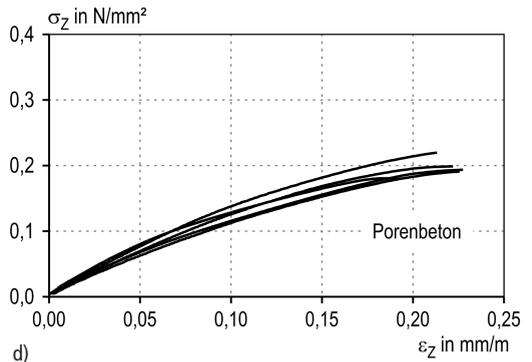
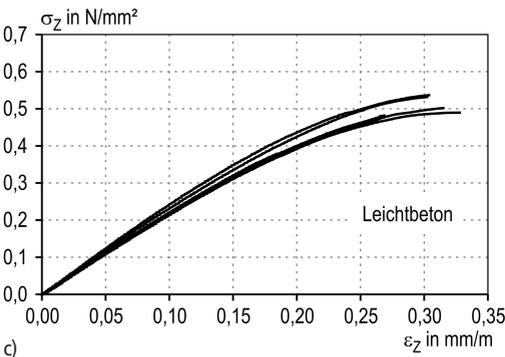
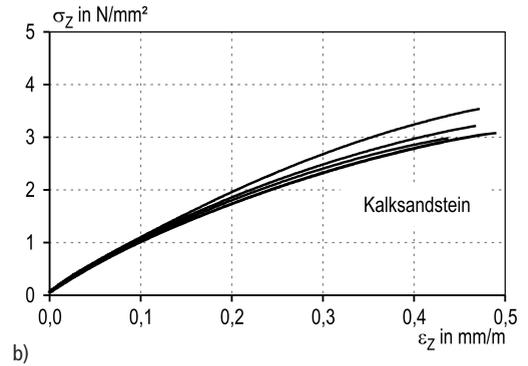
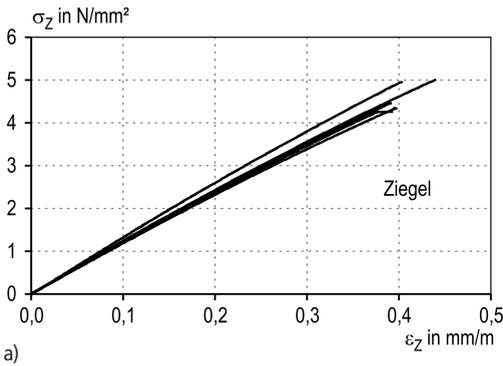


Bild 2. Spannungs-Dehnungslinien von Ziegeln (a), Kalksandstein (b), Leichtbeton (c) und Porenbeton (d)

Tabelle 3. Mauersteine; Querdehnungsmodul $E_{q,l}$ in 10^3 N/mm², Querdehnungszahl μ , Anhaltswerte [19–22], aus [10]

| Mauerstein | Festigkeitsklasse | $E_{q,l}$ | | 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

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

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

Porenbetonsteine

$$E_Z = 3180 \beta_{z,l} \quad (\text{Best.: } 78\%)$$

(Zylinder, Prismen; 21 Mittelwerte)

$$E_Z = 1,01 E_D \quad (\text{Best.: } 93\%)$$

(Zylinder; 11 Mittelwerte)

2.2.3 Spannungs-Dehnungslinie

In Bild 2 sind die Spannungs-Dehnungslinien 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 Querdehnungsmoduln von Mörtel und Stein wird letzterer stärker auf Zug beansprucht, was die Druckfestigkeit des Mauerwerks reduziert. Nach [10] 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. [23, 24]. 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 5.6.5 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 [10] 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 einschrittiger Scherbeanspruchung. Ein genormtes Prüfverfahren existiert nicht. Üblicherweise wird die Scherfestigkeit an nach 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 β_S und der Normmörteldruckfestigkeit β_D , ermittelt nach DIN EN 1015-11 [25] (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 [26] ergab

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

$$\beta_S = 2 \beta_Z$$

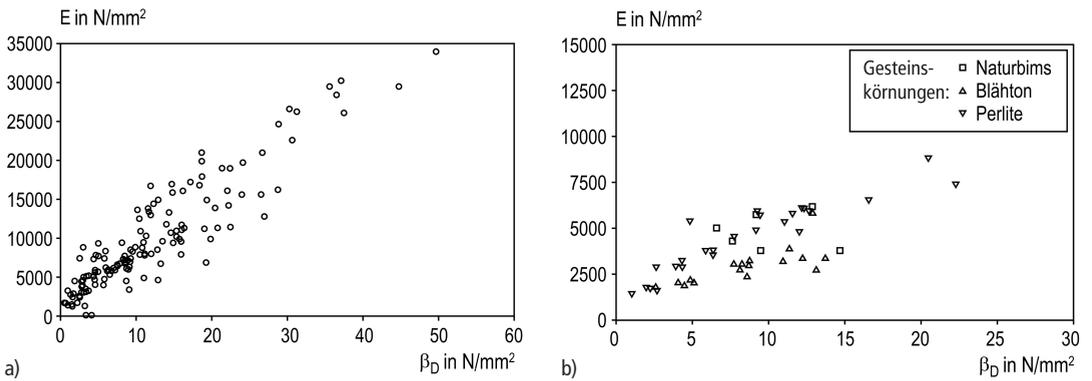


Bild 3. Mauermörtel; Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Normdruckfestigkeit β_D [10]; a) Normalmörtel, b) Leichtmörtel

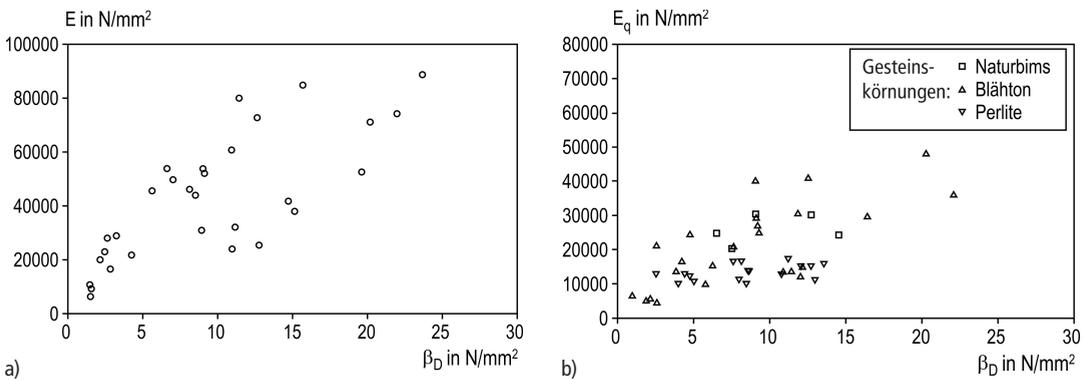


Bild 4. Mauermörtel; Querdehnungsmodul E_q in Abhängigkeit von der Normdruckfestigkeit β_D [10]; a) Normalmörtel, b) Leichtmörtel

Tabelle 4. Mauermörtel; Querdehnungsmodul E_q [27], aus [10]

| 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, Bläh- schiefer) | 36 | 0,8...1,2 | 4,0...21 | 16...48 |

n Anzahl Versuchswerte
 ρ_d Trockenrohddichte
 β_D Normdruckfestigkeit

Tabelle 5. Mauermörtel; Endschwindwerte $\epsilon_{s,sof}$ Normalmörtel [28] – 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 |

3.3 Verformungseigenschaften

3.3.1 E-Modul (Längsdehnungsmodul) E

Der E-Modul wird in der Regel nach DIN 18555-4 [29] zusammen mit dem Querdehnungsmodul ermittelt. Nach den vorliegenden Versuchsergebnissen lassen sich folgende Beziehungen zwischen E und der Normdruckfestigkeit β_D angeben [30] (s. auch Bild 3):

a) Normalmauermörtel

$$E = 2100 \cdot \beta_D^{0,7} \text{ bzw. } E \leq 700 \cdot \beta_D$$

b) Leichtmauermörtel mit Gesteinskörnungen aus Blähton

$$E = 1200 \beta_D^{0,6}$$

c) Leichtmauermörtel mit Gesteinskörnungen aus Perlite

$$E = 1200 \beta_D^{0,4}$$

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 Leichtmauermörteln mit sehr verformbaren Gesteinskörnungen der Fall. Ein Zusammenhang zwischen E_q und der Normdruckfestigkeit β_D kann jeweils nur für Mörtel mit gleicher Gesteinskörnung (gefügedichter Sand, Blähton, Naturbims, Perlite usw.) erwartet werden (Bild 4).

In Tabelle 4 sind E_q -Werte angegeben. Für Leichtmauermörtel 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 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 [31] 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 $\epsilon_{s,e}$ (rechnerische Endwerte) für Normalmauermörtel sind in der Tabelle 5 in Abhängigkeit 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 [32]. 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. In Abhängigkeit der Mörtelart und der Mörtelgruppe sind in DIN V 18580 [33] Mindestanforderungen an die Verbundfestigkeit im Alter von 28 Tagen angegeben. Geprüft wird die Haftscherfestigkeit entweder nach DIN 18555-5 [34] oder nach dem europäischen Verfahren in DIN EN 1052-3 [35]. Eine sehr detaillierte Zusammenfassung von Prüfmethode und Kennwerten wurde in [17] veröffentlicht. In [37] wird auf die Beanspruchungsarten spezifisch eingegangen.

4.2 Haftscherfestigkeit

Das Institut für Bauforschung der RWTH Aachen hat im Rahmen eines Forschungsprojektes [38] eine sehr umfassende Auswertung von Haftscherfestigkeitsuntersuchungen durchgeführt und damit verdeutlicht, dass eine Differenzierung zwischen unterschiedlichen Stein-/Mörtelkombinationen bezüglich der tatsächlichen Werte sehr sinnvoll ist (s. Tabellen 6a 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.

Bei der Biegezugbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen kann zur Abschätzung der Biegezugfestigkeit bei Fugenversagen ersatzweise die Haftscherfestigkeit angesetzt werden (s. Abschn. 5.5), obwohl hier die Drehbewegung des Steins einer Torsionsbeanspruchung entspricht. In [17] und [39] wird darauf speziell eingegangen.

4.3 Haftzugfestigkeit

Dieser Kennwert ist u. a. für die Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen von Relevanz. Tabelle 8 ist [10] 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 [15] (s. auch [40]) beschrieben.

Tabelle 6a. 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 | – | – | – | – | – | |
| 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 6b. 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 6c. 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 |

Kurzzeichen siehe Tabelle 6a

Tabelle 6d. 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 |

Kurzzeichen 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 | |
| | 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 |

Kurzzeichen siehe Tabelle 6a

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

| Mauerstein | Mauermörtel | | | | Werte für f_{vk0} nach DIN EN 1996-1-1/NA [7] | | | |
|-------------------------|-------------|--------|-------|------|---|--------|-------|------|
| | NM IIa | NM III | LM 36 | DM | NM IIa | NM III | LM 36 | DM |
| KS-Referenz | 0,20 | – | – | – | 0,18 | 0,22 | 0,18 | 0,22 |
| 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 | | | | |

Tabelle 8. Stein/Mörtel; Haftzugfestigkeit β_{HZ} ; Prüfalter im Allgemeinen mind. 14 d [10]

| Mauerstein | | Mauermörtel | Prüfverfahren ²⁾ | n | \bar{x} | min x | max x |
|------------|------------------------------|-------------|-----------------------------|--------|-------------------|-------|-------|
| Art | Feuchtezustand ¹⁾ | | | | N/mm ² | | |
| 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 |

Tabelle 8. Stein/Mörtel; Haftzugfestigkeit β_{HZ} ; Prüfalter im Allgemeinen mind. 14 d [10] (Fortsetzung)

| Mauerstein | | Mauermörtel | Prüfverfahren ²⁾ | n | \bar{x} | min x | max x |
|------------|------------------------------|-------------|-----------------------------|-----------------|-------------------|-------|-------|
| Art | Feuchtezustand ¹⁾ | | | | | | |
| | | | | | N/mm ² | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 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 [15]); BW: Bondwrench (SM 4 in [15])

3) Prüfalter unter 14 d

4) Keine Angabe von Einzelwerten

n: Anzahl der Versuchsreihen

(): Anzahl der Einzelwerte

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

5 Eigenschaftswerte von Mauerwerk

5.1 Allgemeines

Die Eigenschaftswerte von Mauerwerk können aufgrund seiner ausgeprägten Anisotropie und Heterogenität in Abhängigkeit der zahlreichen in der Praxis vorkommenden Stein-Mörtel-Kombinationen sehr unterschiedlich sein und weichen zudem teilweise deutlich von denen anderer Baustoffe ab. Ähnlich wie Beton ist auch Mauerwerk ein Baustoff, der sich in erster Linie für druckbeanspruchte Bauteile eignet. Die Beanspruchbarkeit auf Zug, Biegezug und Schub ist wesentlich geringer als die auf Druck. Mauerwerk wird daher in erster Linie zum Abtrag von vertikalen Lasten herangezogen. Die nachfolgenden Abschnitte enthalten eine Übersicht über die für die unterschiedlichen Beanspruchungen maßgebenden Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Mauerwerk.

5.2 Druckfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen

5.2.1 Experimentelle Bestimmung

Die Druckfestigkeit von Mauerwerk senkrecht zu den Lagerfugen kann sowohl experimentell als auch rechnerisch ermittelt werden.

Bei der experimentellen Bestimmung der Mauerwerkdruckfestigkeit werden kleine (sogenannte RILEM-) Mauerwerkwände durch vertikale Lasten senkrecht zu den Lagerfugen gleichmäßig bis zum Bruch belastet. Alternativ kann die vertikale Beanspruchbarkeit auch aus der Druckprüfung von geschosshohen Wandprüfkörpern hergeleitet werden. Die Mauerwerkdruckfestigkeit errechnet sich dabei in beiden Fällen aus der im Versuch ermittelten Höchstlast und der belasteten Mauerwerkquerschnittsfläche. Bei der Prüfung können

durch kontinuierliche Verformungsmessungen (z. B. mit induktiven Wegaufnehmern) auch die Spannungs-Dehnungslinien und der Druck-E-Modul (siehe Abschnitt 5.6.2.1) mit bestimmt werden. Die Prüfung ist in der europäischen Norm DIN EN 1052-1 [41] beschrieben.

5.2.2 Rechnerische Bestimmung

Es ist inzwischen hinlänglich bekannt, dass die Druckfestigkeit von Mauerwerk nicht nur von den Festigkeitseigenschaften seiner Ausgangsstoffe abhängt, sondern von einer Vielzahl weiterer Parameter, u. a. den horizontalen Formänderungsunterschieden von Mauerstein und Mauermörtel sowie der hygrischen Wechselwirkung zwischen dem Wasserabsaugverhalten des Steins und dem Wasserrückhaltevermögen des Mörtels, beeinflusst wird. Ein theoretisch begründetes und abgesichertes Ingenieurmodell zur rechnerischen Bestimmung der Mauerwerkdruckfestigkeit unter Berücksichtigung der wesentlichen Einflussparameter liegt jedoch trotz zahlreicher Untersuchungen zu dieser Thematik bislang nicht vor. Aus diesem Grund wird die Druckfestigkeit von Mauerwerk in den aktuellen europäischen Regelwerken weiterhin nur in grober Näherung auf Grundlage von Versuchsergebnissen mittels eines empirischen Modells aus den einaxialen Druckfestigkeitswerten der Einzelkomponenten Mauerstein und Mauermörtel abgeleitet.

Bislang wurde die Druckfestigkeit von Mauerwerk bei Berechnung nach der inzwischen abgelösten deutschen Mauerwerknorm DIN 1053-1 [1] durch die Grundwerte der zulässigen Druckspannungen σ_0 in Abhängigkeit von Steinfestigkeitsklassen, Mörtelarten und Mörtelgruppen festgelegt und tabellarisch angegeben. Diese Unterteilung wurde auch in der zwischenzeitlich vom globalen (deterministischen) Sicherheitskonzept

auf das semiprobabilistische Teilsicherheitskonzept umgestellten DIN 1053-100 [2] übernommen. Eine Unterscheidung nach den verschiedenen in der Baupraxis vorkommenden Mauersteinarten war sowohl beim vereinfachten als auch beim genaueren Berechnungsverfahren bislang nicht vorgesehen. Zukünftig ist für die Bemessung und Ausführung von Mauerwerk nur noch die europäische Normenreihe DIN EN 1996 (auch bekannt als Eurocode 6 [3–6]) maßgebend, unter Beachtung der zugehörigen nationalen Anhänge [7–9], in denen länderspezifische Besonderheiten gesondert von den CEN-Mitgliedsstaaten geregelt werden. Wie bereits in DIN 1053-100 [2] basiert auch die Bemessung nach der europäischen Norm auf dem Teilsicherheitskonzept. Die Standsicherheitsnachweise für Mauerwerk werden nicht mehr wie früher in DIN 1053-1 [1] auf der Spannungsebene (vorh $\sigma_D \leq \text{zul } \sigma_D$), sondern auf der Kräftebene geführt. Anstelle des bisherigen Grundwertes der zulässigen Druckspannungen σ_0 wird nun mit dem charakteristischen Wert f_k der Druckfestigkeit von Mauerwerk gerechnet. Es ist im Grenzzustand der Tragfähigkeit nachzuweisen, dass der Bemessungswert der einwirkenden Normalkraft nicht größer ist als der Bemessungswert des vertikalen Tragwiderstands ($N_{Ed} \leq N_{Rd}$). Die Bemessungswerte der Einwirkung und des Tragwiderstands ergeben sich dabei aus den jeweiligen charakteristischen Größen und den entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten.

Eine der wesentlichen Zielsetzungen bei der Erarbeitung des EC6 [3–6] und der zugehörigen nationalen Anhänge [7–9] war u. a. die differenziertere Beschreibung der Mauerwerkdruckfestigkeit in Abhängigkeit der unterschiedlichen Steinarten, um vorhandene Tragfähigkeitsreserven zukünftig besser nutzen zu können. Hierzu wurde am Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (ibac) eine umfassende Auswertung von Mauerwerkdruckversuchen durchgeführt, die als Basis für die Ableitung der charakteristischen Druckfestigkeitswerte in den nationalen Anhängen zum EC6 gedient hat. Wesentliche verwendete Literaturstellen sind u. a. [42–47].

Für die in Deutschland gebräuchlichen Stein-Mörtel-Kombinationen sind die im vereinfachten Berechnungsverfahren für die Nachweisführung benötigten charakteristischen Werte f_k der Druckfestigkeit von Mauerwerk im Nationalen Anhang zu DIN EN 1996-3 [9], Anhang D tabellarisch angegeben. Zusätzlich bietet das genauere Berechnungsverfahren nach DIN EN 1996-1-1 [3] die Möglichkeit, die charakteristischen Werte f_k der Druckfestigkeit von Mauerwerk rechnerisch mit den nachfolgenden Rechenansätzen für Mauerwerk mit Normalmörtel in Gl. (1a) bzw. für Mauerwerk mit Leichtmörtel oder Dünnbettmörtel in Gl. (1b) und den in den Tabellen des Nationalen Anhangs zu DIN EN 1996-1-1 [7] in Abhängigkeit von der jeweiligen Stein-Mörtel-Kombination angegebenen Parametern zu ermitteln. Die Faktoren K sowie die Exponenten α und β sind dabei wie zuvor erläutert das Ergebnis

der Auswertung von umfangreichen Versuchsdaten zur Bestimmung der Druckfestigkeit von Mauerwerk.

Nach dem Nationalen Anhang zu DIN EN 1996-1-1 [7] ist in Gl. (1a) bzw. (1b) nicht wie in DIN EN 1996-1-1 [3] angegeben die normierte Steindruckfestigkeit f_b , sondern die aus der jeweiligen Druckfestigkeitsklasse der Mauersteine umgerechnete mittlere Mindeststeindruckfestigkeit f_{st} einzusetzen.

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

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

Dabei sind

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

Die derzeit in den nationalen Anhängen zu DIN EN 1996-1-1 [7] bzw. DIN EN 1996-3 [9] angegebenen charakteristischen Werte f_k der Druckfestigkeit von Mauerwerk orientieren sich natürlich auf der sicheren Seite liegend an den unteren Grenzwerten.

Das nachfolgende Bild 5 zeigt beispielhaft anhand der Auswertung von Druckversuchen an Mauerwerk aus Kalksand-Vollsteinen und Kalksand-Blocksteinen in Kombination mit Normalmauermörtel der Mörtelgruppe IIa, wie unterschiedlich hoch die Druckfestigkeit von Mauerwerk im Versuch bei annähernd gleichen Steindruckfestigkeitswerten ausfallen kann. Dargestellt sind zum einen die auf eine einheitliche Schlankheit der Mauerwerkswände $\lambda = h_{ef}/t = 5$ umgerechneten Versuchswerte der Mauerwerkdruckfestigkeit $\beta_{D,mw}$ in Abhängigkeit der geprüften Steindruckfestigkeit inklusive Formfaktor $\beta_{D,st}$. Zusätzlich enthält das Diagramm die gemäß den nationalen Anhängen zum Eurocode [7, 9] ansetzbaren f_k -Werte in Abhängigkeit der aus der jeweiligen Steinfestigkeitsklasse umgerechneten mittleren Mindeststeindruckfestigkeit f_{st} . Diese Gegenüberstellung von reinen Versuchsdaten und normativ geregelten charakteristischen Festigkeitswerten verdeutlicht, dass es sich bei der Ableitung der Mauerwerkdruckfestigkeit aus den einaxialen Druckfestigkeitswerten der Einzelkomponenten Mauerstein und Mauerermörtel in den meisten Fällen nur um eine sehr grobe Näherungslösung handeln kann. Anhand der grau markierten Versuchsdaten in Bild 5 ist nachvollziehbar, dass die Mauerwerkdruckfestigkeit einiger Mauerstein-Mauerermörtel-Kombinationen deutlich über den gemäß der europäischen Norm an-

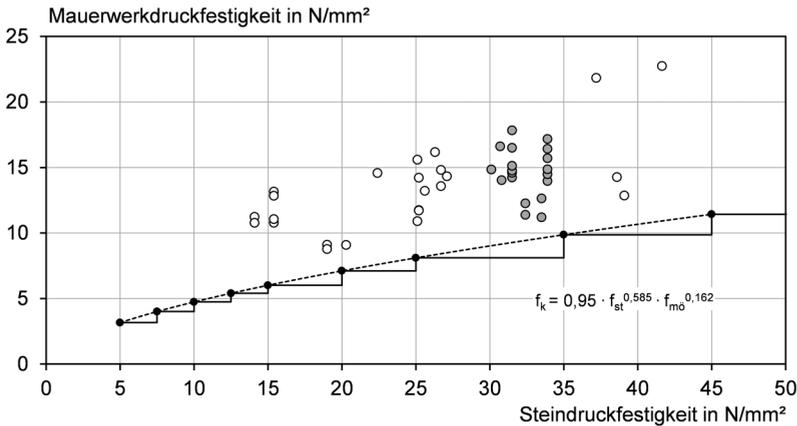


Bild 5. Druckfestigkeit von Mauerwerk aus Kalksand-Vollsteinen und Kalksand-Blocksteinen mit Normalmauermörtel der Mörtelgruppe IIa in Abhängigkeit von der Steindruckfestigkeit

setzbaren Druckfestigkeitswerten liegen kann, mit der Folge, dass die Materialien bislang teilweise nicht sinnvoll ausgenutzt werden.

5.3 Druckfestigkeit parallel zu den Lagerfugen

Bei biegedruckbeanspruchtem Mauerwerk kann die Längsdruckfestigkeit eine Rolle spielen. Für weiterführende Angaben wird auf [10, 48] verwiesen.

5.4 Zugfestigkeit und -tragfähigkeit

Die Zugfestigkeit von Mauerwerk parallel zu den Lagerfugen wird beim Nachweis der Gebrauchstauglichkeit benötigt, um z. B. die Gefahr einer Rissbildung abschätzen zu können. Dabei sind zwei Versagensarten zu untersuchen, nämlich das Steinversagen und das Fugenversagen.

Bei der Herleitung der Berechnungsansätze zur Bestimmung der Zugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen (siehe Gln. 2, 3a, 3b) wurde davon ausgegangen, dass in den vertikalen Stoßfugen, auch wenn sie vermörtelt sind, keine Zugspannungen übertragen werden können. Der Grund hierfür ist, dass die Stoßfugen nicht überdrückt sind und die Haftzugfestigkeit zwischen Mauerstein und Mauermörtel i. d. R. aufgrund des Mörtelschwindens und einer oftmals mangelhaften Ausführung vernachlässigbar klein ist.

Für den Fall Steinversagen bedeutet dies, dass die im Bereich einer Steinlage und Mörtelfuge auftretenden Zugspannungen parallel zu den Lagerfugen nur durch einen halben Mauerstein und die Mörtelfuge übertragen werden können. Da die Dicke der Mörtelfuge i. d. R. deutlich geringer ist als die Mauersteinhöhe, ist die Mauerwerkzugfestigkeit in diesem Fall näherungsweise halb so groß wie die Steinzugfestigkeit. Wesentliche Einflussgröße auf die Mauerwerkzugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen bei Steinversagen ist daher die

Steinzugfestigkeit in Richtung Steinlänge. Diese ist abhängig von der Steinart, dem Lochanteil und -bild.

$$f_t \approx f_{t,u}/2 \quad \text{für Steinzugversagen} \quad (2)$$

Bei Fugenversagen müssen die im Bereich einer Steinlage und Mörtelfuge auftretenden Zugspannungen parallel zu den Lagerfugen über Schubspannungen in der Lagerfuge auf der Überbindelänge (l_{oi}) in die jeweilige nächste Steinlage übertragen werden. Die übertragbare Zugkraft in den Stoßfugen kann vernachlässigt werden, da die Haftzugfestigkeit zwischen Mauerstein und Mauermörtel i. d. R. gering ist (s. o.). Die Mauerwerkzugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen ist in diesem Fall erreicht, wenn die in der Lagerfuge auftretenden Schubspannungen die Scherfestigkeit überschreiten. Die wesentlichen Einflussgrößen auf die Mauerwerkzugfestigkeit bei diesem Belastungs- und Versagensfall sind daher die auf die Mauersteinhöhe bezogene Überbindelänge und die Scherfestigkeit, die sich aus der Haftscherfestigkeit und dem auflastabhängigen Reibungsanteil zwischen Mauerstein und Mauermörtel zusammensetzt. Die Haftscherfestigkeit ist dabei abhängig von der Steinart, Lochung, Porenstruktur und dem Feuchtegehalt der Mauersteine sowie der Zusammensetzung des Mörtels. Der Reibungsbeiwert wird im Wesentlichen durch die Oberflächenstruktur, den Lochanteil sowie die Lochstruktur, d. h. der Verzahnung zwischen Mauerstein und Mauermörtel, beeinflusst.

$$f_t \approx f_{v0} \cdot l_{oi}/h_u \quad \text{für Fugenversagen ohne Auflast} \quad (3a)$$

bzw.

$$f_t \approx (f_{v0} + \mu \cdot \sigma_d) \cdot l_{oi}/h_u \quad \text{für Fugenversagen mit Auflast} \quad (3b)$$

mit

f_t Mauerwerkzugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen

$f_{t,u}$ Zugfestigkeit des Steins in Längsrichtung

Tabelle 9. Mauerwerk; Zugfestigkeit f_t in N/mm^2 – Zugbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen [49–51], aus [10]

| Mauerstein | | | Mauermörtel | | SF | n | f_t (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 | 1260 | NM | II...III | vm | 8 | 0,12; 0,20; 0,21 |
| HLz | 2DF | | 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: Normalmauermörtel; DM: Dünnbettmörtel; LM: Leichtmauermörtel; SF: Stoßfugen
vm: vermörtelt; um: unvermörtelt; n: Anzahl der Einzelwerte

- f_{v0} Haftscherfestigkeit
 μ Reibungsbeiwert
 σ_d Druckspannung senkrecht zur Lagerfuge
 l_{ot} Überbindelänge
 h_u 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 [15] 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 9 sind die Bandbreiten der Werte aufgeführt. Neuere Erkenntnisse sind noch nicht eingearbeitet, verändern aber auch das Ergebnis nur unwesentlich. Tabelle 9 wurde [10] entnommen.

5.5 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- und 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]). In der europäischen Prüfnorm DIN EN 1052-2 [53] ist die Bestimmung der Biegezugfestigkeit an solchen kleinen wandartigen Mauerwerkkörpern für beide Beanspruchungsrichtungen 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 6 sind die verfügbaren Ergebnisse zu Untersuchungen der Biegezugfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge dargestellt. Es fasst die Ergebnisse der Auswertung in [52, 54] zusammen. Neuere Erkenntnisse sind in [39] enthalten.

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

In den Bildern 7 bis 9 sind Auswertungen von Untersuchungsergebnissen zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge für Ziegelmauerwerk (Bild 7), Kalksandsteinmauerwerk (Bild 8) und Porenbetonmauerwerk (Bild 9) dargestellt. Die Ergebnisse machen deutlich, dass ein Wert zwischen $0,15 \text{ N/mm}^2$

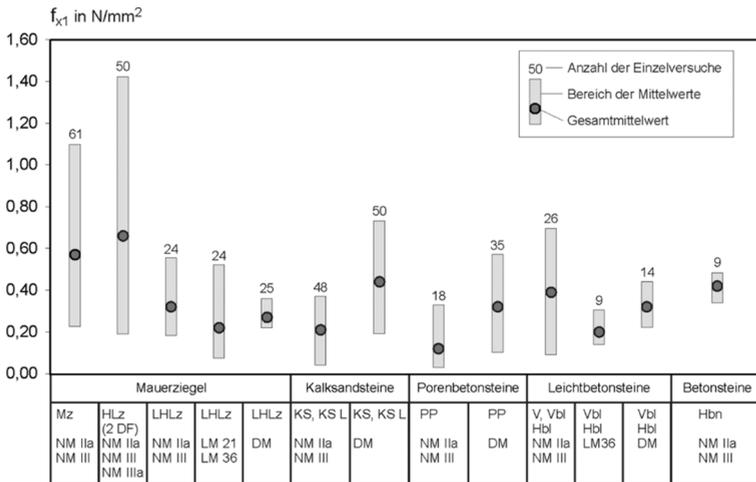


Bild 6. Bandbreite der Biegezugfestigkeitswerte senkrecht zur Lagerfuge, aus [54]

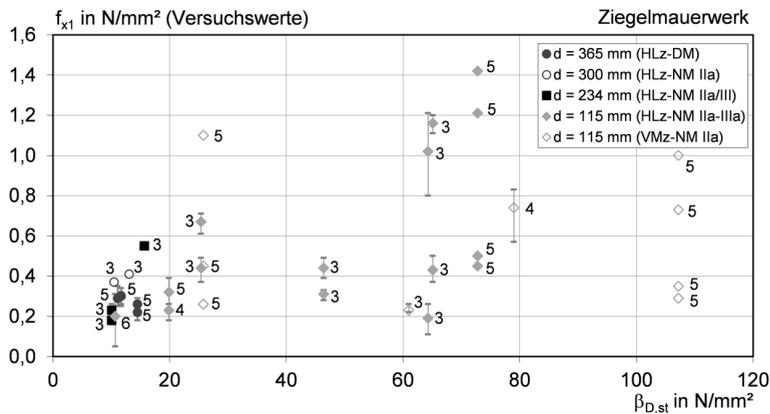


Bild 7. Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen von Ziegelmauerwerk mit Normalmauer- und Dünnbettmörtel in Abhängigkeit von der Steindruckfestigkeit, Mittelwerte und Streubereich der Einzelwerte, Prüfkörperanzahl [55]

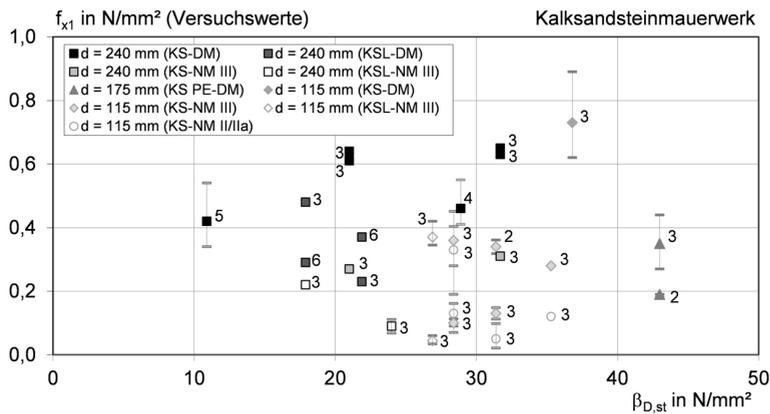


Bild 8. Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen von Kalksandsteinmauerwerk mit Normalmauer- und Dünnbettmörtel in Abhängigkeit von der Steindruckfestigkeit, Mittelwerte und Streubereich der Einzelwerte, Prüfkörperanzahl [36]

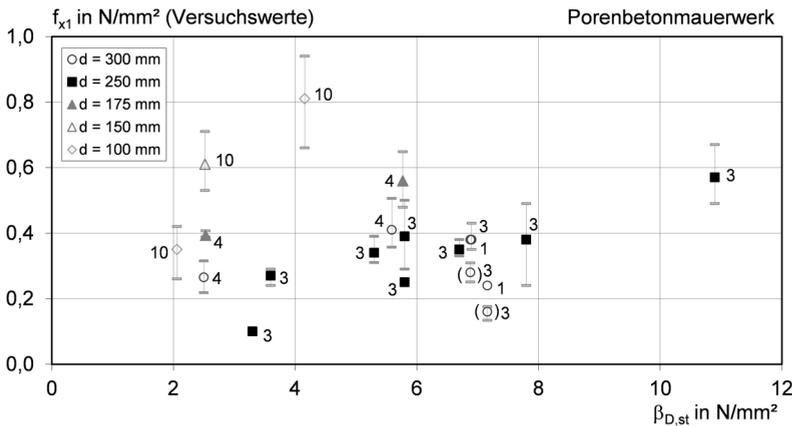


Bild 9. Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen von Porenbetonmauerwerk mit Dünnbettmörtel in Abhängigkeit von der Steindruckfestigkeit, Mittelwerte und Streubereich der Einzelwerte, Prüfkörperanzahl [16]

und 0,20 N/mm² auch für Normalmauermörtel gerechtfertigt ist.

Für die Nachweisführung der Biegetragfähigkeit ist ein Wert zwingend erforderlich. In tragenden Wänden darf jedoch nach DIN EN 1996-1-1/NA [7] die Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen f_{xk1} (mit einer Bruchebene parallel zu den Lagerfugen) nicht in Rechnung gestellt werden. Lediglich bei Wänden aus Panelementen, die kurzzeitig rechtwinklig zur Wandebene beansprucht werden, darf normgemäß ein Wert $f_{xk1} = 0,2 \text{ N/mm}^2$ zugrunde gelegt werden.

Bei der Biegezugfestigkeit parallel zur Lagerfuge kann sowohl Steinzug- als auch Fugenversagen 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 [39]. Die charakteristische Biegezugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen f_{xk2} (mit einer Bruchebene senkrecht zu den Lagerfugen) wird nach DIN EN 1996-1-1/NA [7] als Kleinstwert aus den Kriterien Fugen- und Steinversagen bestimmt. Die Berechnungsgleichungen 4a und 4b basieren auf den Berechnungsansätzen zur Bestimmung der Zugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen gemäß Abschnitt 5.4.

Tabelle 10. Werte für die Haftscherfestigkeit f_{vk0} in N/mm² nach DIN EN 1996-1-1/NA [7]

| Mörtelart, Mörtel- gruppe | NM I | NM II | NM IIa LM 21 LM 36 | NM III | NM IIIa | DM |
|---------------------------------|------|-------|--------------------------|--------|---------|------|
| f_{vk0} | – | 0,08 | 0,18 | 0,22 | 0,26 | 0,22 |

$$f_{xk2} = 0,5 \cdot f_{bt,cal} \leq 0,7 \text{ in N/mm}^2 \quad \text{für Steinzugversagen} \quad (4a)$$

$$f_{xk2} = (\alpha \cdot f_{vk0} + \mu \cdot \sigma_d) \cdot l_{ol}/h_u \quad \text{für Fugenversagen} \quad (4b)$$

mit

- α Korrekturbeiwert zur Berücksichtigung des Einflusses der Stoßfugenvermörtelung
 $\alpha = 1,0$ für vermörtelte Stoßfugen
 $\alpha = 0,5$ für unvermörtelte Stoßfugen
- f_{vk0} Haftscherfestigkeit nach Tabelle 10
- μ Reibungsbeiwert: 0,6
- σ_d Bemessungswert der zugehörigen Druckspannung rechtwinklig zur Lagerfuge
- l_{ol}/h_u Verhältnis Überbindelänge/Steinhöhe
- $f_{bt,cal}$ rechnerische Steinzugfestigkeit nach Tabelle 11

Tabelle 11. Rechnerische Steinzugfestigkeit $f_{bt,cal}$ nach DIN EN 1996-1-1/NA [7]

| Steinart | $f_{bt,cal}$ |
|---|--|
| Hohlblocksteine | $0,020 \cdot f_{st}$ |
| Hochlochsteine | $0,026 \cdot f_{st}$ |
| Steine mit Grifflöchern oder Griffaschen | $0,026 \cdot f_{st}$ |
| Vollsteine ohne Grifflöcher oder Griffaschen | $0,032 \cdot f_{st}$ |
| Porenbeton der Länge $\geq 498 \text{ mm}$ und der Höhe $\geq 248 \text{ mm}$ | $0,082 \cdot \frac{1}{1,25} \cdot \frac{1}{0,7 + \left(\frac{f_{st}}{25}\right)^{0,5}} \cdot f_{st}$ |

Tabelle 12. Mauerwerk; Druck-E-Modul E_D gerundet in 10^3 N/mm² (Druckbeanspruchung senkrecht zu den Lagerfugen)
[43, 45–48, 57, 58]

| Mauersteine | | | Mauermörtel | | | | | |
|--|-----------------|------------------------|---------------------------|------|------|------|------------------------|----------------|
| Steinsorte | Norm | Festigkeits- klasse | Normalmauermörtel, Gruppe | | | | Leichtmauer- mörtel | Dünnbettmörtel |
| | | | II | IIa | III | IIIa | | |
| HLz, Mz ($\rho_N \geq 1,2$) | DIN EN 771-1 | 4 | – | – | – | – | 2,5 | 4,0 |
| | DIN 105-100 | 6 | – | – | – | – | 4,0 | 4,5 |
| | DIN 20000-401 | 8 | – | – | – | – | 5,0 | 5,5 |
| | Zulassung | 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 ($\rho_N \leq 1,0$) | | 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 | DIN EN 771-2 | 4 | 1,9 | 2,2 | 2,5 | 2,9 | – | |
| | DIN 106 | 6 | 2,6 | 3,0 | 3,4 | 4,0 | | 8,0 |
| | DIN 20000-402 | 8 | 3,2 | 3,7 | 4,2 | 4,9 | | 10,0 |
| | Zulassung | 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 | | |
| | | 60 | 14,2 | 16,4 | 18,9 | 21,8 | | |
| KS L | | 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 | DIN EN 771-3 | 2 | 2,2 | 2,2 | 2,3 | – | 2,2 | 2,0 |
| | DIN V 18151-100 | 4 | 3,5 | 3,6 | 3,8 | – | 3,0 | 3,5 |
| | DIN 20000-403 | 6 | 4,6 | 4,8 | 5,0 | – | 3,6 | 4,5 |
| | | 8 | 5,6 | 5,9 | 6,1 | – | 4,1 | – |
| V, Vbl | DIN EN 771-3 | 2 | 2,2 | 2,4 | 2,5 | – | 2,0 | 1,6 |
| | DIN V 18152-100 | 4 | 3,7 | 3,9 | 4,1 | – | 3,0 | 3,3 |
| | DIN 20000-403 | 6 | 4,9 | 5,2 | 5,6 | – | 3,7 | 5,0 |
| | | 8 | 6,0 | 6,4 | 6,8 | – | 4,3 | 6,6 |
| Hbn | DIN EN 771-3 | 4 | 4,5 | 5,8 | 7,6 | – | – | – |
| | DIN V 18153-100 | 6 | 5,8 | 7,5 | 9,8 | – | | |
| | DIN 20000-403 | 8 | 6,9 | 9,0 | 11,7 | 15,2 | | |
| | | 12 | 8,8 | 11,5 | 15,0 | 19,5 | | |
| PB, PP | DIN EN 771-4 | 2 | 1,1 | – | – | – | – | 1,1 |
| | DIN V 4165-100 | 4 | 1,8 | | | | | 2,0 |
| | DIN 20000-404 | 6 | 2,4 | | | | | 2,9 |
| | | 8 | 3,0 | | | | | 3,7 |

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.

5.6 Verformungseigenschaften

5.6.1 Allgemeines

Die nachfolgenden Kennwerte wurden von *Schubert* [10] zusammengestellt und veröffentlicht. Da sich an der Datenlage nichts verändert hat, werden diese Daten inklusive der Bezeichnung der jeweiligen Kennwerte übernommen.

5.6.2 Druckbeanspruchung senkrecht zu den Lagerfugen

5.6.2.1 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

ε_1 Längsdehnung bei 1/3 max σ_D .

Er wird für bestimmte Bemessungsfälle und für die Beurteilung der Rissicherheit benötigt. Ermittelt wird der E-Modul nach DIN EN 1052-1 [41]. 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 [43, 45–47, 56, 57] ergaben sich folgende Zusammenhänge:

Tabelle 13. Mauerwerk; Druck-E-Modul $E_D = K_E \cdot f_k$ gerundet in N/mm² in Abhängigkeit vom charakteristischen Wert f_k der Druckfestigkeit von Mauerwerk nach DIN EN 1996-1-1/NA [7]

| Mauersteinart | Kennzahl K_E | |
|-------------------|----------------|---------------|
| | Rechenwert | Wertebereich |
| Mauerziegel | 1100 | 950 bis 1250 |
| Kalksandsteine | 950 | 800 bis 1250 |
| Leichtbetonsteine | 950 | 800 bis 1100 |
| Betonsteine | 2400 | 2050 bis 2700 |
| Porenbetonsteine | 550 | 500 bis 650 |

- Mauerwerk aus Kalksandsteinen
 $E_D = 500 \cdot \beta_D$ Normalmauer-, Dünnbettmörtel (grobe Näherung, Streubereich der Einzelwerte etwa 50%)
- Mauerwerk aus Leichtbetonsteinen
 $E_D = 1240 \cdot \beta_D^{0,77}$ Leichtmauermörtel
 $E_D = 1040 \cdot \beta_D$ Normalmauermörtel
 $E_D = 930 \cdot \beta_D$ Dünnbettmörtel bzw.
 $E_D = 600 \cdot \beta_{D,st}$ Dünnbettmörtel (Streubereich der Einzelwerte etwa $\pm 20\%$)
- Mauerwerk aus Porenbetonsteinen
 $E_D = 520 \cdot \beta_D$ Normalmauermörtel bzw.
 $E_D = 570 \cdot \beta_{D,st}^{0,69}$ Normalmauermörtel (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
 $E_D = 1480 \cdot \beta_D$ Leichtmauermörtel
 $E_D = 1170 \cdot \beta_D$ Normalmauermörtel
 $E_D = 1190 \cdot \beta_D$ Dünnbettmörtel bzw.
 $E_D = 460 \cdot \beta_{D,st}$ Dünnbettmörtel (Streubereich der Einzelwerte etwa $\pm 50\%$)

Tabelle 14. Mauerwerk; Querdehnungszahl μ_D , Dehnungswerte bei Höchstspannung $\varepsilon_{u,D}$ in mm/m und Völligkeitsgrad α_0 (Druckbeanspruchung senkrecht zu den Lagerfugen, Normalmörtel) [21, 22, 56]

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

| | |
|---------------------------|--|
| $\beta_{D,st}$ | Steindruckfestigkeit |
| $E_{D,p}$, $\beta_{D,p}$ | Bezogen auf Mauerwerk mit Schlankheit $\lambda = 10$ |

In Tabelle 12 sind unter Bezug auf die neuesten Auswertungen $E_{D,p}$ -Werte für Mauerwerk aus Normalmauer-, Leichtmauer- und Dünnbettmörtel angegeben. Für die Berechnung der $E_{D,p}$ -Werte wurden Stein- und Mörteldruckfestigkeitswerte zugrunde gelegt, die jeweils 10% größer sind als die Mindestmittelwerte nach Norm.

Die Tabelle 13 enthält Werte für die Kennzahl K_E zur Bestimmung des E-Moduls nach DIN EN 1996-1-1/NA [7].

5.6.2.2 Querdehnungszahl μ_D und Dehnung bei Höchstspannung $\epsilon_{u,D}$

Die Eigenschaftswerte μ_D und $\epsilon_{u,D}$ für auf Druck senkrecht zu den Lagerfugen beanspruchtes Mauerwerk können bei der Prüfung nach DIN EN 1052-1 mitbestimmt werden. Vorliegende Zahlenwerte enthält Tabelle 14.

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

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

errechnet werden.

In Tabelle 14 sind α_0 -Werte angegeben.

5.6.3 Druckbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen

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

Der E-Modul $E_{D,p}$ wird wie in Abschnitt 5.6.2.1 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
 $E_{D,p} = 300 \cdot \beta_{D,p}$ (Kalksandvollsteine)
 $E_{D,p} = 700 \cdot \beta_{D,p}$ (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.

5.6.3.2 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%).

5.6.4 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.

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

Er wird vor allem für die Beurteilung der Rissicherheit benötigt. Nach Versuchsergebnissen, im Wesentlichen aus [49, 50], kann $E_{Z,p}$ für Mauerwerk aus Normalmauermörtel mit vermörtelten Stoßfugen näherungsweise wie folgt aus der Mauerwerkzugfestigkeit $\beta_{Z,p}$ bestimmt werden [51] (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. s_Z ist bis auf sehr wenige Ausnahmen deutlich niedriger als $E_{Z,p}$, s. [51].

5.6.5 Feuchtedehnung ϵ_{fr} (Schwinden ϵ_{sr} , 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 [24].

In Tabelle 15 sind Endwerte für Feuchtedehnung ($\epsilon_{f,ec}$) und Kriechen (ϕ_{ec}) sowie α_T -Werte als „Rechenwerte“

Tabelle 15. Mauerwerk; Endwerte der Feuchtedehnung $\varepsilon_{f_{\infty}}$, Endkriechzahl φ_{∞} und Wärmedehnungskoeffizient α_T [23, 28, 32] aus [10]

| Mauersteine | | $\varepsilon_{f_{\infty}}$ ¹⁾ | | φ_{∞} | | α_T | |
|-------------------|------------------------------------|--|----------------------------|--------------------|--------------|---------------------|--------------|
| Steinart | Restnorm | Rechenwert | Wertebereich ²⁾ | Rechenwert | Wertebereich | Rechenwert | Wertebereich |
| | | | | | | | |
| Mauerziegel | DIN 105-100 | 0 | +0,3...-0,2 ³⁾ | 1,0 | 0,5...1,5 | 6 | 5...7 |
| Kalksandsteine | DIN 106 | -0,2 | -0,1...-0,3 | 1,5 | 1,0...2,0 | 8 | 7...9 |
| Leichtbetonsteine | DIN V 18151-100 DIN V 18152-100 | -0,4 | -0,2...-0,5 | 2,0 | 1,5...2,5 | 10; 8 ⁴⁾ | 8...12 |
| Betonsteine | DIN V 18153-100 | -0,2 | -0,1...-0,3 | 1,0 | - | 10 | 8...12 |
| Porenbetonsteine | DIN V 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 16. Leichtmauerwerk; Endwerte der Feuchtedehnung $\varepsilon_{f_{\infty}}$, Endkriechzahlen φ_{∞} , Lagerungsklima 20/65 (s. auch [24, 26]), aus [10]

| Mauerstein | | Mauermörtel | Anzahl d. Versuchsserien | $\varepsilon_{f_{\infty}}$ ¹⁾ | | φ_{∞} | |
|-------------------|-----------------|----------------|--------------------------|--|----------------------------|--------------------|----------------------------|
| Steinart/-sorte | Restnorm | | | Rechenwert | Wertebereich ²⁾ | Rechenwert | Wertebereich ²⁾ |
| | | mm/m | | | | | |
| HLz ³⁾ | DIN 105-100 | Leichtmörtel | 4 | +0,1 | 0 bis +0,3 | 2,0 | 1,1 bis 2,7 |
| | | Dünnbettmörtel | 1 | - | 0 | - | 0,1 |
| PP | DIN V 4165-100 | Dünnbettmörtel | 10 | -0,1 | -0,2 bis +0,1 | 0,5 | 0,2 bis 0,7 |
| Vbl | DIN V 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 17.** Kalksandsteine und Kalksandsteinmauerwerk; Engschwindwerte $\varepsilon_{s_{\infty}}$ in mm/m, Schwindklima 20/65 [10]

| Statistischer Kennwert | Einzelsteine | | Mauerwerk | |
|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------|
| | 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 Versuchsserien

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

 x_{10}, x_{90} 10%-, 90%-Quantilwert**Tabelle 18.** Leichtbetonsteine und Leichtbetonmauersteinwerk; Endschwindwerte $\varepsilon_{s_{\infty}}$ in mm/m, Schwindklima 20/65, hoher Anfangsfeuchtegehalt der Steine (in der Regel Wasservorlagerung) [10]

| 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

(in etwa häufigste Werte) und in der Regel zutreffende Wertebereiche angegeben. Die Wertebereiche können in Ausnahmefällen größer sein. Die Werte gelten für Mauerwerk mit Normalmauermörtel. Sie können näherungsweise auch für Mauerwerk mit Leichtmauer- und Dünnbettmörtel angenommen werden. Empfohlen wird, für Leichtmauerwerk die in Tabelle 16 angegebenen Werte anzusetzen.

Die ε_{fz} - 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 16 zusammengestellt. Der Kennnisstand über Feuchtedehnung, Kriechen und Wärmedehnung ist zusammen mit neuesten Auswertergebnissen und Hinweisen für Prüfverfahren in [24] dargestellt. Die Tabellen 17 und 18 enthalten Endschwindwerte mit statistischen Kennzahlen aus [23].

6 Feuchtigkeitstechnische 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 (→Anforderungen 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 vorgehäst, so kann dem Mörtel nach dem Vermauern zu viel Wasser

Tabelle 19. Mauersteine; Wasseraufnahmekoeffizient ω ermittelt nach DIN 52617, aus [10]

| 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

entzogen werden. Mögliche Folgen sind eine zu geringe Verbundfestigkeit zwischen Mauermörtel und Mauerstein (Haftscher- und Haftzugfestigkeit) und eine zu geringe Mörteldruckfestigkeit in der Fuge. 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 [59] – bisher DIN 52617 – 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 19 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

Tabelle 20. Mauerwerk; Wasserdampf-Diffusionswiderstand μ nach DIN 4108-4 [61]

| Mauersteine | ρ_N | μ |
|--|----------------------------|--------|
| Vollklinker, Hochlochklinker, Keramikklinker | $\geq 1,80$ | 50/100 |
| | $\leq 2,40$ | |
| Vollziegel, Hochlochziegel, Füllziegel | $\geq 1,20$ | 5/10 |
| | $\leq 2,40$ | |
| Hochlochziegel HLzA, HLzB, HLzW, WDz | $\geq 0,55$ | 5/10 |
| | $\leq 1,00$ | |
| Kalksandsteine | $\geq 1,00$ | 5/10 |
| | $\leq 1,40$ | |
| | $\geq 1,60$ $\leq 2,20$ | |
| 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 | $\geq 0,45$ | 5/10 |
| | $\leq 1,40$ | |
| | $\geq 1,60$ $\leq 2,00$ | |
| Geschlitzte Vollblöcke | $\geq 0,45$ | 5/10 |
| | $\leq 1,00$ | |
| Betonsteine | $\geq 0,80$ | 5/15 |
| | $\leq 1,20$ | |
| | $\geq 1,40$ $\leq 2,40$ | |

ρ_N Rohdichteklasse Mauersteine

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 [60] ermittelt.

Tabelle 20 enthält μ -Werte aus DIN 4108-4 [61].

7 Natursteine, Natursteinmauerwerk

Die Bedeutung von Natursteinmauerwerk im Vergleich zu Mauerwerk aus künstlichen Steinen ist für den Neubereich gering, jedoch für die Erhaltung von historischen 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 Wertangaben über die Druck- und Biegezugfestigkeit, den Druck-E-Modul, den Schleifverschleiß als Kennwert für das Abnutzungsverhalten, den Wärmeausdehnungskoeffizienten, die Schwind- und Quelldehnung sowie die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck und die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl zusammenzustellen (s. Tabellen 21 bis 23). Die Zahlenangaben stammen im Wesentlichen aus [62–64]. Für vulkanische Tuffsteine lagen umfangreiche Untersuchungsergebnisse aus [65] vor.

Bemessungsgrundlagen, d. h. im Wesentlichen Angaben zur zulässigen Beanspruchung von Tuffsteinmauerwerk, können [66] entnommen werden. Informationen, die der weiteren Vervollständigung und Aktualisierung der Eigenschaftswerte dienen, werden gern berücksichtigt. Verschiedene Eigenschaftswerte finden sich auch in [67].

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 [69], 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 [69, 70] 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 [71] bzw. DIN EN 13914-1 [72] und DIN EN 13914-2 [73] in Verbindung mit DIN 18550-1 [74] und DIN 18550-2 [76] 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.

8.2.2 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:

Tabelle 21. Natursteine; Druckfestigkeit β_D , Biegezugfestigkeit β_{BZ} , Druck-E-Modul E_D , Schleifverschleiß – Anhaltswerte, aus [10]

| 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 22. 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 | | |
| 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 [68]

 μ (0/50): Trockenbereich μ (50/100): Feuchtbereich**Tabelle 23.** Natursteine; Wärmedehnungskoeffizient α_T Schwind- und Quelldehnung ε_s , ε_q -Anhaltswerte, aus [10]

| Naturstein | α_T 10 ⁻⁶ /K | ε_s , ε_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 |

Tabelle 24. Endschwindwerte und Quellwerte von Putzmörteln, aus [10]

| Putzart | Endschwindwerte (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 |

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

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 [10]:

- 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 24. Das Schwinden ist meist nach drei Monaten beendet. Das zweite Schwinden – nach dem Erstschilden und darauffolgendem Quellen – ist deutlich kleiner als das Erstschilden, nach vorliegenden Wer-

ten 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 25 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* 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 1053-1:1996-11: Mauerwerk – Teil 1: Berechnung und Ausführung.
- [2] DIN 1053-100:2007-09: Mauerwerk – Teil 100: Berechnung auf der Grundlage des semiprobabilistischen Sicherheitskonzepts.
- [3] DIN EN 1996-1-1:2013-02: Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk.
- [4] DIN EN 1996-1-2:2011-04: Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall.
- [5] DIN EN 1996-2:2010-12: Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 2: Planung, Auswahl der Baustoffe und Ausführung von Mauerwerk.

Tabelle 25. Außenputze; Eigenschaftszusammenhänge, aus [10]

| 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 | $E_{z,33} = 11150 \beta_{z0,73}$ | 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

- [6] DIN EN 1996-3:2010-12: Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 3: Vereinfachte Berechnungsmethoden für unbewehrte Mauerwerksbauten.
- [7] DIN EN 1996-1-1/NA:2012-05 mit Änderungen A1:2014-03 und A2:2015-01: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk.
- [8] DIN EN 1996-2/NA:2012-01: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 2: Planung, Auswahl der Baustoffe und Ausführung von Mauerwerk.
- [9] DIN EN 1996-3/NA:2012-01 mit Änderungen A1:2014-03 und A2:2015-01: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 3: Vereinfachte Berechnungsmethoden für unbewehrte Mauerwerksbauten.
- [10] Schubert, P.: Eigenschaftswerte von Mauerwerk, Mauersteinen, Mauermörtel und Putzen. Mauerwerk-Kalender 2010, S. 3–25. Berlin: Ernst & Sohn.
- [11] Alfes, C.; Brameshuber, W.; Graubner, C.-A. et al.: Der Eurocode 6 für Deutschland. DIN EN 1996: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten mit Nationalen Anhängen. Kommentierte Fassung. Berlin [u. a.]: Beuth [u. a.], 2013.
- [12] Glitza, H.: Druckbeanspruchung parallel zur Lagerfuge. Mauerwerk-Kalender 13 (1988), S. 489–496. Berlin: Ernst & Sohn.
- [13] Schubert, P.; Metzemacher, H.: Biegezugfestigkeit von Mauerwerk senkrecht und parallel zur Lagerfuge. Aachen: Institut für Bauforschung, 1987. Forschungsbericht Nr. F 275.
- [14] Schubert, P.; Hoffmann, G.: Druckfestigkeit von Mauerwerk parallel zu den Lagerfugen. Mauerwerk-Kalender 19 (1994), S. 715. Berlin: Ernst & Sohn.
- [15] Schubert, P.: Prüfverfahren für Mauerwerk, Mauersteine und Mauermörtel. Mauerwerk-Kalender 16 (1991), S. 685–697. Berlin: Ernst & Sohn.
- [16] Schmidt, U.; Graubohm, M.; Brameshuber, W.: Poreneigenschaften für DIN 1053-1. Aachen: Institut für Bauforschung, 2008. Forschungsbericht Nr. F 7057.
- [17] Brameshuber, W.; Graubohm, M.; Schmidt, U.: Festigkeitseigenschaften von Mauerwerk, Teil 4: Scherfestigkeit. Mauerwerk-Kalender 31 (2006), S. 193–225. Berlin: Ernst & Sohn.
- [18] Schubert, P.; Friede, H.: Spaltzugfestigkeit von Mauersteinen. Die Bautechnik (1980), Heft 4, S. 117–122.
- [19] Kirtschig, K.; Metje, W.-R.: Leichtzuschläge für Mauermörtel. Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Universität Hannover (Hrsg.). Forschungsbericht, September 1979.
- [20] Schellbach, G.; Jung, E.: Verformungsverhalten und Tragfähigkeit von Mauerwerk mit Leichtmauermörteln. Essen: Institut für Ziegelforschung (IZF). Forschungsbericht B II 3-80 01 77-27, 1983.
- [21] 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.
- [22] Schubert, P.; Meyer, U.: Verbesserung der Druckfestigkeit von Naturbimsbetonmauerwerk durch Optimierung der Mörtel Eigenschaften. Aachen: Institut für Bauforschung, 1991. Forschungsbericht Nr. F 308.
- [23] Schubert, P.: Formänderungen von Mauersteinen, Mauermörtel und Mauerwerk. Mauerwerk-Kalender 17 (1992), S. 623–637. Berlin: Ernst & Sohn.
- [24] Schubert, P.: Schadensfreies Konstruieren mit Mauerwerk; Teil 1: Formänderungen von Mauerwerk – Nachweisverfahren, Untersuchungsergebnisse, Rechenwerte. Mauerwerk-Kalender 27 (2002), S. 313–331. Berlin: Ernst & Sohn.
- [25] DIN EN 1015-11:2007-05: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 11: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel.
- [26] Siech, H.J.: Scherfestigkeit, Haftscherfestigkeit und Fugendruckfestigkeit. Mauerwerk 12 (2008), Heft 6, S. 340–345.
- [27] 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.
- [28] Schubert, P.: Zur Feuchtedehnung von Mauerwerk. Dissertation, RWTH Aachen, 1982.
- [29] DIN 18555-4:1986-03: Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln – Teil 4: Festmörtel; Bestimmung der Längs- und Querdehnung sowie von Verformungskenngrößen von Mauermörteln im statischen Druckversuch.
- [30] Schubert, P.: Einfluss von Leichtmörtel auf die Tragfähigkeit und Verformungseigenschaften von Mauerwerk. In: Ziegelindustrie International 38 (1985), Nr. 6, S. 327–335.
- [31] DIN 52450:1985-08: Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Probekörpern; Prüfung anorganischer nichtmetallischer Baustoffe.
- [32] Glitza, H.: Kriechverhalten von Mauerwerk. Aachen: Institut für Bauforschung, 1984. Forschungsbericht Nr. F 163 sowie Glitza, H.: Zum Kriechen von Mauerwerk. Die Bautechnik (1985), Heft 12, S. 415–418.
- [33] DIN V 18580:2007-03: Mauermörtel mit besonderen Eigenschaften.

- [34] DIN 18555-5:1986-03: Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln – Teil 5: Festmörtel; Bestimmung der Haftscherfestigkeit von Mauermörteln.
- [35] DIN EN 1052-3:2007-06: Prüfverfahren für Mauerwerk – Teil 3: Bestimmung der Anfangsscherfestigkeit (Haftscherfestigkeit).
- [36] Brameshuber, W.; Saenger, D.: Erarbeiten einer elektronischen Datenbank zu Biegezugfestigkeitsversuchen an Mauerwerk aus Kalksandsteinen sowie Auswertung der Daten. Aachen: Institut für Bauforschung, RWTH Aachen University, 2011. Forschungsbericht Nr. F 7066.
- [37] Schubert, P.: Zur Haftscherfestigkeit zwischen Mörtel und Stein. Mauerwerk-Kalender 12 (1987), S. 497–506. Berlin: Ernst & Sohn.
- [38] Brameshuber, W.; Schmidt, U.; Graubohm, M.: Auswertung Haftscherfestigkeit. Aachen: Institut für Bauforschung, RWTH Aachen University, 2005. Forschungsbericht Nr. F 7018.
- [39] Schmidt, U.: Bruchmechanischer Beitrag zur Biegezugfestigkeit von Mauerwerk. Dissertation. In: Schriftenreihe Aachener Beiträge zur Bauforschung, Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (2015), Nr. 19.
- [40] DIN EN 1052-5:2005-06: Prüfverfahren für Mauerwerk – Teil 5: Bestimmung der Biegehaftzugfestigkeit.
- [41] DIN EN 1052-1:1998-12: Prüfverfahren für Mauerwerk – Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit.
- [42] Schubert, P.: Druckfestigkeit von Mauerwerk aus Leichtbetonsteinen und Dünnbettmörtel; Auswertung von Untersuchungsergebnissen im Hinblick auf zulässige Grundspannungen nach DIN 1053-1:1990-02. 1993 (nicht veröffentlicht).
- [43] Schubert, P.; Meyer, U.: Druckfestigkeit von Porenbeton- und Leichtbetonmauerwerk. Mauerwerk-Kalender 18 (1993), S. 627–634. Berlin: Ernst & Sohn.
- [44] 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. In: Mitteilungen aus dem Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung (1987), Nr. 54.
- [45] 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.
- [46] Schubert, P.: Festigkeits- und Verformungseigenschaften von modernem Mauerwerk. Weimar: Bauhaus-Universität, 2003. In: 15. Internationale Baustofftagung – ibautil, 24.–27.09.2003, Weimar, S. 1043–1065.
- [47] 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.
- [48] Schubert, P.; Graubohm, M.: Druckfestigkeit von Mauerwerk parallel zu den Lagerfugen. Mauerwerk 8 (2004), Nr. 5, S. 198–208.
- [49] Backes, H.-P.: Zum Verhalten von Mauerwerk bei Zugbeanspruchung in Richtung der Lagerfugen. Dissertation, RWTH Aachen, 1985 sowie auch Backes, H.-P.: Zugfestigkeit von Mauerwerk und Verformungsverhalten unter Zugbeanspruchung. Aachen: Institut für Bauforschung, 1983. Forschungsbericht Nr. F 124.
- [50] Metzemacher, H.: Verformungsverhalten von Mauerwerk unter Zugbeanspruchung (Zugspannungsrelaxation). Aachen: Institut für Bauforschung, 1987. Forschungsbericht Nr. F 225.
- [51] Schubert, P.: Festigkeit und Verformungseigenschaften von Mauerwerk unter Zugbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen. Mauerwerk 13 (2009), Heft 6, S. 364–370.
- [52] Schubert, P.: Biegezugfestigkeit von Mauerwerk – Untersuchungsergebnisse an kleinen Wandprüfkörpern. Mauerwerk-Kalender 22 (1997), S. 611–628. Berlin: Ernst & Sohn.
- [53] DIN EN 1052-2:2016-08, Prüfverfahren für Mauerwerk; Teil 2: Bestimmung der Biegezugfestigkeit.
- [54] Schmidt, U.; Schubert, P.: Festigkeitseigenschaften von Mauerwerk; Teil 2: Biegezugfestigkeit. Mauerwerk-Kalender 29 (2004), S. 31–63. Berlin: Ernst & Sohn.
- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] Schubert, P.: Mauerwerk aus Leichtbetonsteinen mit Dünnbettmörtel – Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul und Bruchdehnung. Mauerwerk 6 (2002), Heft 2, S. 55–61.
- [58] 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 Schubert, P.; Glitza, H.: Mathematische Beschreibung der Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls von Mauerwerk von Stein- und Mörtel Eigenschaften. Aachen: Institut für Bauforschung, 1983. Forschungsbericht Nr. F 162.
- [59] DIN EN ISO 15148:2003-03: Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen.
- [60] DIN EN ISO 12572:2015-01: Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit.
- [61] DIN 4108-4:2013-02: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte.
- [62] Mehling, G.: Naturstein-Lexikon. München: Verlag Georg D. W. Callweg, 2. Auflage, 1981.

- [63] DIN 52100:1939-07: Prüfung von Naturstein; Richtlinien zur Prüfung und Auswahl von Naturstein (zurückgezogen).
- [64] Wendehorst, R.; Mutz, H.; Achten, H. et al.: Bautechnische Zahlentafeln, 23. Aufl. Stuttgart: Teubner, 1987.
- [65] Sybertz, F.: Ermittlung von Baustoffkennwerten von Tuffgestein und Möglichkeiten zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit von Tuffsteinmauerwerk. Aachen: Institut für Bauforschung, 1986. Forschungsbericht Nr. F 168.
- [66] Schubert, P.: Tuffsteinmauerwerk – Standsicherheit und Gebrauchsfähigkeit; Bemessungsgrundlagen. In: Mauerwerk aus Tuffstein. Landesinstitut für Bauwesen und angewandte Bauschadensforschung (LBB), Aachen (Hrsg.), 1992.
- [67] Siedel, H.: Arten, Klassifizierung, technische Eigenschaften und Kennwerte von Naturstein. Mauerwerk-Kalender 29 (2004), S. 5–29. Berlin: Ernst & Sohn.
- [68] DIN EN 12524:2000-07: Wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswerte (zurückgezogen).
- [69] Schubert, P.: Außenputz auf Leichtmauerwerk – Vermeiden schädlicher Risse. Mauerwerk 10 (2006), Nr. 3, S. 87–101.
- [70] Schubert, P.; Beer, I.: Außenputz auf Leichtmauerwerk – Einfluss der Putzgrundfeuchte auf die Putzeigenschaften, Teile 1 und 2. Mauerwerk 7 (2003), Heft 2, S. 66–71, Heft 3, S. 94–107.
- [71] DIN EN 998-1:2015-11: Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau – Teil 1: Putzmörtel.
- [72] DIN EN 13914-1:2016-09: Planung, Zubereitung und Ausführung von Innen- und Außenputzen – Teil 1: Außenputz.
- [73] DIN EN 13914-2:2016-09: Planung, Zubereitung und Ausführung von Innen- und Außenputzen – Teil 2: Planung und wesentliche Grundsätze für Innenputz.
- [74] DIN 18550-1:2014-12: Planung, Zubereitung und Ausführung von Innen- und Außenputzen – Teil 1: Ergänzende Festlegungen zu DIN EN 13914-1 für Außenputze.
- [75] DIN 18550-2:2015-06: Planung, Zubereitung und Ausführung von Innen- und Außenputzen – Teil 2: Ergänzende Festlegungen zu DIN EN 13914-2 für Innenputze.

