

I Eigenschaften und Eigenschaftswerte von Mauersteinen, Mauermörtel und Mauerwerk

Michael Raupach, Dorothea Saenger und Bernd Winkels, Aachen

1 Einleitung

Der vorliegende Beitrag wurde von Dr. Peter Schubert[†] am Institut für Baustoffforschung (ibac) der RWTH Aachen University ab dem Jahr 1989 verfasst und ab dem Jahr 2013 durch Prof. Wolfgang Brameshuber[†] fortgeführt. Die Autoren haben ihn neu aufbereitet. In den nachfolgenden Abschnitten werden die wesentlichen Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Mauersteinen, Mauermörtel und Mauerwerk jeweils kurz hinsichtlich Bedeutung und Prüfverfahren beschrieben und – soweit möglich und sinnvoll – Eigenschaftswerte angegeben. Diese beruhen auf Auswertungen von Daten tatsächlich geprüfter Materialien und Materialkombinationen, entstanden in zahlreichen Forschungsvorhaben am ibac bzw. zusammengetragen im Rahmen ergänzender Literaturrecherchen. Es wird deutlich, dass aufgrund der vielfältigen Materialien und Kombinationsmöglichkeiten eine große Bandbreite an Eigenschaftswerten entsteht. In Normen und allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen werden anzusetzende Eigenschaftswerte bzw. Mindesteigenschaftswerte festgelegt. Die hier aufgeführten 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 von Bauwerken. In Grenzfällen können durch einen ingenieurmäßig überdachten Ansatz geeigneter Kennwerte vorhandene Baustoffreserven ausgenutzt werden. Nicht Gegenstand dieses Beitrags sind wärme- und schallschutztechnische Eigenschaftswerte sowie Eigenschaftswerte, die regelmäßig im Rahmen von Normen, Zulassungen etc. nachzuweisen sind, wie z. B. die Druckfestigkeit oder die Rohdichte.

2 Eigenschaftswerte von Mauersteinen

2.1 Festigkeitseigenschaften

2.1.1 Druckfestigkeit in Steinhöhe

Die Druckfestigkeit in Richtung Steinhöhe ist eine der wesentlichen Kenngrößen von Mauersteinen. Die Prüfung der Druckfestigkeit erfolgt nach DIN EN 772-1 [16] an ganzen Mauersteinen.

2.1.2 Druckfestigkeit in Steinlänge und -breite

Bei einigen Beanspruchungen von Mauerwerkbauteilen bzw. Bauteilbereichen, wie Scheibenschub, Biegung (Biegedruckzone) oder Teilflächenbelastung senkrecht zur Wandebene, können die Mauersteine in Richtung Steinlänge bzw. -breite auf Druck beansprucht werden. Die Prüfung der Druckfestigkeit in diese Richtungen erfolgt in Anlehnung an DIN EN 772-1 [16] an ganzen Mauersteinen.

Die Druckfestigkeit in Richtung Steinlänge und -breite ist im Allgemeinen kleiner als in Richtung Steinhöhe. Bei Vollsteinen resultiert herstellungsbedingt (Pressen, Strangpressen, Rüttelverdichtung oder Treiben) eine leichte Anisotropie. Die Form der Mauersteine hat ebenfalls einen großen Einfluss auf die Prüfwerte der Steindruckfestigkeit. Bei Lochsteinen resultieren je nach Lochanteil, Form der Lochung, Lochanordnung etc. weitaus kleinere Druckfestigkeitswerte.

Anhaltswerte von Druckfestigkeitsverhältnissen Steinlänge/Steinhöhe sind in [1] angegeben. Nach [1] lassen sich daraus folgende Zusammenhänge ableiten: Unabhängig vom Lochanteil kann für Hochlochziegel und Leichtbetonhohlblöcke kein Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit in Steinhöhe und der Druckfestigkeit in Steinlänge festgestellt werden. Für Mauerziegel, Kalksandvollsteine und Kalksandlochsteine ist das Druckfestigkeitsverhältnis Steinlänge/Steinhöhe von der Steindruckfestigkeit in Steinhöhe weitgehend unabhängig. Für Porenbetonsteine ergibt sich mit zunehmender Steindruckfestigkeit eine Abnahme des Druckfestigkeitsverhältnisses.

2.1.3 Zug- und Spaltzugfestigkeit

Für die Schub- und Biegetragfähigkeit von Mauerwerk kann die Steinzugfestigkeit in Richtung Steinhöhe und -länge maßgebend werden. Bei der Mauerwerkdrucktragfähigkeit ist wegen des entstehenden mehraxialen Spannungszustands die Steinzugfestigkeit in Richtung Steinbreite und -länge eine maßgebende Größe.

Die Prüfung der Zugfestigkeit ist nicht normativ geregelt. Je nach Anisotropie, Form und Lochung unterscheiden sich i. d. R. auch die Zugfestigkeitswerte richtungsabhängig.

Tabelle 1 gibt den Stand der Auswertung nach [2] wieder. Die in Richtung Steinlänge bestimmten Zugfestigkeitswerte sind als Verhältniswerte bezogen auf die in Richtung Steinhöhe geprüften Druckfestigkeitswerte angegeben. In Tabelle 1 sind zudem rechnerische Steinzugfestigkeitswerte bezogen auf die umgerechnete mittlere Steindruckfestigkeit nach DIN EN 1996-1-1/NA [17] aufgeführt. Bei diesen Werten handelt es sich um charakteristische Werte.

Mithilfe der angegebenen Verhältniswerte $f_{bt,cal}/f_{st}$ kann die rechnerische Steinzugfestigkeit für die Ermittlung der charakteristischen Biegezug- und Schubfes-

tigkeit bei Steinzugversagen abgeschätzt werden, vgl. Abschnitte 6.2.4 und 6.2.5. Um die Verhältniswerte $\beta_{z,l}/\beta_{D,st,prüf}$ für den Nachweis der Biegezug- und Schubtragfähigkeit ansetzen zu können, sind die Prüfwerte jeweils noch in charakteristische Werte umzurechnen. In Grenzfällen können durch Ansatz dieser Werte ggf. vorhandene Baustoffreserven ausgenutzt und höhere Biegezug- bzw. Schubfestigkeiten erzielt werden.

In bestimmten Fällen kann das Heranziehen der Spaltzugfestigkeit zur Abschätzung der Zugfestigkeit von Vollsteinen von Vorteil sein. Als Anhaltswert kann näherungsweise ein Verhältnis Spaltzugfestigkeit $\beta_{sz,l}$ zu Zugfestigkeit $\beta_{z,l}$ zwischen 1,1 und 1,3 angenommen werden, vgl. [1].

2.2 Verformungseigenschaften

2.2.1 Druck-Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul gibt das Verhältnis der einwirkenden Spannung zur resultierenden elastischen Dehnung an und ist allgemein bei Mauerwerk als Sekantenmodul bei einem Drittel der Höchstspannung unter

Tabelle 1. Mauersteine; Verhältniswerte Steinzug-/Steindruckfestigkeit nach [2]

Steinart	Mauerstein	$\beta_{z,l}/\beta_{D,st,prüf}$			$f_{bt,cal}/f_{st}$
		Mittelwert	Wertebereich	Anzahl Versuchswerte	
Hohlblocksteine	Hbl	0,08	0,05 ... 0,13	8	0,020
	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	HLz	0,03	0,013 ... 0,041	20	0,026
	LHLz	0,01	0,002 ... 0,019	54	
	KS L	0,035	0,026 ... 0,055	19	
Steine mit Grifflöchern und Griffaschen	KS(GL)	0,045	0,027 ... 0,065	24	0,026
Vollsteine ohne Grifflöcher oder Griffaschen	KS	0,063	0,039 ... 0,081	18	0,032
	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	
Porenbetonsteine	PB, PP	0,11	0,06 ... 0,19	24	$\frac{0,082}{1,25} \cdot \frac{1}{0,7 + \left(\frac{f_{st}}{25}\right)^{0,5}}$
	PB2, PP2	0,18	0,13 ... 0,20	7	
	PB und PP 4, 6, 8	0,11	0,09 ... 0,13	8	

$\beta_{z,l}$ Prüfwert der Steinzugfestigkeit in Richtung Steinlänge

$\beta_{D,st,prüf}$ Prüfwert der Steindruckfestigkeit in Richtung Steinhöhe (ohne Formfaktor)

$f_{bt,cal}$ rechnerische Steinzugfestigkeit nach DIN EN 1996-1-1/NA [17]

f_{st} umgerechnete mittlere Steindruckfestigkeit nach DIN EN 1996-1-1/NA [17]

Deutscher Ausschuss für Mauerwerk e.V. (DAfM)

(Dübel-) Versuche am Bauwerk in Mauerwerk: Aktuelle Regelungen für Kunststoffdübel und Metall-Injektionsanker zur Verankerung im Mauerwerk

DAfM Schriftenreihe Heft 4

- Erläuterungen zu den beiden aktuellen Technischen Regeln des DIBt
- Vorschläge für praktische Anwendung an Bauwerken
- Darstellung von 3 umfangreichen Praxisbeispielen



12 / 2020 · 156 Seiten · 88 Abbildungen · 19 Tabellen

Softcover
ISBN 978-3-433-03347-0
€ 59*

BESTELLEN

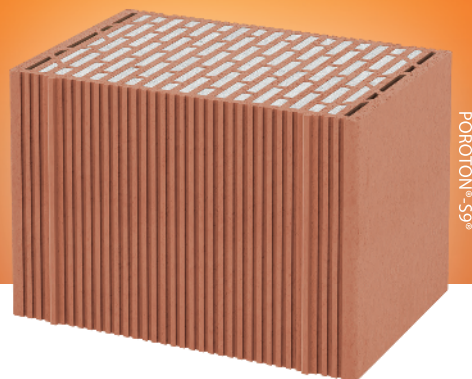
+49 (0)30 470 31-236
marketing@ernst-und-sohn.de
www.ernst-und-sohn.de/3347

* Der €-Preis gilt ausschließlich für Deutschland inkl. MwSt.

Ernst & Sohn
A Wiley Brand

**SCHLAGMANN
POROTON®**

HART IM NEHMEN



Der Trend im mehrgeschossigen Wohnungsbau geht zum Ziegel. Aus gutem Grund: der ist wohngesund.

Und der POROTON®-S9® hält richtig was aus: Druckfestigkeit f_k 5,3 MN/m².

Das macht ihn zum stabilsten perlitgefüllten Objektziegel. Für Wohnanlagen mit einschaliger Außenwand bis zu 9 Etagen. Mit sicherem Brandschutz, hervorragender Wärmedämmung und gutem Schallschutz, in einem natürlichen Baustoff vereint.

Mehr Informationen unter: www.schlagmann.de

Einsatzbereich	optimal für den Objektbau	
Wärmeleitzahl	0,09 W/(mK)	0,09 W/(mK)
Wanddicke	36,5 cm	42,5 cm
U-Wert (mit Leichtputz)	0,23 W/(m ² K)	0,20 W/(m ² K)
Druckfestigkeit f_k	5,3 MN/m ²	5,3 MN/m ²
Schallschutz $R_{w, Bau, ref.}$	52,2 dB	50,1 dB
Brandschutzklasse	F90-AB	F90-AB

POROTON®-S9®
Der Objektziegel.

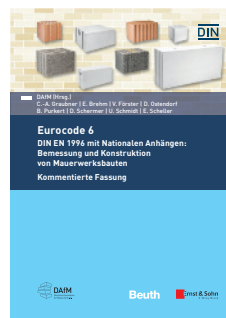
Deutscher Ausschuss für Mauerwerk (Hrsg.)

Eurocode 6 – DIN EN 1996 mit Nationalen Anhängen: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten

Kommentierte Fassung

- **Normungsauslegung durch Normenmacher**
- **topaktuell, aus erster Hand – übersichtlich und verständlich**

Der Normentext von Eurocode 6 und die Nationalen Anhänge wurden unter Einbeziehung der A3-Änderung von 2019 zu einem durchgängig lesbaren, von überflüssigen Teilen befreiten Text zusammengefasst. Erläuterungen helfen Tragwerksplanern und Bauausführenden in der Praxis.



2020 • 250 Seiten • 8 Abbildungen •
64 Tabellen

Softcover

ISBN 978-3-433-03227-5 € 116*

eBundle (Print + PDF)

ISBN 978-3-433-03228-2 € 150,80*

DAfM-Mitgliederkonditionen:
www.ernst-und-sohn.de/dafm

BESTELLEN

+49 (0)30 470 31-236

marketing@ernst-und-sohn.de

www.ernst-und-sohn.de/3227

einmaliger Belastung definiert. Der Druck-E-Modul von Mauersteinen wird im Druckversuch in Steinhöhe ermittelt.

Der Elastizitätsmodul von Mauersteinen beeinflusst die Steifigkeit von Mauerwerk maßgeblich. Für eine erste Abschätzung des Druck-E-Moduls von Kalksand- und Porenbetonsteinen können nach [1] folgende Beziehungen gewählt werden, wobei der Wert in Klammern das Bestimmtheitsmaß der gewählten Regression angibt:

- a) Kalksandsteine (Prismen; 12 Einzelwerte):

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

- b) Porenbetonsteine (Zylinder; 18 Mittelwerte):

$$E_D = 700 \cdot \beta_{D,st}^{0,74} \quad (0,83)$$

2.2.2 Querdehnungsmodul, Querdehnzahl

Zur Bestimmung des Querdehnungsmoduls von Mauersteinen unter einer Druckbeanspruchung in Richtung Steinhöhe wird die Spannung auf die zugehörige, quer zur Belastungsrichtung, d. h. in Richtung Steinhöhe bzw. -breite, gemessene Dehnung bezogen.

Diese Kenngröße ist von maßgebender Bedeutung für die Drucktragfähigkeit von Mauerwerk. Bei einem ungünstigen Verhältnis der Querdehnungsmoduln von Mauermörtel und Mauerstein wird Letzterer stärker auf Zug beansprucht, was die Druckfestigkeit des Mauerwerks reduziert. Werte für den Querdehnungsmodul von Mauersteinen sind in Tabelle 2 angegeben, vgl. [1].

Neben dem E-Modul spielt auch die Querdehnzahl μ der Mauersteine in Bezug auf die Mauerwerkdruckfestigkeit eine wesentliche Rolle. Die Querdehnzahl ergibt sich im Druckspannungszustand als Absolutwert aus dem Verhältnis von Querdehnung zu Längsdehnung bei einem Drittel der Höchstspannung. Wertebereiche für die Querdehnzahl verschiedener Mauersteine sind ebenfalls in Tabelle 2 aufgeführt, vgl. auch [3].

Tabelle 2. Mauersteine; Querdehnungsmodul E_q in 10^3 N/mm^2 , Querdehnzahl μ (aus [1] und [3])

Mauerstein	Festigkeitsklasse	E_q	μ
		Wertebereich	
Hbl, Vbl	2 ... 6	3,6 ... 20 (8)	0,08 ... 0,11
PB, PP	2 ... 6	5,6 ... 25 (7)	0,11 ... 0,15
KS, KS L, KSHbl	8 ... 28	12 ... 100 (12)	0,12
HLz	6	2,7 ... 40 (4)	0,11 ... 0,20
	8	12 ... 59 (8)	
	12	31 ... 55 (4)	
	48	133 (–)	

Werte in Klammern: Anzahl der Versuchswerte

2.2.3 Zug-Elastizitätsmodul

Der Zug-E-Modul von Mauersteinen ist analog zum Druck-E-Modul definiert und wird in einaxialen Zugversuchen bestimmt. Zwischen dem Zug-E-Modul und der Steinzugfestigkeit bei einer Zugbeanspruchung in Steinlänge wurden nach [1] folgende Zusammenhänge ermittelt, wobei die Werte in Klammern das Bestimmtheitsmaß der gewählten Regression angeben:

- a) Kalksandsteine (Prismen; 13 Mittelwerte)

$$E_Z = 5800 \cdot \beta_{z,l}^{0,73} \quad (0,95)$$

- b) Leichtbetonsteine (Prismen; 35 Einzelwerte)

$$E_Z = 6000 \cdot \beta_{z,l} \quad (0,77)$$

- c) Porenbetonsteine

$$E_Z = 3180 \cdot \beta_{z,l} \quad (0,78)$$

(Zylinder, Prismen; 21 Mittelwerte)

$$E_Z = 1,01 \cdot E_D \quad (0,93)$$

(Zylinder; 11 Mittelwerte)

2.3 Kapillare Wasseraufnahme

Die Wasseraufsaugfähigkeit von Mauersteinen kann durch die kapillare Wasseraufnahme bzw. den Wasseraufnahmekoeffizienten ω gekennzeichnet werden. Diese sind wichtige Kenngrößen für die Beurteilung des Wasserabsaugens aus dem Fugenmörtel durch den Mauerstein, für die Wasseraufnahme von Sichtflächen bei Beregnung, vor allem bei Schlagregen, sowie für die Beurteilung des Austrocknungsverhaltens.

Werden Mauersteine mit schneller Wasseraufsaugcharakteristik – gekennzeichnet durch hohe Wasseraufnahmekoeffizienten ω – vor dem Vermörteln nicht vorgehäst, so kann dem Mörtel nach dem Vermauern zu viel Wasser entzogen werden. Mögliche Folgen sind eine zu geringe Verbundfestigkeit zwischen Mauermörtel und Mauerstein (Haftscher- und Haftzugfestigkeit) und/oder 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.

Die kapillare Wasseraufnahme wird i. d. R. nach DIN EN ISO 15148 [18] geprüft. Ausgehend vom getrockneten Zustand wird bei ständigem Wasserkontakt der Saugfläche der zeitliche Verlauf der Wasseraufnahme ermittelt. Dieser ist bei reinen kapillaren Saugvorgängen im Wurzelmaßstab annähernd linear. Der Anstieg wird durch den Wasseraufnahmekoeffizienten ω in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ gekennzeichnet.

Tabelle 3 enthält ω -Werte von Mauersteinen nach [4]. In Bild 1 wird der an verschiedenen Mauersteinen bestimmte zeitliche Verlauf der kapillaren Wasseraufnahme dargestellt. Es wird ersichtlich, dass Mauerziegel in kürzester Zeit Wasser aufnehmen, während Kalksandsteine über einen langen Zeitraum kontinuierlich saugen.

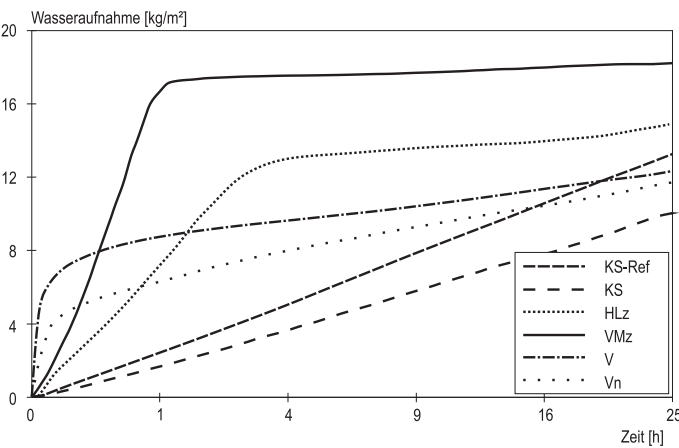


Bild 1. Zeitlicher Verlauf der Wasseraufnahme unterschiedlicher Mauersteine nach [4]

Tabelle 3. Mauersteine; Wasseraufnahmekoeffizient ω (aus [4])

Mauerstein	Mittlerer Wert	Wertebereich	n
	kg/(m ² · h ^{0,5})		
Kalksand-Referenzsteine (KS-Ref)	2,7	2,4 ... 2,9	3
Kalksandsteine (KS)	2,0	1,7 ... 2,1	3
Hochlochziegel (HLz)	7,4	7,2 ... 7,5	3
Mauerziegel (VMz)	18,9	18,6; 19,1	2
Leichtbetonsteine (V)	1,0	1,0; 1,0	2
Betonsteine (Vn)	1,5	1,2; 1,9	2

n: Anzahl der Einzelwerte

3 Eigenschaftswerte von Mauermörteln

3.1 Festigkeitseigenschaften

3.1.1 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit von Mauermörtel wird an Normprismen nach DIN EN 1015-11 [19] bestimmt.

3.1.2 Zugfestigkeit

Die Prüfung der Zugfestigkeit von Mauermörtel ist nicht normativ geregelt. Für Normalmauermörtel ergab sich nach [1] aus 33 Einzelwerten die folgende Beziehung zwischen Zug- und Druckfestigkeit (Wert in Klammern: Bestimmtheitsmaß):

$$\beta_Z = 0,11 \cdot \beta_D \quad (0,91)$$

3.2 Verformungseigenschaften

3.2.1 Längsdehnungsmodul

Der Längsdehnungsmodul von Mauermörtel wird im statischen Druckversuch an Mörtelgroßprismen nach

DIN 18555-4 [20] ermittelt. In [1] sind folgende Beziehungen zwischen dem Längsdehnungsmodul E und der Normdruckfestigkeit β_D angegeben:

a) Normalmauermörtel

$$E = 2100 \cdot \beta_D^{0,7}$$

b) Leichtmauermörtel mit Gesteinskörnungen aus Blähton

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

c) Leichtmauermörtel mit Gesteinskörnungen aus Perliten

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

3.2.2 Querdehnungsmodul

Der Querdehnungsmodul von Mauermörtel wird im Allgemeinen gemeinsam mit dem Längsdehnungsmodul bestimmt, s. Abschnitt 3.2.1. Dabei wird die Druckspannung auf die zugehörige gemessene Querdehnung bezogen.

Ist der Querdehnungsmodul des Mauermörtels deutlich kleiner als der des Mauersteins, so entstehen durch die größere Querverformbarkeit des Lagerfugenmörtels zusätzliche Querkzugspannungen im Stein, wodurch die Mauerwerkdruckfestigkeit verringert werden kann. Dies ist besonders bei leichten Leichtmauermörteln mit sehr verformbaren Gesteinskörnungen, z. B. mineralische Perlite, der Fall.

Werte für E_q sind in Tabelle 4 angegeben, vgl. [1].

4 Eigenschaftswerte von Mauermörtel im Mauerwerk

Die Eigenschaften von Mauermörtel werden durch den Kontakt mit den Mauersteinen in mehr oder weniger starkem Umfang beeinflusst. Abhängig von der Mauersteinart und dem Feuchtegehalt des Mauersteins beim Vermauern wird dem Mauermörtel mehr

Tabelle 4. Mauermörtel; Trockenrohdichte ρ_d , Druckfestigkeit β_D und Querdehnungsmodul E_q (aus [1])

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

n: Anzahl der Versuchswerte

oder weniger Wasser über einen kurzen oder langen Zeitraum entzogen, vgl. Abschnitt 2.3. Dieser Effekt kann sich festigkeitsmindernd oder -steigernd auswirken. Festigkeitssteigerungen ergeben sich nach [5] dann, wenn abgesaugtes Wasser zu einer wirkungsvollen Senkung des w/z-Wertes und damit zu einer Verdichtung des Gefüges führt. Dagegen ergeben sich Festigkeitsminderungen, wenn in der Fuge infolge eines zu hohen Wasserentzugs die für eine vollständige Hydratation erforderliche Wassermenge nicht mehr zur Verfügung steht.

Diese Veränderung der Eigenschaften des Mörtels in Kontakt zum Mauerstein beeinflusst die Festigkeitseigenschaften von Mauerwerk. Insofern können Eigenschaftswerte, die an beeinflusstem Mörtel ermittelt werden, für weiterführende Analysen und Abschätzungen verwendet werden. Die Fugendruckfestigkeit könnte beispielsweise bei neuen Ansätzen für die rechnerische Bestimmung der Mauerwerkdruckfestigkeit berücksichtigt werden.

Die Bestimmung der Fugendruckfestigkeit erfolgt nach DIN 18555-9 [21].

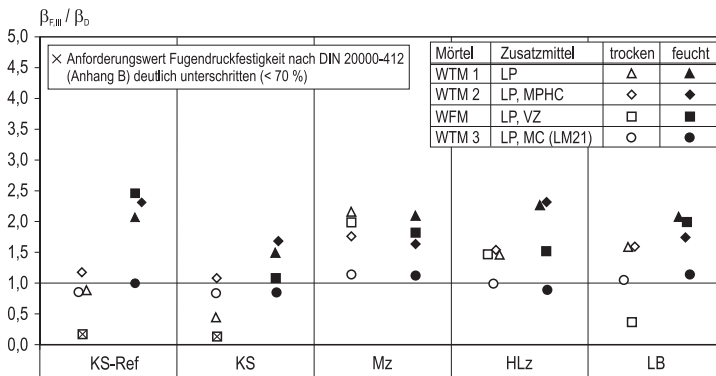
In Bild 2 ist die auf die Prismen-Druckfestigkeit β_D bezogene Fugendruckfestigkeit $\beta_{F,III}$ verschiedener Mauerstein-Mauermörtel-Kombinationen dargestellt (Werte aus [6]). Die Mauersteine wurden in unterschiedlichen Feuchtezuständen vermauert: trocken, d. h. mit Ausgleichsfeuchte bei Lagerung in 20/65, sowie feucht, d. h. mit einem Feuchtegehalt von rd. 10 M.-%. Als Mauermörtel wurden Werk trocken (WTM) und Werkfrischmörtel (WFM) mit folgenden Zusatzmitteln verwendet: Luftporenbildner (LP), Verzögerer (VZ), Methylcellulose (MC) und Methylhydroxypropylcellulose (MPHC).

Vor allem bei trocken vermaurten Kalksandsteinen können sich je nach Feuchtezustand bezogene Druckfestigkeiten in der Fuge $\leq 1,0$ ergeben. Hingegen kann die Saugcharakteristik bei Mauerziegeln (schnelle Wasseraufnahme in kurzem Zeitraum) zu einer Festigkeitssteigerung führen, unabhängig vom Feuchtezustand der Mauersteine, vgl. [6]. Bei Verwendung von Werkfrischmörtel mit einem geringen Wasserrückhaltevermögen können sich Festigkeitseinbußen in Kombination mit KS-Ref, KS und LB (jeweils trocken vermauert) ergeben. Die Rechenfestigkeit kann folglich auf der unsicheren Seite liegen. Um bei der Entwicklung neuer Mörtelrezepturen kritische Fälle identifizieren zu können, müssen diese Mauermörtel die Mindestanforderungswerte an die Fugendruckfestigkeit nach DIN 20000-412 [22] erfüllen.

5 Verbundeigenschaftswerte zwischen Mauerstein und Mauermörtel

5.1 Allgemeines

In Mauerwerkbauteilen, die durch horizontale Lasten auf Schub oder Biegezug oder auch infolge Zwangsspannungen auf Zug beansprucht werden, müssen Zug- und Schub- bzw. Scherkräfte in den Verbundfugen zwischen den einzelnen Mauersteinen übertragen werden. Der Verbund zwischen Mauerstein und Mauermörtel beeinflusst daher maßgeblich die Tragfähigkeit und Rissicherheit von Mauerwerk.

**Bild 2.** Fugendruckfestigkeit $\beta_{F,III}$ bezogen auf die Prismen-Druckfestigkeit β_D ; Prüfalter: 28 Tage (Werte aus [6])

Die Verbundfestigkeit dient zur quantitativen Erfassung der Haftung zwischen Mauerstein und Mauermörtel. Diese wird differenziert nach Haftscherfestigkeit und Haftzugfestigkeit. Während die Haftzugfestigkeit bei der Bemessung von Biegezug-/Schubbeanspruchten Mauerwerkbauteilen nach DIN EN 1996-1-1/NA [17] nicht in Rechnung gestellt wird, ist die Haftscherfestigkeit eine bemessungsrelevante Baustoffkenngröße.

5.2 Haftscherfestigkeit

Durch die Haftscherfestigkeit werden die Scherkräfte erfasst, die entlang der Grenzfläche Mauerstein/Mauermörtel aufgenommen werden können. Bei gleichzeitiger Wirkung einer Auflast/Normalkraft zur Grenzfläche erhöht sich die Scherfestigkeit um den auflastabhängigen Reibungsanteil.

Die Haftscherfestigkeit kann entweder nach DIN 18555-5 [23] oder DIN EN 1052-3 [24] geprüft werden. Vergleichsuntersuchungen zwischen diesen beiden Prüfverfahren haben gezeigt, dass die Prüfwerte der Haftscherfestigkeit nach dem EN-Verfahren etwa halb so groß wie die nach dem DIN-Verfahren sind, vgl. [7]. Der Prüffaktor resultiert aus einer unterschiedlichen Normal- und Schubspannungsverteilung in den Fugen, wie nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen gezeigt haben, s. [7]. Bedingt durch die Prüfkörpergeometrie kann beim EN-Versuch im Bruchzustand eine ungleichmäßige Spannungsverteilung resultieren, während die Spannungsverteilung beim DIN-Versuch dagegen deutlich gleichmäßiger ist.

In den Bildern 3 und 4 sind Haftscherfestigkeitswerte nach dem DIN-Verfahren und dem EN-Verfahren nach [7] dargestellt. Die große Bandbreite der Werte resultiert nach [7] aus z. T. sehr unterschiedlichen Prüfrandbedingungen (Prüfalter, Lagerungs-

klima etc.). Vor allem der Feuchtegehalt der Mauersteine beim Vermauern kann aufgrund des dadurch beeinflussten Wasserabsaugens durch die Mauersteine und die dadurch veränderten Eigenschaften des Mauermörtels zu sehr unterschiedlichen Haftscherfestigkeitswerten führen, vgl. Abschnitt 4.

Auf Basis dieser Werte wurden die in Tabelle 5 angegebenen, nach Stein und Mörtel differenzierten Anhaltswerte abgeleitet, s. [7]. Bei der Ableitung dieser Werte wurden lediglich diejenigen Mauerstein-Mauermörtel-Kombinationen berücksichtigt, für die mindestens 10 Serien vorlagen. Diese Anhaltswerte beziehen sich auf die Prüfung nach dem DIN-Verfahren. Dabei wurden die Versuchsergebnisse, die nach dem EN-Verfahren ermittelt wurden, mit dem Faktor 2 multipliziert, um jeweils auf den Wert nach dem DIN-Verfahren schließen zu können.

Die nach DIN EN 1996-1-1/NA [17] anzusetzenden Haftscherfestigkeitswerte sind derzeit in Abhängigkeit der Mauermörtelart, jedoch nicht differenziert nach der Mauersteinart, angegeben, s. ebenfalls Tabelle 5. Die Werte basieren auf der Haftscherfestigkeitsprüfung nach dem DIN-Verfahren mit dem als ungünstig angesehenen Kalksand-Referenzstein. Nähere Erläuterungen zu diesen Werten können [8] entnommen werden.

Ein Vergleich der anzusetzenden Haftscherfestigkeitswerte mit den nach der Mauersteinart differenzierten Anhaltswerten zeigt, dass teilweise deutlich höhere Haftscherfestigkeitswerte angesetzt werden könnten.

Bei der Biegezugbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen wird zur Berechnung der Biegezugfestigkeit bei Fugenversagen ersatzweise die Haftscherfestigkeit angesetzt (s. Abschnitt 6.2.4). Zutreffender wäre stattdessen, die Torsionsscherfestigkeit zugrunde zu legen. In [7] und [9] wird darauf speziell eingegangen.

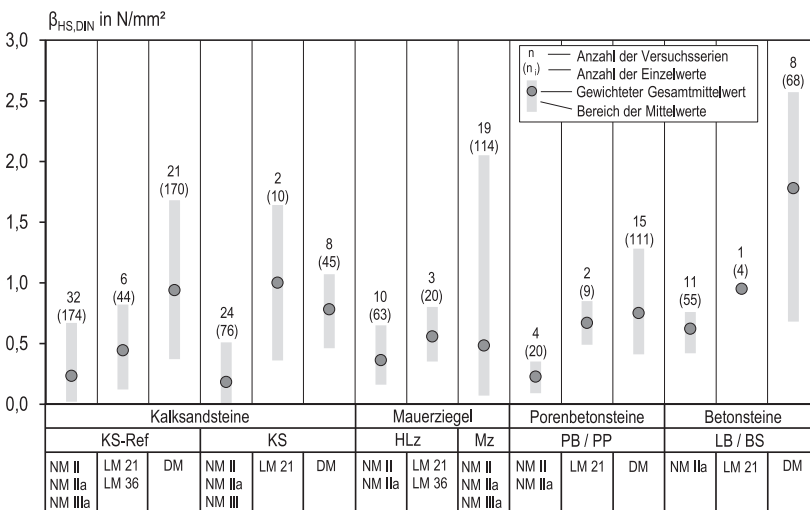


Bild 3. Bandbreite der Haftscherfestigkeitswerte nach dem DIN-Verfahren (Werte aus [7])

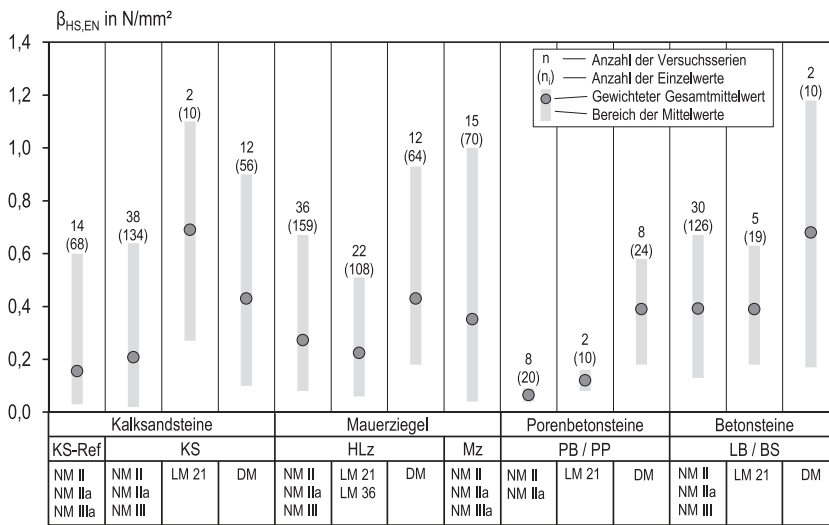


Bild 4. Bandbreite der Haftscherfestigkeitswerte nach dem EN-Verfahren (Werte aus [7])

Tabelle 5. Stein/Mörtel; Anhaltswerte für die Haftscherfestigkeit β_{HS} nach [7] und anzusetzende Haftscherfestigkeitswerte f_{vk0} (charakteristische Werte) nach DIN EN 1996-1-1/NA [17] in N/mm²

Mauerstein	Haftscherfestigkeit β_{HS} nach [7]				Charakteristische Werte f_{vk0} nach [17]			
	Mauermörtel				Mauermörtel			
	NM IIa	NM III	LM 36	DM	NM IIa	NM III	LM 36	DM
KS-Ref	0,20	—	—	—	0,18	0,22	0,18	0,22
KS (ohne KS-Ref)	0,25	0,30	—	0,85	—			
HLz	0,45	—	0,50	—				
Mz	0,35		—	—				
PP	—		—	0,75				
Vbl, Hbl, Hbn	0,55		—	1,70				

5.3 Haftzug- und Biegehaftzugfestigkeit

Die Kenngröße Haftzugfestigkeit impliziert die Annahme einer zentrischen Zugbeanspruchung, die senkrecht zur Grenzfläche zwischen Mauerstein und Mauermörtel angreift. Das Vorhandensein eines Biegemoments, das nur in einem Teilbereich (Zugzone) eine Zugspannung hervorruft, erfordert die Definition einer weiteren Kenngröße, genannt Biegehaftzugfestigkeit. Diese Kennwerte sind u. a. für die Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen von Relevanz.

Eine Norm bzw. Richtlinie für die Prüfung der zentrischen Haftzugfestigkeit existiert nicht. Die Prüfung der Biegehaftzugfestigkeit mit dem Bondwrench-Verfahren ist in DIN EN 1052-5 [25] geregelt. In Tabelle 6 sind Versuchsdaten aus [1] zusammengefasst.

6 Eigenschaftswerte von Mauerwerk

6.1 Allgemeines

Die Eigenschaftswerte von Mauerwerk können aufgrund seiner ausgeprägten Anisotropie und Heterogenität in Abhängigkeit der zahlreichen in der Praxis vorkommenden Mauerstein-Mauermörtel-Kombinationen sehr unterschiedlich sein und weichen zudem teilweise deutlich von denen anderer Baustoffe ab. Mauerwerk ist 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. Die nachfolgenden Abschnitte enthalten eine Übersicht über die für die unterschiedlichen Beanspruchungen maßgebenden Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Mauerwerk.

Tabelle 6. Stein/Mörtel; Haftzugfestigkeit β_{HZ} ; Prüfalter im Allgemeinen mind. 14 Tage (aus [1])

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

- 1) l, f: lufttrocken, feucht
 2) Z: zentrisch; BW: Bondwrench
 3) Keine Angabe von Einzelwerten
 4) Prüfalter unter 14 Tage

n: Anzahl der Versuchsserien
 (n_i): Anzahl der Einzelwerte
 $\bar{x}$, min x, max x: Mittelwert, Kleinstwert, Größtwert

6.2 Festigkeitseigenschaften

6.2.1 Druckfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen

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

Die Prüfung der Mauerwerkdruckfestigkeit ist in DIN EN 1052-1 [26] geregelt.

Zur Ermittlung eines charakteristischen Wertes f_k der Mauerwerkdruckfestigkeit, bezogen auf eine Schlankheit $\lambda = 5$, kann folgende Gleichung nach DIN EN 1996-1-1/NA [17] angewendet werden:

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

mit

- f_k charakteristische Druckfestigkeit von Mauerwerk in N/mm²
 K, α , β Faktor und Exponenten, ermittelt über Regressionen ($\beta = 0$ für LM und DM)
 f_{st} umgerechnete mittlere Mindeststeindruckfestigkeit in N/mm²
 f_m die der Mörtelklasse zugeordnete Festigkeit des Mauermörtels in N/mm²

Werte für die Parameter K, α und β sind DIN EN 1996-1-1/NA [17] zu entnehmen. Diese wurden für die gebräuchlichsten Mauerstein-Mauermörtel-Kombinationen aus zahlreichen Versuchsergebnissen von Mauerwerkdruckversuchen abgeleitet. Die umgerechnete mittlere Mindeststeindruckfestigkeit f_{st} ergibt sich aus der Druckfestigkeitsklasse multipliziert mit dem Fak-

tor 1,25. Bei der Mauermörtelfestigkeit f_m sind DIN EN 1996-1-1/NA [17] und DIN 20000-412 [22] zu beachten.

Die Druckfestigkeit von Mauerwerk hängt nicht nur von den Festigkeitseigenschaften seiner Ausgangsstoffe ab, sondern von einer Vielzahl weiterer Parameter. Diese sind u. a. die horizontalen Verformungsunterschiede von Mauerstein und Mauermörtel unter vertikaler Druckbeanspruchung sowie die hygrische Wechselwirkung zwischen dem Wasserabsaugverhalten des Mauersteins und dem Wasserrückhaltevermögen des Mörtels. Es gibt Bestrebungen, ein Ingenieurmodell zur rechnerischen Bestimmung der Mauerwerkdruckfestigkeit unter Berücksichtigung dieser Parameter zu entwickeln.

Bild 5 zeigt beispielhaft anhand der Auswertung von Druckversuchen an Mauerwerk aus Kalksand-Vollsteinen und Kalksand-Blocksteinen in Kombination mit Normalmauermörtel der Mörtelklasse M5, wie unterschiedlich hoch die Druckfestigkeit von Mauerwerk im Versuch bei annähernd gleichen Steindruckfestigkeitswerten ausfallen kann. Dargestellt sind zum einen die auf eine Schlankheit der Mauerwerkswände $\lambda = 5$ umgerechneten Versuchswerte der Mauerwerkdruckfestigkeit $\beta_{\text{D,mw}}$ in Abhängigkeit der geprüften Steindruckfestigkeit $\beta_{\text{D,st}}$ einschließlich Formfaktor. Zusätzlich enthält das Diagramm die gemäß DIN EN 1996-1-1/NA [17] ansetzbaren f_k -Werte in Abhängigkeit der aus der jeweiligen Steinfestigkeitsklasse umgerechneten mittleren Mindeststeindruckfestigkeit f_{st} . Diese Gegenüberstellung von reinen Versuchs-

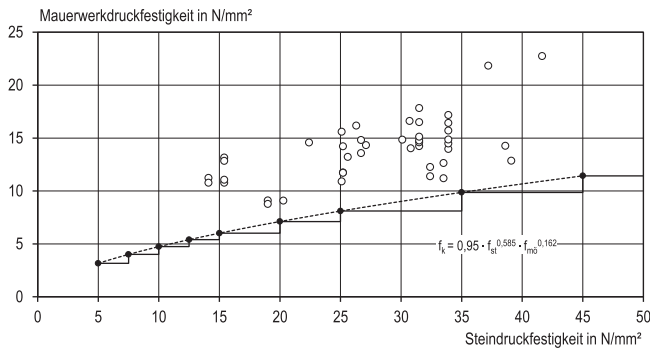


Bild 5. Druckfestigkeit von Mauerwerk aus Kalksand-Vollsteinen und Kalksand-Blocksteinen mit Normalmauermörtel der Mörtelklasse M5 in Abhängigkeit von der Steindruckfestigkeit

daten und normativ geregelten, charakteristischen Festigkeitswerten verdeutlicht, dass es sich bei der Ableitung der Mauerwerkdruckfestigkeit aus den einaxialen Druckfestigkeitswerten der Einzelkomponenten Mauerstein und Mauermörtel in den meisten Fällen nur um eine sehr grobe Näherungslösung handeln kann. Die Mauerwerkdruckfestigkeit einiger Mauerstein-Mauermörtel-Kombinationen kann deutlich über den gemäß der europäischen Norm ansetzbaren Druckfestigkeitswerten liegen.

6.2.2 Druckfestigkeit parallel zu den Lagerfugen

Für die Bemessung der Druckzone biegebeanspruchter Bauteile wird die Längsdruckfestigkeit des Mauerwerks benötigt.

Diese kann in Anlehnung an DIN EN 1052-1 [26] geprüft werden. Gegenüber der Druckbeanspruchung senkrecht zu den Lagerfugen wurde die Druckbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen jedoch bislang wenig experimentell untersucht.

Die rechnerische Bestimmung der Mauerwerkdruckfestigkeit parallel zu den Lagerfugen erfolgt nach DIN EN 1996-1-1/NA [17] mit denselben Gleichung und denselben Gleichungsparametern, die für die Bestimmung der Druckfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen ermittelt wurden. Statt der Steindruckfestigkeit in Richtung Steinhöhe wird diejenige in Richtung Steinlänge angesetzt. Zudem wird der jeweilige K-Faktor mit 0,5 abgemindert. Diese Vorgehensweise berücksichtigt nicht das reale Tragverhalten von Mauerwerk unter einer Druckbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen. Bei Mauerwerk mit unvermörtelten Stoßfugen müssen die im Stoßfugenbereich wirkenden Druckkräfte durch die Lagerfugen übertragen werden. Die maximal erreichbare Längsdruckfestigkeit von Mauerwerk wird deshalb maßgeblich durch die Haftscherfestigkeit zwischen Mauerstein und Mauermörtel begrenzt. Bei Mauerwerk mit vermörtelten Stoßfugen spielt neben der Längsdruckfestigkeit der Mauersteine auch die Druckfestigkeit des Mauermörtels in der Stoßfuge eine wesentliche Rolle.

Um zutreffende Mindestdruckfestigkeitswerte von Mauerwerk parallel zu den Lagerfugen zu definie-

ren und eine vereinfachte und auf der sicheren Seite liegende Bemessung zu ermöglichen, werden in [10] Grenzfälle – in Abhängigkeit der Versagens- und Stoßfugenausbildungsart des Mauerwerks – betrachtet und fallweise Berechnungsgleichungen definiert.

6.2.3 Zugfestigkeit

Die zentrische einachsige Zugfestigkeit ist eine wesentliche Kenngröße zur Beurteilung der Rissicherheit bei Bauteilen ohne wesentliche Auflast – wie Verblendschalen, Ausfachungsmauerwerk, nichttragende innere Trennwände – aber auch von Außen- und Innenwänden, die beispielsweise unterschiedlichen Formänderungen unterliegen. Dabei sind zwei Belastungsrichtungen (parallel und senkrecht zu den Lagerfugen) sowie zwei Versagensarten (Stein- und Fugenversagen) zu betrachten.

Die Mauerwerkzugfestigkeit kann sowohl experimentell als auch rechnerisch ermittelt werden. Die Prüfung der Zugfestigkeit von Mauerwerk ist nicht normativ geregelt.

In Tabelle 7 sind Werte für die Zugfestigkeit parallel zur Lagerfuge aus [1] bzw. [11] angegeben. Untersuchungen zur Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen wurden bislang nur sehr wenige durchgeführt, sodass keine abgesicherten Werte genannt werden können.

Bei der Herleitung von Berechnungsansätzen zur Bestimmung der Zugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen (s. Gl. 2, 3a, 3b) wurde in [12] 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

Tabelle 7. Mauerwerk; Zugfestigkeit f_t in N/mm^2 – Zugbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen (aus [1] bzw. [11])

Mauerstein			Mauermörtel		SF	f_t
Art, Sorte	Format	Festigkeitsklasse	Art	Gruppe		
Mz	NF	28	NM	IIa	vm	0,45 (1)
KMz	NF	60	NM	IIIa	vm	0,51 (4)
HLz	2DF	12	NM	II ... III	vm	0,12 ... 0,21 (8)
HLz	2DF	60	NM	III	vm	0,82 (3)
KS	2DF, 5DF	12, 20	NM	IIa	um	0,24 (1), 0,14 (1)
KS	2DF	12 ... 36	NM	II ... III	vm	0,10 ... 0,41 (22)
KS L	2DF	12	NM	II, III	vm	0,07 ... 0,09 (6)
KS	2DF	20	DM		vm	0,65 (2)
PB	2DF	2	NM	II	vm	0,09 (3)
PB	2DF	6	NM	III	vm	0,11 (2)
PP	2DF, 16DF	2	DM		um	0,04 ... 0,14 (4)
PP	2DF	2	DM		vm	0,16 (1)
Vbl	10DF	2	LM21	IIa	um	0,03 (1)
V, Vbl	2DF, 8DF	2	NM	II, IIa	vm	0,16 ... 0,26 (6)
V	2DF	12	NM	III	vm	0,58 (3)
V	2DF	2	DM		um	0,21 (1)
V	2DF	2	DM		vm	0,25 (1)
Hbl	10DF	2	LM36	IIa	vm	0,17 (1)
Hbl	10DF	2	NM	IIa	vm	0,13 (1)

NM: Normalmauermörtel; DM: Dünnbettmörtel; LM: Leichtmauermörtel; SF: Stoßfugen
 vm: vermörtelt; um: unvermörtelt; (): Anzahl der Einzelwerte

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.

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

mit

f_t Mauerwerkzugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen

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

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_{ol}) 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.

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

bzw.

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

mit

f_t Mauerwerkzugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen

f_{v0} Haftscherfestigkeit

μ Reibungsbeiwert

σ_d Druckspannung senkrecht zur Lagerfuge

l_{ol} Überbindelänge

h_u Steinhöhe

Bei einer Beanspruchung senkrecht zu den Lagerfugen kann die Mauerwerkzugfestigkeit näherungsweise gleich der Steinzugfestigkeit in Richtung Steinhöhe für den Fall Steinversagen oder gleich der Haftzugfestigkeit zwischen Mauerstein und Lagerfugenmörtel für den Fall Fugenversagen angesetzt werden.

6.2.4 Biegezugfestigkeit

Die Biegezugfestigkeit von Mauerwerk ist von großer Bedeutung bei Ausfachungsflächen und Verblendschalen von zweischaligem Mauerwerk bei Einwirkung von Windlasten (Sog und Druck), aber auch bei mit Erd- druck belasteten Kellerwänden. Bei dem anisotropen Baustoff Mauerwerk wird unterschieden zwischen den

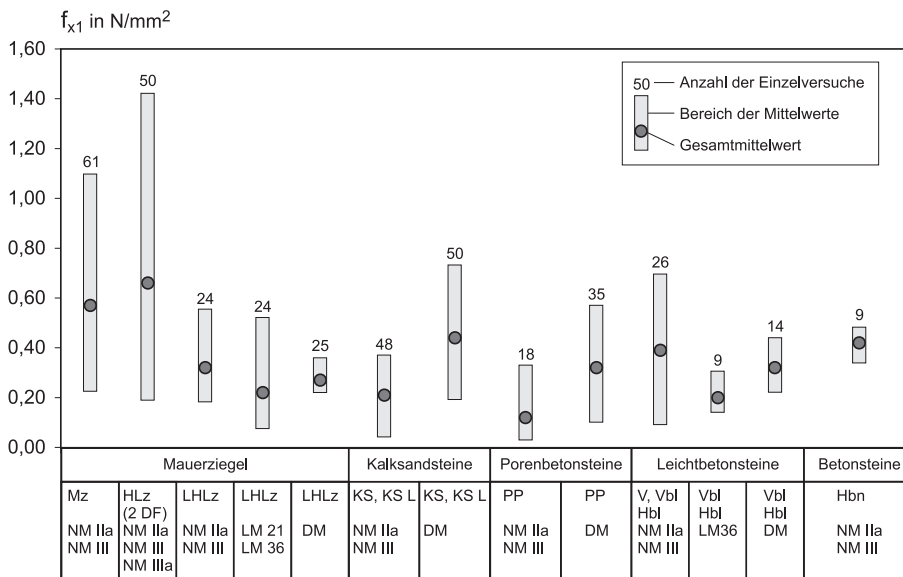


Bild 6. Bandbreite der Biegezugfestigkeitswerte senkrecht zur Lagerfuge (aus [13])

Beanspruchungen senkrecht zur Lagerfuge und parallel zur Lagerfuge. In einigen Fällen, z. B. bei Ausfachungsflächen oder bei Verblendschalen, treten meist zweiaxiale Beanspruchungen auf, d. h. eine Kombination der Beanspruchungen senkrecht und parallel.

Die Überschreitung der Biegezugfestigkeit einer Mauerwerkwand führt bei einer Biegebeanspruchung parallel zu den Lagerfugen zur Bildung einer Bruchebene senkrecht zu den Lagerfugen, während aus einer Biegebeanspruchung senkrecht zu den Lagerfugen eine Bruchebene parallel zu den Lagerfugen resultiert. In beiden Fällen können, wie bei der Zugfestigkeit, die Versagensfälle Stein und Fuge unterschieden werden. Die Bestimmung der Biegezugfestigkeit von Mauerwerk kann getrennt nach der Beanspruchungsrichtung sowohl rechnerisch als auch experimentell erfolgen. Experimentell wird die Biegezugfestigkeit im Vierpunkt-Biegeversuch nach DIN EN 1052-2 [27] ermittelt.

In Bild 6 sind Ergebnisse zu Untersuchungen der Biegezugfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge dargestellt, die in [13] ausgewertet wurden. Neuere Erkenntnisse sind in [9] enthalten. Die Bandbreite der Werte in Bild 6 ist je nach Materialkombination verhältnismäßig groß.

Die Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen f_{xk1} (mit einer Bruchebene parallel zu den Lagerfugen) darf in tragenden Wänden nach DIN EN 1996-1-1/NA [17] nicht in Rechnung gestellt werden. Lediglich bei Wänden aus Planelementen, die kurzzeitig rechtwinklig zur Wandebene beansprucht werden, darf normgemäß ein Wert $f_{xk1} = 0,2 \text{ N/mm}^2$ zugrunde gelegt werden. In Abhängigkeit der gewählten Materialkombination wäre der Ansatz eines höheren Wertes gerechtfertigt, vgl. Bild 6.

Die charakteristische Biegezugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen f_{xk2} (mit einer Bruchebene senkrecht zu den Lagerfugen) wird nach DIN EN 1996-1-1/NA [17] als Kleinstwert aus den Kriterien Fugen- und Steinversagen bestimmt. Die dort angegebenen Berechnungsgleichungen basieren auf den Berechnungsansätzen zur Bestimmung der Zugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen gemäß Abschnitt 6.2.3.

Eine genauere Analyse geometrischer Einflussgrößen hat gezeigt, dass neben den mechanischen Eigenschaften und dem Überbindemaß auch die Wanddicke einen maßgeblichen Einfluss auf die Biegezugfestigkeit des Mauerwerks parallel zu den Lagerfugen ausübt, s. [9]. Durch den Ansatz baustoffspezifischer Werte für die Anfangsscherfestigkeit und die Steinlängszugfestigkeit der gewählten Mauerstein-Mauermörtel-Kombination besteht die Möglichkeit, über die nach DIN EN 1996-1-1/NA [17] anzusetzenden Werte hinaus höhere Biegezugfestigkeiten zu erzielen, vgl. Abschnitte 2.1.3 und 5.2.

6.2.5 Schubfestigkeit

Durch horizontale Lasten wie Erddruck, Wind oder auch Erdbeben können Mauerwerkwände sowohl in Wandebene auf Scheibenschub als auch senkrecht zur Wandebene auf Plattenschub beansprucht werden. Die Scheibenschubbeanspruchung ist insbesondere bei aussteifenden Wänden von Bedeutung.

Für die Bestimmung der Schubfestigkeit von Mauerwerk existiert kein genormtes Prüfverfahren. Neben der experimentellen Bestimmung besteht die Möglichkeit, die Schubfestigkeit von Mauerwerk rechnerisch zu ermitteln.

Der Nachweis des Tragwiderstands bei Querkraftbeanspruchung erfolgt über den Grenzwert f_{vlt} der charakteristischen Schubfestigkeit. Analog zur rechnerischen Ermittlung der Biegezugfestigkeit besteht auch bei der Berechnung des Grenzwerts f_{vlt} die Möglichkeit, baustoffspezifische Werte für die Anfangsscherfestigkeit (Scheiben- und Plattenschub) und die Steinlängszugfestigkeit (Scheibenschub) der gewählten Mauerstein-Mauermörtel-Kombination anzusetzen, um höhere Schubfestigkeitswerte zu erzielen, vgl. Abschnitte 2.1.3 und 5.2.

6.3 Verformungseigenschaften

6.3.1 Elastizitätsmoduln

Der Elastizitätsmodul von Mauerwerk ist eine wichtige Eigenschaftskenngröße, die das Verformungsverhalten von Mauerwerk bei kurzzeitiger Lasteinwirkung in dem Last- bzw. Spannungsbereich von einem Drittel der Höchstspannung kennzeichnet. In diesem Bereich kann der Zusammenhang zwischen Belastung bzw. Spannung und der daraus resultierenden Verformung (Dehnung) näherungsweise als linear angesehen werden.

Für bestimmte Bemessungsfälle und für die Beurteilung der Rissicherheit sind der Druck-E-Modul senkrecht bzw. parallel zu den Lagerfugen sowie der Zug-E-Modul parallel zu den Lagerfugen von Relevanz.

Der Druck- bzw. Zug-E-Modul kann in Druck- bzw. Zugversuchen an Mauerwerk mitbestimmt werden, wenn die Verformungen in den jeweiligen Belastungsrichtungen miterfasst werden. Bei zusätzlicher Verformungsmessung quer zur Belastungsrichtung kann zudem der Querdehnungsmodul bzw. die Querdehnzahl ermittelt werden.

Rechnerisch kann der Druck- bzw. Zug-E-Modul in Abhängigkeit von der Mauerwerkdruck- bzw. -zugfestigkeit beschrieben werden. Da die Mauerwerkdruckfestigkeit nicht immer bekannt ist, kann es hilfreich sein, Werte für den Druck-E-Modul (senkrecht) in Abhängigkeit von der Steindruckfestigkeit anzugeben. In Tabelle 8 werden Gleichungen für die Berechnung des Druck-E-Moduls (senkrecht und parallel) sowie des Zug-E-Moduls (parallel) angegeben. Die Gleichungen entsprechen dem Stand in [1]; sofern nachvollziehbar, wurden Bestimmtheitsmaße (Best.) ergänzt. Die Werte für eine Druckbeanspruchung parallel zur Lagerfuge beziehen sich auf Mauerwerk mit vermörtelten Stoßfugen.

Tabelle 8. Mauerwerk; Elastizitätsmoduln unter Druckbeanspruchung (senkrecht und parallel) sowie unter Zugbeanspruchung (parallel) in Abhängigkeit der Mauerwerkdruck- bzw. Steindruckfestigkeit bzw. Mauerwerkzugfestigkeit (aus [1])

Mauerstein		Mauermörtel	Druck-E-Modul (senkrecht)			Druck-E-Modul (parallel)		Zug-E-Modul (parallel)
			$E_{D,s}$ (Best.)		Wertebereich Einzelwerte	$E_{D,p}$	Wertebereich Einzelwerte	$E_{Z,p}$ (Best.)
Kalksandstein	KS	NM	$500 \cdot \beta_D$	–	$\pm 50 \%$	$300 \cdot \beta_{D,p}$	$\pm 50 \%$	$24500 \cdot \beta_{Z,p}$ (77 %)
	KS L					$700 \cdot \beta_{D,p}$		
	KS, KS L	DM	$500 \cdot \beta_D$	–	$\pm 50 \%$	–	–	–
Leichtbetonstein	LB	LM	$1240 \cdot \beta_D^{0,77}$	–	$\pm 20 \%$	–	–	–
		NM	$1040 \cdot \beta_D$	–	$\pm 20 \%$	–	–	$14800 \cdot \beta_{Z,p}$ (98 %)
		DM	$930 \cdot \beta_D$ (95 %)	$600 \cdot \beta_{D,st}$ (96 %)	–	–	–	–
Porenbetonstein	PB	NM	$520 \cdot \beta_D$	$570 \cdot \beta_{D,st}^{0,69}$	$\pm 50 \%$	–	–	–
	PP	DM	$700 \cdot \beta_D^{0,85}$ (93 %) bzw. $560 \cdot \beta_D$ (91 %)	$470 \cdot \beta_{D,st}^{0,86}$ bzw. $350 \cdot \beta_{D,st}$	$\pm 20 \%$	$600 \cdot \beta_{D,p}$	$\pm 30 \%$	–
Mauerziegel	LHLZ	LM	$1480 \cdot \beta_D$	–	$\pm 50 \%$	–	–	–
		NM	$1170 \cdot \beta_D$	–	$\pm 50 \%$	–	–	–
		DM	$1190 \cdot \beta_D$	$460 \cdot \beta_{D,st}$	$\pm 50 \%$	–	–	–
	Mz, HLZ	NM	–	–	–	–	–	$15300 \cdot \beta_{Z,p}$ (99 %)

Tabelle 9. Mauerwerk mit Normalmauermörtel; Längsdehnung bei Höchstspannung in mm/m und Querdehnzahl bei einer Druckbeanspruchung senkrecht zu den Lagerfugen (aus [1])

Mauerstein- sorte	Längsdehnung $\varepsilon_{u,D}$		Querdehnzahl μ_D	
	Mittel- wert	Werte- bereich	Mittel- wert	Werte- bereich
HLz	1,8	1,0 ... 2,6	0,1	0,05 ... 0,23
KS, KS L	2,5	1,3 ... 3,9	0,1	0,07 ... 0,12
Hbl	1,6	0,9 ... 2,5	0,2	0,11 ... 0,34
V, Vbl	1,7	0,6 ... 4,0		
Hbn	1,0	0,5 ... 2,5	0,2	–
PB, PP	2,0	1,4 ... 3,7	0,25	0,17 ... 0,32
PP	1,8	1,5 ... 2,2	–	–

gen. Für Mauerwerk mit unvermörtelten Stoßfugen ergeben sich nach [1] etwa halb so hohe Druck-E-Modul-Werte wie bei Mauerwerk mit vermörtelten Stoßfugen. Wie aus Tabelle 8 ersichtlich, ergeben sich für eine Druckbeanspruchung senkrecht zur Lagerfuge Verhältniswerte Druck-E-Modul/Mauerwerkdruckfestigkeit in etwa zwischen 500 und 1500. Dieser Verhältniswert, bezogen auf den charakteristischen Wert der Mauerwerkdruckfestigkeit f_k , wird in DIN EN 1996-1-1/NA [17] als Kennzahl K_E differenziert nach Mauersteinart angegeben.

Werte für den Druck-E-Modul (senkrecht) in Abhängigkeit von der Mauersteinsorte, der Steinfestigkeitsklasse sowie der Mauermörtelart sind in [1] tabelliert. Diese Werte wurden aus Regressionsgleichungen berechnet.

Tabelle 9 enthält Werte für die Längsdehnung bei Höchstspannung (Bruchspannung) und die Querdehnzahl bei einer Druckbeanspruchung senkrecht zu den Lagerfugen. Die Werte gelten für Mauerwerk mit Normalmauermörtel.

6.3.2 Feuchtedehnung, Kriechen, Wärmedehnung

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.

In DIN EN 1996-1-1/NA [17] sind für die Mauerstein- und Mauermörtelarten Kennwerte für Feuchtedehnung, Kriechen und Wärmedehnung als Rechenwerte mit jeweiligen Wertebereichen angegeben. Zusammenhänge und Hinweise auf Prüfverfahren sind in [14] und [15] dargestellt.

7 Literatur

Monografien, Zeitschriftenartikel

- [1] Schubert, P. (2009) Eigenschaftswerte von Mauerwerk, Mauersteinen, Mauermörtel und Putzen, in *Mauerwerk-Kalender 2009* (Hrsg. Jäger, W.), Ernst & Sohn, Berlin, S. 3–27.
- [2] Brameshuber, W. (2016) Eigenschaften von Mauersteinen, Mauermörtel, Mauerwerk und Putzen, in *Mauerwerk-Kalender 2016* (Hrsg. Jäger, W.), Ernst & Sohn, Berlin, S. 3–29.
- [3] Graubohm, M. (2019) Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Drucktragverhalten von Mauerwerk, in *Mauerwerk-Kalender 2019* (Hrsg. Jäger, W.), Ernst & Sohn, Berlin, S. 265–292.
- [4] Schubert, P.; Laurini, G. (1996) *Einfluß der Zusammensetzung von Mauermörtel auf die Eigenschaften im Mauerwerk – Wasserhaushalt in der Mörtelfuge, Haftscherfestigkeit*, Institut für Bauforschung, Aachen, Forschungsbericht Nr. F 444.
- [5] Riechers, H.-J. (2000) *Ein neues Modell zur Beschreibung der Festigkeitsentwicklung von Mauermörtel in der Fuge*, Dissertation, RWTH Aachen.
- [6] Schubert, P.; Heer, B. (2000) *Einfluß der Zusammensetzung von Mauermörtel auf seine Eigenschaften im Mauerwerk*, Institut für Bauforschung, Aachen, Forschungsbericht Nr. F 684.
- [7] Brameshuber, W.; Graubohm, M.; Schmidt, U. (2006) Festigkeitseigenschaften von Mauerwerk, Teil 4: Scherfestigkeit, in *Mauerwerk-Kalender 2006* (Hrsg. Jäger, W.), Ernst & Sohn, Berlin, S. 193–225.
- [8] Brameshuber, W.; Saenger, D. (2013) Erläuterungen zur Haftscherfestigkeit, in *Mauerwerk* **17** (1), 2–7.
- [9] Schmidt, U.; Brameshuber, W. (2013) Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Biegezugfestigkeit von Mauerwerk, in *Mauerwerk-Kalender 2013* (Hrsg. Jäger, W.), Ernst & Sohn, Berlin, S. 655–687.
- [10] Saenger, D.; Brameshuber, W. (2016) Längsdruckfestigkeit von Mauerwerk – Vereinfachter Berechnungsansatz, in *Mauerwerk* **20** (5), 340–351.
- [11] Schubert, P. (2009) Festigkeit und Verformungseigenschaften von Mauerwerk unter Zugbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen, *Mauerwerk* **13** (6), 364–370.
- [12] Mann, W. (1979) Grundlagen der Bemessung von Ingenieurmauerwerk, *Mauerwerk-Kalender 1979* (Hrsg. Funk, P.), Ernst & Sohn, Berlin, S. 35–67.
- [13] Schmidt, U.; Schubert, P. (2004) Festigkeitseigenschaften von Mauerwerk; Teil 2: Biegezugfestigkeit, in *Mauerwerk-Kalender 2004* (Hrsg. Irmschler, H.-J.; Jäger, W.; Schubert, P.), Ernst & Sohn, Berlin, S. 31–63.
- [14] Schubert, P. (1992) Formänderungen von Mauersteinen, Mauermörtel und Mauerwerk, in *Mauerwerk-Kalender 1992* (Hrsg. Funk, P.), Ernst & Sohn, Berlin, S. 623–637.

[15] Schubert, P. (2002) Schadenfreies Konstruieren mit Mauerwerk; Teil 1: Formänderungen von Mauerwerk – Nachweisverfahren, Untersuchungsergebnisse, Rechenwerte, in *Mauerwerk-Kalender 2002* (Hrsg. Irmschler, H.-J.; Schubert, P.), Ernst & Sohn, Berlin, S. 313–331.

Normen

[16] DIN EN 772-1:2016-05 (2016) *Prüfverfahren für Mauersteine – Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit*, Beuth, Berlin.

[17] DIN EN 1996-1-1/NA:2019-12 *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk*, Beuth, Berlin.

[18] DIN EN ISO 15148:2018-12 (2018) *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen*, Beuth, Berlin.

[19] DIN EN 1015-11:2007-05 (2007) *Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 11: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel*, Beuth, Berlin.

[20] DIN 18555-4:2019-04 (2019) *Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln – Teil 4: Bestimmung der Längs- und Querdehnung sowie von Verformungskenngrößen von Mauermörteln (Festmörtel) im statischen Druckversuch*, Beuth, Berlin.

[21] DIN 18555-9:2019-04 (2019) *Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln – Teil 9: Bestimmung der Fugendruckfestigkeit von Festmörteln*, Beuth, Berlin.

[22] DIN 20000-412:2019-06 (2019) *Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken – Teil 412: Regeln für die Verwendung von Mauermörtel nach DIN EN 998-2:2017-02*, Beuth, Berlin.

[23] DIN 18555-5:1986-03 (1986) *Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln – Festmörtel – Bestimmung der Haftscherfestigkeit von Mauermörteln*, Beuth, Berlin.

[24] DIN EN 1052-3:2007-06 (2007) *Prüfverfahren für Mauerwerk – Teil 3: Bestimmung der Anfangsscherfestigkeit (Haftscherfestigkeit)*, Beuth, Berlin.

[25] DIN EN 1052-5:2005-06 (2005) *Prüfverfahren für Mauerwerk – Teil 5: Bestimmung der Biegehaftzugfestigkeit*, Beuth, Berlin.

[26] DIN EN 1052-1:1998-12 (1998) *Prüfverfahren für Mauerwerk – Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit*, Beuth, Berlin.

[27] DIN EN 1052-2:2016-08 (2016) *Prüfverfahren für Mauerwerk – Teil 2: Bestimmung der Biegezugfestigkeit*, Beuth, Berlin.