

A Normen und Baustoffe

**A 1 Eigenschaften und Eigenschaftswerte von
Mauersteinen, Mauermörtel und Mauerwerk**

Michael Raupach, Dorothea Saenger und Bernd Winkels

COPYRIGHTED MATERIAL

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3	6	Mauerwerk	10
2	Mauersteine	3	6.1	Allgemeines	10
2.1	Festigkeitseigenschaften	3	6.2	Festigkeitseigenschaften	10
2.1.1	Druckfestigkeit in Steinhöhe	3	6.2.1	Druckfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen	10
2.1.2	Druckfestigkeit in Steinlänge und -breite	3	6.2.2	Druckfestigkeit parallel zu den Lagerfugen	11
2.1.3	Zug- und Spaltzugfestigkeit	3	6.2.3	Zugfestigkeit	11
2.2	Verformungseigenschaften	4	6.2.4	Biegezugfestigkeit	13
2.2.1	Elastizitätsmoduln	4	6.2.5	Schubfestigkeit	13
2.2.2	Querdehnungsmodul, Querdehnzahl	4	6.3	Verformungseigenschaften	14
2.3	Kapillare Wasseraufnahme	5	6.3.1	Elastizitätsmoduln	14
			6.3.2	Feuchtedehnung, Kriechen, Wärmedehnung	14
3	Mauermörtel	6			
3.1	Festigkeitseigenschaften	6			
3.1.1	Druckfestigkeit	6			
3.1.2	Zugfestigkeit	6			
3.2	Längs- und Querdehnungsmoduln	6			
4	Mauermörtel im Mauerwerk	6			
5	Verbund zwischen Mauerstein und Mauermörtel	8			
5.1	Allgemeines	8			
5.2	Haftscherfestigkeit	8			
5.3	Haftzug- und Biegehaftzugfestigkeit	9			
				Literatur	16

1 Einleitung

Der vorliegende Beitrag wurde von Dr. Peter Schubert[†] am Institut für Baustoffforschung der RWTH Aachen University (ibac) 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 Baustoffressen ausgenutzt werden.

2 Mauersteine

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 kann nach DIN EN 772-1 [16] an ganzen Mauersteinen erfolgen.

2.1.2 Druckfestigkeit in Steinlänge und -breite

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

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. Aus [1] lassen sich folgende Zusammenhänge ableiten: Für Hochlochziegel und Leichtbetonhohlblöcke kann erwartungsgemäß kein Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit in Steinhöhe und der Druckfestigkeit in Steinlänge festgestellt werden. Für Porenbetonsteine ergibt sich mit zunehmender Steindruckfestigkeit eine Abnahme des Druckfestigkeitsverhältnisses Steinlänge/Steinhöhe. Bei Mauerziegeln sowie Kalksandvoll- und -lochsteinen bleibt dagegen das Druckfestigkeitsverhältnis Steinlänge/Steinhöhe mit zunehmender Steindruckfestigkeit weitestgehend konstant.

2.1.3 Zug- und Spaltzugfestigkeit

Die Zugfestigkeit ist ebenfalls eine wesentliche Kenngröße von Mauersteinen. Die maßgebende Richtung wird von der ausgeübten Mauerwerkbeanspruchung abhängen. Aus einer Druckbeanspruchung von Mauerwerk werden – aufgrund des entstehenden mehraxialen Spannungszustands – Zugspannungen im Mauerstein in Richtung Steinbreite und -länge resultieren, während durch eine Schub- bzw. Biegebeanspruchung von Mauerwerk Zugspannungen im Mauerstein in Richtung Steinhöhe bzw. -länge hervorgerufen werden.

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 Schubfestigkeit bei Steinzugversagen abgeschätzt werden, vgl. Abschnitte 6.2.4 und 6.2.5. Für Porenbetonsteine wird der Verhältniswert in Abhängigkeit der Steindruckfestigkeit angegeben. Der in der Berechnungsformel enthaltene „charakteristische“ Verhältniswert Steinzug-/Steindruckfestigkeit von 0,082 ist das Ergebnis einer Literaturoauswertung. Für die Herleitung des Verhältniswertes wurden 26 Versuche an Porenbeton-Plansteinen mit unterschiedlichen Abmessungen herangezogen. Der Faktor $1/1,25 = 0,8$ resultiert aus der Umrechnung der Steindruckfestigkeit in die mittlere

Tabelle 1. Mauersteine; Verhältniswerte Steinzug-/Steindruckfestigkeit nach [17] bzw. [2]

Steinart/-sorte	$f_{bt,cal}/f_{st}$	Steinart/-sorte	$\beta_{z,l}/\beta_{D,st,prüf}$		
			Mittelwert	Wertebereich	n
Hohlblocksteine	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 und Steine mit Grifflöchern (GL) oder Grifftaschen	0,026	HLz	0,03	0,013 ... 0,041	20
		LHLz	0,01	0,002 ... 0,019	54
		KS L	0,035	0,026 ... 0,055	19
		KS (GL)	0,045	0,027 ... 0,065	24
Vollsteine ohne Grifflöcher oder Grifftaschen	0,032	KS	0,063	0,039 ... 0,081	18
		Mz	0,04	0,01 ... 0,08	9
		V/Vbl 2	0,11	0,06 ... 0,18	16
		V/Vbl ≥ 4	0,07	0,05 ... 0,09	7
Porenbetonsteine	$\frac{0,082}{1,25} \cdot \frac{1}{0,7 + \left(\frac{f_{st}}{25}\right)^{0,5}}^1$	PB/PP 2	0,18	0,13 ... 0,20	7
		PB/PP 4, 6, 8	0,11	0,09 ... 0,13	8

1) Gleichung gilt für Porenbetonplansteine der Länge ≥ 498 mm und der Höhe ≥ 248 mm

$f_{bt,cal}$ angenommene rechnerische Steinlängszugfestigkeit nach [17] in N/mm²

f_{st} umgerechnete mittlere Steindruckfestigkeit nach [17] in N/mm²

$\beta_{z,l}$ Prüfwert der Steinlängszugfestigkeit in N/mm²

$\beta_{D,st,prüf}$ Prüfwert der Steindruckfestigkeit in Richtung Steinhöhe (ohne Formfaktor) in N/mm²

n Anzahl der Versuchswerte

Mindeststeindruckfestigkeit f_{st} . Der Faktor $1/(0,7 + (f_{st}/25)^{0,5})$ stellt eine Abminderung von $f_{bt,cal}$ für Steine mit höheren Festigkeiten (größer als Steinfestigkeitsklasse 2) dar. Er ist ungefähr 1 für die Steinfestigkeitsklasse 2 und nimmt mit höheren Festigkeitsklassen ab. 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 Elastizitätsmoduln

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

einmaliger Belastung definiert. Der Druck-E-Modul von Mauersteinen wird im Druckversuch in Steinhöhe ermittelt. Der Zug-E-Modul von Mauersteinen wird in einaxialen Zugversuchen, meist in Steinlänge, bestimmt.

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] die in Tabelle 2 angegebenen Regressionsgleichungen angesetzt werden. Zusammenhänge zwischen dem Zug-E-Modul und der Steinzugfestigkeit bei einer Zugbeanspruchung in Steinlänge bzw. zwischen dem Zug-E-Modul und dem Druck-E-Modul werden in [1] angegeben. Diese sind ebenfalls in Tabelle 2 zusammengestellt.

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 Steinlänge bzw. -breite, gemessene Dehnung bezogen.

Diese Kenngröße ist von maßgebender Bedeutung für die Drucktragfähigkeit von Mauerwerk. Bei einem ungünstigen Verhältnis der Querdehnungsmoduln von

Tabelle 2. Mauersteine; Regressionsgleichungen zur Bestimmung der Elastizitätsmoduln unter Druck- sowie Zugbeanspruchung in Abhängigkeit der Steindruck- bzw. -zugfestigkeit bzw. des Druck-E-Moduls für die jeweilige Belastungsrichtung (aus [1])

Steinart	Druck-E-Modul (Steinhöhe)				Zug-E-Modul (Steinlänge)			
	E_D	Prüfkörper	n (n_i)	Best.	$E_{Z,I}$	Prüfkörper	n (n_i)	Best.
Kalksandsteine	$230 \cdot \beta_{D,st}$	Prismen	(12)	–	$5800 \cdot \beta_{Z,I}^{0,73}$	Prismen	13	0,95
Leichtbetonsteine	–	–	–	–	$6000 \cdot \beta_{Z,I}$	Prismen	(35)	0,77
Porenbetonsteine	$700 \cdot \beta_{D,st}^{0,74}$	Zylinder	18	0,83	$3180 \cdot \beta_{Z,I}$	Zylinder/Prismen	21	0,78
					1,01 · E_D	Zylinder	11	0,93

E_D Druck-E-Modul in Richtung Steinhöhe in N/mm²
 $E_{Z,I}$ Zug-E-Modul in Richtung Steinlänge in N/mm²
 $\beta_{D,st}$ Mauersteindruckfestigkeit in Richtung Steinhöhe in N/mm²
 $\beta_{Z,I}$ Mauersteinzugfestigkeit in Richtung Steinlänge in N/mm²

n Anzahl der Mittelwerte
 (n_i) Anzahl der Einzelwerte
 Best. Bestimmtheitsmaß der gewählten Regression

Tabelle 3. Mauersteine; Querdehnungsmodul und Querdehnzahl (Wertebereiche aus [1] und [3])

Steinart/-sorte	Festigkeitsklasse	Querdehnungsmodul E_q	Querdehnzahl μ
		10 ³ N/mm ²	–
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, KS Hbl	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

Mauermörtel und Mauerstein wird der Mauerstein stärker auf Zug beansprucht, was die Druckfestigkeit des Mauerwerks reduziert. Werte für den Querdehnungsmodul von Mauersteinen sind in Tabelle 3 angegeben.

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 3 aufgeführt.

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

Tabelle 4. Mauersteine; Wasseraufnahmekoeffizient (Werte bzw. Wertebereiche aus [4])

Steinart/-sorte	Wasseraufnahmekoeffizient ω		
	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

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 vorgenässt, 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 kg/(m² h^{0,5}) gekennzeichnet. Tabelle 4 enthält ω -Werte von Mauersteinen nach [4].

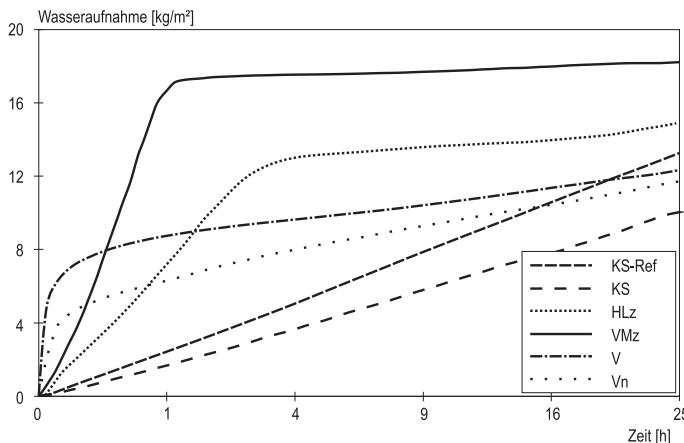


Bild 1. Zeitlicher Verlauf der Wasseraufnahme ausgewählter Mauersteine (nach [4])

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.

3 Mauermörtel

3.1 Festigkeitseigenschaften

3.1.1 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit von Mauermörtel wird an Normalprismen nach DIN EN 1015-11 [19] bestimmt. Wertebereiche für die Druckfestigkeit von Mauermörtel nach [1] sind in Tabelle 5 gegeben.

3.1.2 Zugfestigkeit

Die Prüfung der Zugfestigkeit von Mauermörtel ist nicht normativ geregelt. Für Normalmauermörtel ergab sich nach [1] die in Tabelle 5 angegebene Beziehung zwischen Zug- und Druckfestigkeit.

3.2 Längs- und Querdehnungsmoduln

Der Längsdehnungsmodul von Mauermörtel wird im statischen Druckversuch an Mörtelgroßprismen nach DIN 18555-4 [20] ermittelt. Der Querdehnungsmodul von Mauermörtel wird im Allgemeinen gemeinsam mit dem Längsdehnungsmodul bestimmt. 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 Querzugspannungen im Stein, wodurch die Mauerwerkdruckfestigkeit verringert werden kann. Dies ist besonders bei leichten Leichtmauermörteln mit sehr verformba-

ren Gesteinskörnungen, z. B. mineralische Perlite, der Fall.

In Tabelle 5 sind – differenziert nach Mörtelart – Beziehungen zwischen dem Längsdehnungsmodul E und der Normdruckfestigkeit β_D sowie Wertebereiche für Querdehnungsmoduln von Mauermörteln nach [1] zusammengestellt.

4 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 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].

Tabelle 5. Mauermörtel; Regressionsgleichungen zur Bestimmung der Zugfestigkeit und des Längsdehnungsmoduls sowie Wertebereiche für die Trockenrohdichte, die Druckfestigkeit und den Querdehnungsmodul (nach [1])

Mörtelart	Zuschlag	β_z	β_D	ρ_d	E_q	E_l	n
		N/mm ²	N/mm ²	kg/dm ³	N/mm ²	-	
Normalmauermörtel	-	0,11 · β_D (0,91)	-	-	-	-	33
		-	1,5 ... 24	1,1 ... 1,9	1,2 ... 116	-	49
		-	-	-	-	$2100 \cdot \beta_D^{0,7}$	-
Dünnbettmörtel	-	-	14 ... 21	1,4 ... 1,6	36 ... 49	-	5
Leichtmauermörtel LM 21	Polystyrol, Perlite, Naturbims	-	8,4 ... 11,6	0,6 ... 0,8	6,7 ... 15	-	23
	Perlite	-	-	-	-	$1200 \cdot \beta_D^{0,4}$	-
Leichtmauermörtel LM 36	Blähton, Naturbims, Blähsschiefer	-	4,0 ... 21	0,8 ... 1,2	16 ... 48	-	36
	Blähton	-	-	-	-	$1200 \cdot \beta_D^{0,6}$	-

β_z Zugfestigkeit in N/mm²

β_D Druckfestigkeit in N/mm²

E_q Längsdehnungsmodul in N/mm²

E_l Querdehnungsmodul in N/mm²

ρ_d Trockenrohdichte in kg/dm³

n Anzahl der Versuchswerte

Wert in Klammern: Bestimmtheitsmaß der gewählten Regression

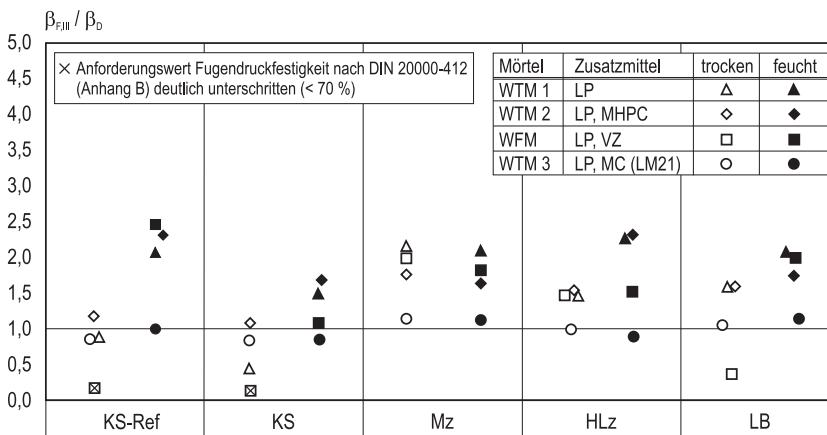


Bild 2. Fugendruckfestigkeit $\beta_{F,III}$ bezogen auf die Prismen-Druckfestigkeit β_D ; Prüfalter: 28 Tage (Werte aus [6])

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 Werktrocken-(WTM) und Werkfrischmörtel (WFM) mit folgenden Zusatzmitteln verwendet: Luftporenbildner (LP), Verzögerer (VZ), Methylcellulose (MC) und Methylhydroxypropylcellulose (MHPC).

Vor allem bei trocken vermauerten Kalksandsteinen können sich je nach Feuchtezustand bezogene Druckfestigkeiten in der Fuge $\leq 1,0$ ergeben. Hingegen kann

die Saugcharakteristik bei Mauerziegeln (relativ hohe 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.

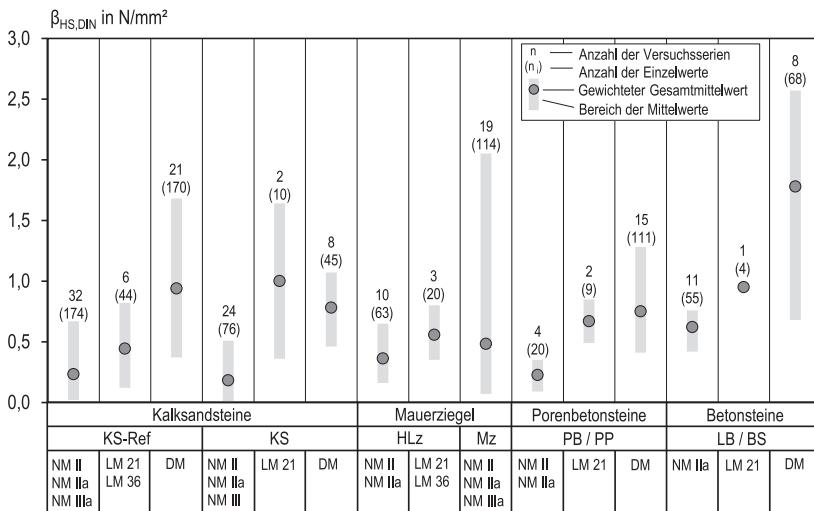


Bild 3. Bandbreite der Haftscherfestigkeitswerte nach dem DIN-Verfahren (Werte aus [7])

5 Verbund zwischen Mauerstein und Mauermörtel

5.1 Allgemeines

In Mauerwerksbauteilen, 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.

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 Mauerwerksbauteilen nach [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 Prüfwerter der Haftscherfestigkeit nach dem EN-Verfahren je nach Prüfkörpergeometrie und weiteren Randbedin-

gungen etwa halb so groß wie die nach dem DIN-Verfahren sein können, 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 (Prüffalter, Lagerungsklima 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 6 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 [17] anzusetzenden Haftscherfestigkeitswerte sind derzeit in Abhängigkeit der Mauermörtelart, jedoch nicht differenziert nach der Mauersteinart, angegeben, s. ebenfalls Tabelle 6. Die Werte basieren auf

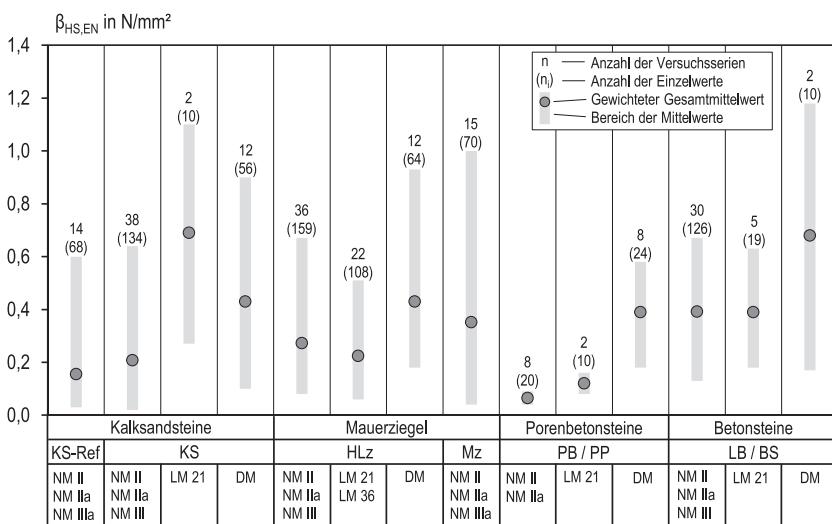


Bild 4. Bandbreite der Haftscherfestigkeitswerte nach dem EN-Verfahren (Werte aus [7])

Tabelle 6. Stein/Mörtel; Anhaltswerte für die Haftscherfestigkeit nach [7] und anzusetzende Haftscherfestigkeitswerte (charakteristische Werte) nach [17], differenziert nach Mauersteinart/-sorte bzw. Mörtelgruppe bzw. -klasse

Stein/Mörtel		Haftscherfestigkeit β_{HS} nach [7]				Charakteristische Haftscherfestigkeit f_{vk0} nach [17]				
Mauermörtel	NM IIa	NM III	LM 36	DM	NM IIa	NM III	LM 36	DM	–	
	M 5	M 10	M 5	M 10	M 5	M 10	M 5	M 10		
Mauerstein	N/mm ²						N/mm ²			
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						

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 Mauerstein bzw. Mauermörtel 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.

5.3 Haftzug- und Biegehaftzugfestigkeit

Die Kenngröße Haftzugfestigkeit impliziert die Annahme einer zentralen 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 zentralen Haftzugfestigkeit existiert nicht. Die Prüfung der Biegehaftzugfestigkeit mit dem Bondwrench-Verfahren ist in DIN EN 1052-5 [25] geregelt. In Tabelle 7 sind Versuchsdaten aus [1] zusammengefasst.

Tabelle 7. Stein/Mörtel; Haftzugfestigkeit; Prüfalter im Allgemeinen mind. 14 Tage (aus [1])

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

1) I, f: lufttrocken, feucht

2) Z: zentrisch; BW: Bondwrench

3) Keine Angabe von Einzelwerten

4) Prüfalter unter 14 Tage

 \bar{x} , min x, max x Mittelwert, Kleinstwert, Größtwert in N/mm²

n Anzahl der Versuchsserien

(n_i) Anzahl der Einzelwerte

6 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.

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 Gl. (1) nach [17] angewendet werden:

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

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 [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 Faktor 1,25. Bei der Mauermörtelfestigkeit f_m sind [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. In [3] wird auf zwei wesentliche Parameter näher eingegangen: Die horizontalen Verformungsunterschiede von Mauerstein und Mauermörtel unter vertikaler Druckbeanspruchung sowie die hygrische Wechselwirkung zwischen dem Wasseraufnahmevermögen des Mauersteins und dem Wasserrückhaltevermögen des Mörtels.

Bild 5 zeigt beispielhaft anhand der Auswertung von Druckversuchen an Mauerwerk aus Kalksand-Vollsteinen und Kalksand-Blocksteinen in Kombination

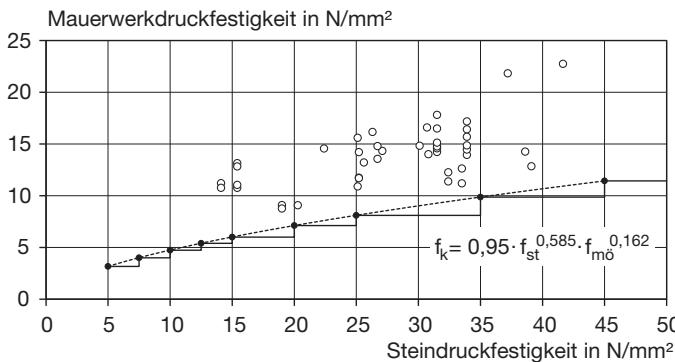


Bild 5. Druckfestigkeit von Mauerwerk aus Kalksand-Vollsteinen und Kalksand-Blocksteinen mit Normalmauermörtel der Mörtelklasse M5 in Abhängigkeit von der Steindruckfestigkeit

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 $\beta_{D,mw}$ in Abhängigkeit der geprüften Steindruckfestigkeit $\beta_{D,st}$ einschließlich Formfaktor. Zusätzlich enthält das Diagramm die gemäß [17] 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 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 [17] mit derselben Gleichung und denselben Gleichungsparametern, die für die Bestimmung der Druckfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen ermittelt wurden. Statt der Steindruckfestigkeit in Richtung Stein Höhe 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

unvermortelten 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 vermortelten 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 definieren 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 Riss sicherheit bei Bauteilen ohne wesentliche Auflast – wie Verblend schalen, 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 8 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 in [12] wurde davon ausgegangen, dass in den vertikalen Stoßfugen, auch wenn sie vermortelt sind, keine Zugspannungen übertragen werden können. Der

Tabelle 8. Mauerwerk; Zugfestigkeit bei einer Zugbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen (aus [1] bzw. [11])

Mauerstein			Mauermörtel		SF	Zugfestigkeit f_t	
Art, Sorte	Format	Festigkeitsklasse	Art	Gruppe		N/mm ²	n
Mz	NF	28	NM	Ila	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	Ila	um	0,24; 0,14	2
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	Ila	um	0,03	1
V, Vbl	2DF, 8DF	2	NM	II, Ila	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	Ila	vm	0,17	1
Hbl	10DF	2	NM	Ila	vm	0,13	1

SF: Stoßfugen; vm: vermortelt; um: unvermortelt; n: Anzahl der Einzelwerte

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, vgl. Gl. (2). Wesentliche Einflussgröße auf die Mauerwerkzugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen bei Steinversagen ist daher die Steinzugfestigkeit in Richtung Steinlänge.

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

mit

f_t Mauerwerkzugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen bei Steinversagen

$f_{t,u}$ 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 ggf. dem auflast-abhängigen Reibungsanteil zwischen Mauerstein und Mauermörtel zusammensetzt, siehe Gleichungen (3a) bzw. (3b).

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

bzw.

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

mit

f_t Mauerwerkzugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen bei Fugenversagen

f_{v0} Haftscherfestigkeit

l_{ol} Überbindelänge

h_u Steinhöhe

μ Reibungsbeiwert

σ_d Druckspannung senkrecht zur Lagerfuge

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 Erddruck belasteten Kellerwänden. Bei dem anisotropen Baustoff Mauerwerk wird unterschieden zwischen den 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 Mauerwerkswand 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 Lager-

fugen) darf in tragenden Wänden nach [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 [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 Steinlängszugfestigkeit und die Anfangsscherfestigkeit der gewählten Mauerstein-Mauermörtel-Kombination besteht die Möglichkeit, über die nach [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 Mauerwerkswände sowohl in Wandebene auf Scheibenschub als auch senkrecht zur Wandebene auf Plattenschub beansprucht werden.

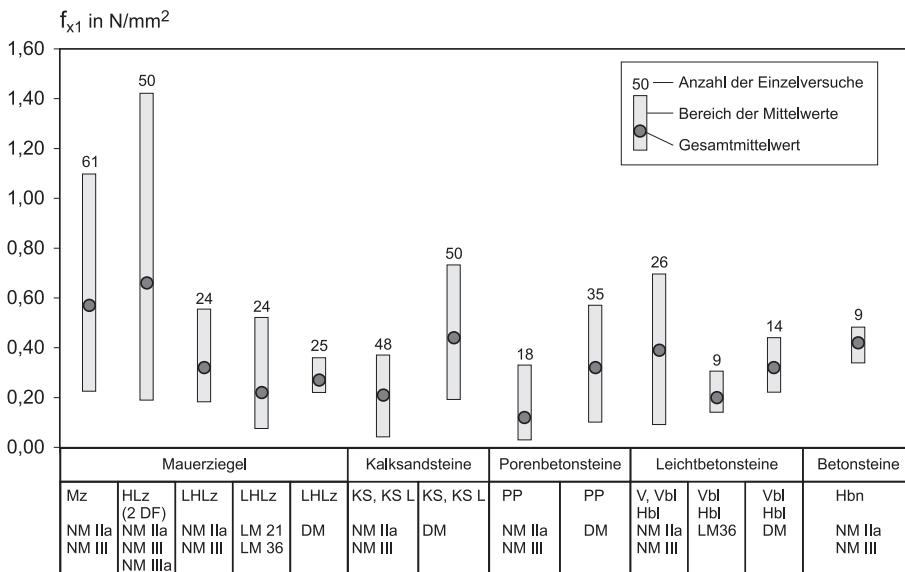


Bild 6. Bandbreite der Biegezugfestigkeitswerte senkrecht zur Lagerfuge (aus [13])

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 Nachweise 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 Steinfestigkeit (Scheibenschub) und die Anfangsscherfestigkeit (Scheiben- und Plattenschub) 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 9 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 vermortelten Stoßfugen. Für Mauerwerk mit unvermortelten Stoßfugen ergeben sich nach [1] etwa halb so hohe Druck-E-Mo-

dul-Werte wie bei Mauerwerk mit vermortelten Stoßfugen.

Wie aus Tabelle 9 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 [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 10 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 [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.

Tabelle 9. Mauerwerk; Regressionsgleichungen zur Bestimmung der Elastizitätsmodulen unter Druck- sowie Zugbeanspruchung in Abhängigkeit der Mauerwerkdruk- bzw. Steindruckfestigkeit bzw. Mauerwerkzugfestigkeit für die jeweilige Belastungsrichtung (aus [1])

Mauersteine		Mauer-	Druck-E-Modul (senkrecht)			Druck-E-Modul (parallel)		Zug-E-Modul (parallel)
			$E_{D,s}$		Wertebereich Einzelwerte	$E_{D,p}$	Wertebereich Einzelwerte	$E_{Z,p}$
Kalk-sand-steine	KS	NM	500 · β_D	–	±50 %	300 · $\beta_{D,p}$	±50 %	24500 · $\beta_{Z,p}$ (0,77)
	KS L					700 · $\beta_{D,p}$		
	KS, KS L	DM	500 · β_D	–	±50 %	–	–	–
Leicht-beton-steine	LB	LM	$1240 \cdot \beta_D^{0,77}$	–	±20 %	–	–	–
		NM	$1040 \cdot \beta_D$	–	±20 %	–	–	$14800 \cdot \beta_{Z,p}$ (0,98)
		DM	$930 \cdot \beta_D$ (0,95)	$600 \cdot \beta_{D,st}$ (0,96)	–	–	–	–
Poren-beton-steine	PB	NM	520 · β_D	$570 \cdot \beta_{D,st}^{0,69}$	±50 %	–	–	–
	PP	DM	$700 \cdot \beta_D^{0,85}$ (0,93) bzw. $560 \cdot \beta_D$ (0,91)	$470 \cdot \beta_{D,st}^{0,86}$ bzw. $350 \cdot \beta_{D,st}$	±20 %	$600 \cdot \beta_{D,p}$	±30 %	–
Mauer-ziegel	LHLz	LM	$1480 \cdot \beta_D$	–	±50 %	–	–	–
		NM	$1170 \cdot \beta_D$	–	±50 %	–	–	–
		DM	$1190 \cdot \beta_D$	$460 \cdot \beta_{D,st}$	±50 %	–	–	–
	Mz, HLz	NM	–	–	–	–	–	$15300 \cdot \beta_{Z,p}$ (0,99)

β_D Mauerwerkdrukfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge in N/mm²

$\beta_{D,st}$ Mauersteindruckfestigkeit in N/mm²

$\beta_{D,p}$ Mauerwerkdrukfestigkeit parallel zur Lagerfuge in N/mm²

$\beta_{Z,p}$ Mauerwerkzugfestigkeit parallel zur Lagerfuge in N/mm²

$E_{D,s}$ Druck-E-Modul senkrecht zur Lagerfuge in N/mm²

$E_{D,p}$ Druck-E-Modul parallel zur Lagerfuge in N/mm²

$E_{Z,p}$ Zug-E-Modul parallel zur Lagerfuge in N/mm²

Werte in Klammern: Bestimmtheitsmaß der Regression

Tabelle 10. Mauerwerk mit Normalmauermörtel; Längsdehnung bei Höchstspannung und Querdehnzahl bei einer Druckbeanspruchung senkrecht zu den Lagerfugen (aus [1])

Mauersteinsorte	Längsdehnung $\varepsilon_{u,D}$		Querdehnzahl μ_D	
	Mittelwert	Wertebereich	Mittelwert	Wertebereich
	mm/m		–	
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	1,8 ... 2,0	1,4 ... 3,7	0,25	0,17 ... 0,32

Literatur

Monografien, Zeitschriftenartikel

- [1] Schubert, P. (2009) *Eigenschaftswerte von Mauerwerk, Mauersteinen, Mauermörtel und Putzen* in: Jäger, W. [Hrsg.] *Mauerwerk-Kalender 2009*. Berlin: Ernst & Sohn, S. 3–27.
- [2] Brameshuber, W. (2016) *Eigenschaften von Mauersteinen, Mauermörtel, Mauerwerk und Putzen* in: Jäger, W. [Hrsg.] *Mauerwerk-Kalender 2016*. Berlin: Ernst & Sohn, S. 3–29.
- [3] Graubohm, M. (2019) *Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Drucktragverhalten von Mauerwerk* in: Jäger, W. [Hrsg.] *Mauerwerk-Kalender 2019*. Berlin: Ernst & Sohn, 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: Jäger, W. [Hrsg.] *Mauerwerk-Kalender 2006*. Berlin: Ernst & Sohn, 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: Jäger, W. [Hrsg.] *Mauerwerk-Kalender 2009*. Berlin: Ernst & Sohn, S. 655–687.
- [10] Saenger, D.; Brameshuber, W. (2016) *Längsdrukfestigkeit 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* in: Funk, P. [Hrsg.] *Mauerwerk-Kalender 1979*. Berlin: Ernst & Sohn, S. 35–67.
- [13] Schmidt, U.; Schubert, P. (2004) *Festigkeitseigenschaften von Mauerwerk; Teil 2: Biegezugfestigkeit* in: Irmischler, H.-J., Jäger, W., Schubert, P. [Hrsg.] *Mauerwerk-Kalender 2004*. Berlin: Ernst & Sohn, S. 31–63.
- [14] Schubert, P. (1992) *Formänderungen von Mauersteinen, Mauermörtel und Mauerwerk* in: Funk, P. [Hrsg.] *Mauerwerk-Kalender 1992*. Berlin: Ernst & Sohn, S. 623–637.
- [15] Schubert, P. (2002) *Schadenfreies Konstruieren mit Mauerwerk; Teil 1: Formänderungen von Mauerwerk – Nachweisverfahren, Untersuchungsergebnisse, Rechenwerte* in: Irmischler, H.-J., Schubert, P. [Hrsg.] *Mauerwerk-Kalender 2002*. Berlin: Ernst & Sohn, S. 313–331.
- Normen**
- [16] DIN EN 772-1:2016-05 (2016) *Prüfverfahren für Mauersteine – Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit*. Berlin: Beuth.
- [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*. Berlin: Beuth.
- [18] DIN EN ISO 15148:2018-12 (2018) *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauproducten – Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen*. Berlin: Beuth.
- [19] DIN EN 1015-11:2020-01 (2020) *Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 11: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel*. Berlin: Beuth.
- [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*. Berlin: Beuth.
- [21] DIN 18555-9:2019-04 (2019) *Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln – Teil 9: Bestimmung der Fußgrendruckfestigkeit von Festmörteln*. Berlin: Beuth.
- [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*. Berlin: Beuth.
- [23] DIN 18555-5:1986-03 (1986) *Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln – Festmörtel – Bestimmung der Haftscherfestigkeit von Mauermörteln*. Berlin: Beuth.
- [24] DIN EN 1052-3:2007-06 (2007) *Prüfverfahren für Mauerwerk – Teil 3: Bestimmung der Anfangsscherfestigkeit (Haftscherfestigkeit)*. Berlin: Beuth.
- [25] DIN EN 1052-5:2005-06 (2005) *Prüfverfahren für Mauerwerk – Teil 5: Bestimmung der Biegehaftzugfestigkeit*. Berlin: Beuth.
- [26] DIN EN 1052-1:1998-12 (1998) *Prüfverfahren für Mauerwerk – Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit*. Berlin: Beuth.
- [27] DIN EN 1052-2:2018-12 (2018) *Prüfverfahren für Mauerwerk – Teil 2: Bestimmung der Biegezugfestigkeit*. Berlin: Beuth.