

2020

# MAUERWERK KALENDER



Bauen im Bestand  
Befestigungen  
Lehmmauerwerk



2020

# MAUERWERK KALENDER

---

Bauen im Bestand  
Befestigungen  
Lehmmauerwerk

---

Herausgegeben von  
Wolfram Jäger, Dresden

45. Jahrgang

Hinweis des Verlages

Die Recherche zum Mauerwerk-Kalender ab  
Jahrgang 1976 steht im Internet zur Verfügung  
unter [www.ernst-und-sohn.de](http://www.ernst-und-sohn.de)

Titelbild: Bremer Landesbank

Foto: Ulrich Hoppe (mit freundlicher Genehmigung von Deppe Backstein)

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;  
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2020 Wilhelm Ernst & Sohn,

Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG,  
Rotherstraße 21, 10245 Berlin, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikrofilm oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden.

All rights reserved (including those of translation into other languages). No part of this book may be reproduced in any form – by photoprinting, microfilm, or any other means – nor transmitted or translated into a machine language without written permission from the publisher.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie als solche nicht eigens markiert sind.

Umschlaggestaltung: Sonja Frank, Berlin

Herstellung: pp030 – Produktionsbüro Heike Praetor, Berlin

Satz: le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Printed in the Federal Republic of Germany.

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

ISSN 0170-4958

Print ISBN 978-3-433-03252-7

ePDF ISBN 978-3-433-61011-4

ePub ISBN 978-3-433-61012-1

oBook ISBN 978-3-433-61013-8

## Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

im Jahre 1976 erschien der erste Jahrgang des Mauerwerk-Kalenders im Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn Berlin – München – Düsseldorf im Format A6, mit dunkelblauem Pappereinband und auf sehr dünnem gelblichem Papier, bei dem die Rückseite durchschien. Dr. Peter Funk hatte den Verlag von der Notwendigkeit eines solchen Werkes überzeugt und übernahm für insgesamt 24 Jahrgänge die Schriftleitung. Die Resonanz der Fachöffentlichkeit gab ihm recht. Der Mauerwerksbau entwickelte sich gerade von der Beurteilung durch empirische Erkenntnisse zur wirklichkeitsnäheren Bewertung und ingenieurmäßigen Behandlung des Baustoffs. Neue Anwendungsgebiete und veränderte bauphysikalische Anforderungen erforderten ein Umdenken. Der Untertitel des Kalenders lautete zu Beginn „Taschenbuch für Mauerwerk, Wandbaustoffe, Schall-, Wärme- und Feuchtigkeitsschutz“ (ab 1994 kam noch der Brandschutz hinzu). Der Name Taschenbuch hielt sich im Untertitel bis zur Ausgabe 1999, obwohl die Lesbarkeit ab 1987 durch die Verdopplung der Größe des Buches eine deutliche Verbesserung erfuhr. Ab der Ausgabe 2000 übernahmen Dr. Peter Schubert und Prof. Hans-Jörg Irmschler die Herausgeberschaft, das Cover wechselte von anfangs dunkelblau mit weiß stilisiertem Mauerwerk zu wieder dunkelblau mit dem Löwen von der Prozessionsstraße des babylonischen Ishtar-Tempels aus glasierten Ziegeln, der heute im Pergamonmuseum bewundert werden kann.

Der Inhalt des Werkes wurde neu strukturiert und man schmiedete Pläne für die Zukunft. Im Jahre 2002 stieß ich als im Vergleich „jugendliche“ Verstärkung zu dem Redaktionsteam des Mauerwerk-Kalenders dazu und wir gestalteten als Herausgebertrio gemeinsam die Ausgaben 2003 bis 2006. Dann hielten die Mitherausgeber es für an der Zeit, den Mauerwerk-Kalender vertrauensvoll allein in meine Hände zu legen. Ich überlegte nicht lange und nahm diese Aufgabe gern an, war ich mir doch der Unterstützung durch Anke Eis sicher, die es mir in den Jahren seit 2006 bis heute ermöglicht hat, die alleinige Herausgeberschaft trotz meiner zahlreichen weiteren Verpflichtungen auszufüllen. Ein geändertes – aber nach wie vor dunkelblaues – Cover mit nunmehr jährlich neuen aktuellen Mauerwerksmotiven und Inhaltsschwerpunkten zeigte diese

Veränderung auch äußerlich an. Unveränderte Grundlagenbeiträge traten anteilmäßig hinter wechselnden aktuellen Fachbeiträgen zurück. Insgesamt 12 Mauerwerk-Kalender-Tage jeweils im März an der TU Dresden trugen die Fachinhalte des jeweiligen Jahrgangs in die Fachöffentlichkeit und brachten Anwender, Forscher, Hersteller, Verlag und Autoren zusammen. Bei aller Veränderung und hoffentlich Verbesserung über die ganzen Jahre: Der Mauerwerk-Kalender wurde unter der Schriftleitung von Dr. Peter Funk zum Standardwerk des Mauerwerksbaus, das ist er bis heute und wird es hoffentlich auch in Zukunft bleiben. Anzahl und Umfang der Fachbeiträge und des ganzen Kalenders schwankten über die Jahre, insgesamt ist die Reihe jedoch beachtlich und ein Zeugnis der Entwicklung im Mauerwerksbau über die letzten Jahre.

Seine Notwendigkeit ist klar bewiesen und insbesondere vor dem europäischen Hintergrund der Mauerwerksnormung und -entwicklung größer denn je. Nach 45 Jahrgängen Mauerwerk-Kalender insgesamt und 18 Mauerwerk-Kalendern unter meiner Mitwirkung wird es nun wieder einen Neubeginn geben. Neue Ideen unter Bewahrung der Historie werden dem Thema und den Inhalten des Kalenders gut tun. Ich persönlich möchte dem Werk weiterhin verbunden bleiben – gern als Autor, vielleicht auch als Berater – falls das einmal gefragt sein sollte –, aber nicht mehr mit dem Druck der alleinigen Verantwortlichkeit, denn auch ich habe für die Zukunft Pläne (mit und ohne Mauerwerk), für die ich mir nun mehr Zeit erhoffe.

Ich bedanke mich bei allen Autoren der zurückliegenden Jahre für die Mitwirkung, bei der Verlagsleitung, der Redaktion, dem Lektorat, der Herstellung und bei meinem Team für die unermüdliche Unterstützung, aber vor allem bei Ihnen – den Lesern, für Ihr Vertrauen. Ich wünsche mir, dass Sie dieses auch in Zukunft dem Mauerwerk-Kalender entgegenbringen. Der vorliegenden 45. Ausgabe des Jahrbuchs und seinen Beiträgen wünsche ich eine gute Aufnahme in der Fachwelt.

Es war mir eine Ehre, den Mauerwerk-Kalender 18 Jahre lang begleiten und gestalten zu dürfen.

Radebeul,  
im Dezember 2019

Wolfram Jäger  
ji@jaeger-ingenieure.de





---

## Inhaltsübersicht

### A Baustoffe • Bauprodukte

- I Eigenschaften und Eigenschaftswerte von Mauersteinen, Mauermörtel und Mauerwerk 3  
Michael Raupach, Dorothea Saenger und Bernd Winkels, Aachen
- II Neuentwicklungen im Mauerwerksbau mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (abZ) bzw. mit allgemeiner Bauartgenehmigung (aBG) 17  
Wolfram Jäger, Dresden und Roland Hirsch, Berlin
- III Ökologische Bilanzierungen für Lehmbaustoffe 39  
Horst Schroeder, Weimar und Manfred Lemke, Norden

### B Konstruktion • Bauausführung • Bauwerkserhaltung

- I Ermittlung der Tragfähigkeit von Dübeln in Mauerwerk durch Versuche am Bauwerk 65  
Jürgen Küenzlen, Künzelsau, Marc Klatecki, Kassel und Eckehard Scheller, Berlin
- II Mauerwerksverfestigungen 103  
Anton Pech und Peter Herzina, Wien
- III Ziegelgewölbe – Die lange Wanderung einer Konstruktionstechnik vom Mittelmeer nach Deutschland 141  
Dirk Bühler, Augsburg und Santiago Huerta, Madrid

### C Bemessung

- I Verstärkungsmethode für aussteifende Mauerwerkswände in Erdbebengebieten 167  
Axel Wertenbroch, Dortmund und Atilla Ötes, Karben

### D Bauphysik • Brandschutz

- I Schlagregenschutz von Außenwänden nach DIN 4108-3:2018 181  
Helmut Marquardt, Buxtehude

### E Normen • Zulassungen • Regelwerk

- I Geltende Technische Regeln für den Mauerwerksbau (Deutsche, Europäische und Internationale Normen) (Stand 15.06.2019) 197  
Carola Hauschild, Radebeul
- II Verzeichnis der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen/allgemeinen Bauartgenehmigungen für den Mauerwerksbau (Stand 15.06.2019) 217  
Wolfram Jäger, Dresden und Roland Hirsch, Berlin
- III Bauaufsichtliche Regelungen im Umbruch – Regelungen für den Mauerwerksbau 353  
Bettina Hemme, Berlin

Stichwortverzeichnis 365



**Inhaltsverzeichnis**

<b>Vorwort</b> .....					III
<b>Autoren</b> .....					XIII
<b>A Baustoffe - Bauprodukte</b>					
<b>I Eigenschaften und Eigenschaftswerte von Mauersteinen, Mauermörtel und Mauerwerk</b> .....					3
Michael Raupach, Dorothea Saenger und Bernd Winkels, Aachen					
1	Einleitung .....	3	5	Verbundeigenschaftswerte zwischen Mauerstein und Mauermörtel .....	7
2	Eigenschaftswerte von Mauersteinen ..	3	5.1	Allgemeines .....	7
2.1	Festigkeitseigenschaften .....	3	5.2	Haftscherfestigkeit .....	7
2.1.1	Druckfestigkeit in Steinhöhe .....	3	5.3	Haftzug- und Biegehaftzugfestigkeit .....	8
2.1.2	Druckfestigkeit in Steinlänge und -breite	3	6	Eigenschaftswerte von Mauerwerk .....	8
2.1.3	Zug- und Spaltzugfestigkeit .....	4	6.1	Allgemeines .....	8
2.2	Verformungseigenschaften .....	4	6.2	Festigkeitseigenschaften .....	10
2.2.1	Druck-Elastizitätsmodul .....	4	6.2.1	Druckfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen .....	10
2.2.2	Querdehnungsmodul, Querdehnzahl ..	5	6.2.2	Druckfestigkeit parallel zu den Lagerfugen .....	11
2.2.3	Zug-Elastizitätsmodul .....	5	6.2.3	Zugfestigkeit .....	11
2.3	Kapillare Wasseraufnahme .....	5	6.2.4	Biegezugfestigkeit .....	12
3	Eigenschaftswerte von Mauermörteln ..	6	6.2.5	Schubfestigkeit .....	13
3.1	Festigkeitseigenschaften .....	6	6.3	Verformungseigenschaften .....	14
3.1.1	Druckfestigkeit .....	6	6.3.1	Elastizitätsmodul .....	14
3.1.2	Zugfestigkeit .....	6	6.3.2	Feuchtedehnung, Kriechen, Wärmedehnung .....	15
3.2	Verformungseigenschaften .....	6	7	Literatur .....	15
3.2.1	Längsdehnungsmodul .....	6			
3.2.2	Querdehnungsmodul .....	6			
4	Eigenschaftswerte von Mauermörtel im Mauerwerk .....	6			
<b>II Neuentwicklungen im Mauerwerksbau mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (abZ) bzw. mit allgemeiner Bauartgenehmigung (aBG)</b> .....					17
Wolfram Jäger, Dresden und Roland Hirsch, Berlin					
0	Allgemeines .....	19	5	Geschosshohe Wandtafeln .....	30
0.1	Gesonderte Regelungen zu Schlitzen ..	19	6	Schalungsstein-Bauarten .....	31
0.1.1	Vertikalschlitze .....	19	7	Trockenmauerwerk .....	31
0.1.2	Horizontalschlitze .....	19	8	Mauerwerk mit PU-Kleber .....	31
1	Mauerwerk mit Normal- oder Leichtmauermörtel .....	19	9	Bewehrtes Mauerwerk .....	31
2	Mauerwerk mit Dünnbettmörtel .....	20	10	Ergänzungsbauteile .....	31
3	Mauerwerk mit Mittelbettmörtel .....	28	11	Literatur .....	37
4	Vorgefertigte Wandtafeln .....	28	12	Bildnachweis .....	38

<b>III</b>	<b>Ökologische Bilanzierungen für Lehmbaustoffe</b> .....	39		
	Horst Schroeder, Weimar und Manfred Lemke, Norden			
1	Einführung .....	39	3.2.1	Ziel und Untersuchungsrahmen .....
2	DIN-Normen für Lehmbaustoffe .....	39	3.2.1.1	Systembeschreibung .....
2.1	Historische Entwicklung .....	39	3.2.1.2	Verfahrensgrundlagen/Annahmen und Abschätzungen .....
2.2	Aktuelle Situation .....	40	3.2.2	Sachbilanz .....
2.3	Inhalte .....	41	3.2.2.1	Datenerhebung .....
2.3.1	DIN 18945 Lehmsteine .....	42	3.2.2.2	Ressourceneinsatz .....
2.3.2	DIN 18946 Lehmmauermörtel .....	45	3.2.3	Wirkungsabschätzung .....
2.3.3	DIN 18947 Lehmputzmörtel .....	46	3.2.3.1	Bewertung der Projektergebnisse .....
2.3.4	DIN 18948 Lehmplatten .....	47	3.2.3.2	Experimentelle Untersuchungen zur Wiederverwendbarkeit von Lehmputzmörtel .....
3	Dokumente zur ökologischen Bewertung von Lehmbaustoffen .....	48	4	Zusammenfassung und Ausblick .....
3.1	Rahmenbedingungen .....	48	5	Literatur .....
3.2	Normgerechtes Regelwerk für die Erstellung von Lehm-UPD .....	48		
<b>B</b>	<b>Konstruktion • Bauausführung • Bauwerkserhaltung</b>			
<b>I</b>	<b>Ermittlung der Tragfähigkeit von Dübeln in Mauerwerk durch Versuche am Bauwerk</b> .....	65		
	Jürgen Küenzlen, Künzelsau, Marc Klatecki, Kassel und Eckehard Scheller, Berlin			
1	Einleitung .....	65	6	Ermittlung des thermischen Einflusses von Befestigungselementen .....
2	Ermittlung der Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln .....	66	6.1	Untersuchungsgegenstände .....
2.1	Bestimmung der Dübeltragfähigkeit auf der Baustelle .....	66	6.2	Ergebnisse .....
3	Regelungen für Versuche am Bauwerk für Kunststoffdübel mit ETA nach ETAG 020 bzw. TR 051 .....	66	6.2.1	Einfluss der Luftschichtausbildung .....
3.1	Voraussetzungen, Allgemeines und Handeln „im Rahmen der Zulassung“ ..	66	6.2.2	Einfluss der Setztiefe .....
3.2	Verantwortlichkeiten .....	68	6.2.3	Einfluss der Dämmstoffanordnung .....
3.2.1	Allgemeines .....	68	6.2.4	Bewertung der Ergebnisse .....
3.2.2	Fachplaner .....	68	7	Beispiel aus der Praxis .....
3.2.3	Versuchsleiter .....	68	7.1	Einleitung .....
3.2.4	Sachkundiges Personal .....	69	7.2	Durchführung und zugehörige Dokumentation der Versuche am Bauwerk .....
3.3	Prüfbericht nach TR 051 .....	69	7.2.1	Allgemeine Informationen zum Bauvorhaben .....
4	Ermittlung des Wärmedurchgangs- koeffizienten nach DIN EN ISO 6946 ..	70	7.2.2	Ort der Prüfungen .....
4.1	Bauteile mit inhomogenen Schichten ..	70	7.2.3	Prüfvorrichtung .....
4.2	Berücksichtigung von Luftschichten ..	70	7.2.4	Art der zu befestigenden Konstruktion ..
4.3	Berücksichtigung von punktuellen Wärmeverlusten über Befestigungs- elemente .....	70	7.2.5	Verankerungsgrund .....
5	Ermittlung von punktuellen Wärmeverlusten über Befestigungen .....	71	7.2.6	Name des Produkts .....
			7.2.7	Montage .....
			7.2.8	Versuchsergebnisse .....
			7.3	„Zwischenfazit“: Aufgabentrennung ..
			7.4	Auswertung der Versuchsergebnisse ..
			7.4.1	Grundlagen Zugversuche .....
			7.4.2	Querlastversuche .....
			7.4.3	Ermittlung der charakteristischen Tragfähigkeit über Fraktilwerte .....
			7.4.4	Ermittlung der charakteristischen Tragfähigkeit nach dem Vereinfachten Verfahren .....
			7.4.5	Berücksichtigung von Fugen .....
			7.4.6	Bemessungswert der Tragfähigkeit .....

7.5	Bemerkungen und Hinweise . . . . .	94	7.7.7	Nachweis Holz: Kopfdurchzug des Dübels durch die Vertikal-Lattung . .	97
7.6	Unterschriften . . . . .	94	7.7.8	Nachweis Holz: Kontrolle der Abstände	99
7.7	Bemessung der Verankerung (Befestigung der Unterkonstruktion) . .	94	7.7.9	Ermittlung der Dübelanzahl für eine Querwand . . . . .	99
7.7.1	Allgemeines . . . . .	94	7.7.10	Ergebnis/Fazit der Dübelbemessung . .	99
7.7.2	Ausgangsdaten . . . . .	95	7.7.11	Ergebnis bauphysikalische Überprüfung	99
7.7.3	Einwirkung aus Eigengewicht . . . . .	96	8	Fazit . . . . .	101
7.7.4	Einwirkung aus Windsog . . . . .	96	9	Literatur . . . . .	101
7.7.5	Resultierende Einwirkung . . . . .	97			
7.7.6	Nachweis Schrägzug . . . . .	97			
<b>II</b>	<b>Mauerwerksverfestigungen</b> . . . . .				<b>103</b>
	Anton Pech und Peter Herzina, Wien				
1	Vorbemerkungen . . . . .	103	4.4.1	Ausführungsüberprüfungen nach ÖNORM B 1996-3 . . . . .	122
2	Problemstellung Bauwerksuntersuchung	103	4.4.1.1	Ausführungsdokumentation . . . . .	124
2.1	Herausforderungen im Altbau . . . . .	103	4.4.1.2	Güte der Baustoffe . . . . .	124
2.2	Anforderungen der ÖNORM B 4008-1 .	104	4.4.1.3	Befundung und Prüfung der Mauerwerksdruckfestigkeit nach Kunstharzinjektionen . . . . .	126
3	Mauerwerk . . . . .	105	4.4.1.4	Befundung und Prüfung der Mauerwerksdruckfestigkeit nach Zementinjektionen . . . . .	128
3.1	Tragverhalten von Mauerwerk . . . . .	105	4.4.2	Qualitätssicherungsmaßnahmen nach ÖBV-Richtlinie Injektionstechnik Mauerwerk . . . . .	130
3.2	Zustandsuntersuchungen Bestands- mauerwerk . . . . .	106	4.4.2.1	Qualitätssicherung der Materialien . . . .	130
3.3	Vollziegelmauerwerk und Quader- mauerwerk . . . . .	112	4.4.2.2	Qualitätssicherung der Ausführung . . . .	131
3.4	Bruchsteinmauerwerk . . . . .	113	4.4.2.3	Dokumentation . . . . .	131
3.5	Festigkeitsvergleich unterschiedlicher Mauerwerksarten . . . . .	115	5	Rissanierung . . . . .	131
4	Verfestigungsmaßnahmen durch Injektionen . . . . .	116	6	Ausgewählte Ausführungsbeispiele . . . .	135
4.1	Verfestigung durch mineralische Suspensionen . . . . .	116	6.1	Mineralische Mauerwerksinjektion . . . .	135
4.2	Verfestigung durch organische Harze . .	119	6.2	Organische Mauerwerksinjektion . . . . .	137
4.3	Kombination von Zementsuspension und Harzinjektion . . . . .	122	6.3	Sanierung von Rissen . . . . .	137
4.4	Technische Überprüfung von Injektionsmaßnahmen . . . . .	122	7	Zusammenfassung . . . . .	139
			8	Literatur . . . . .	139
<b>III</b>	<b>Ziegelgewölbe – Die lange Wanderung einer Konstruktionstechnik vom Mittelmeer nach Deutschland</b> . . . . .				<b>141</b>
	Dirk Bühler, Augsburg und Santiago Huerta, Madrid				
1	Die Verbreitung von Ziegelgewölben . . .	141	4	Rafael Guastavino und die Wanderung der Flachziegelgewölbe nach Nord- amerika . . . . .	144
2	Die Anfänge des Ziegelgewölbes . . . . .	141	5	Flachziegelgewölbe in Europa in der Nachkriegszeit: Spanien, Italien, Frankreich und Deutschland . . . . .	145
2.1	Die ersten Gewölbe ohne Lehrgerüst . . .	141	5.1	Spanien . . . . .	146
2.2	In Schichten gebaute Gewölbe . . . . .	141	5.2	Frankreich . . . . .	146
2.3	Tonröhrengewölbe . . . . .	142	5.3	Deutschland . . . . .	147
2.4	Flachziegel in der römischen Baukunst .	142			
2.5	Mutmaßungen über den Ursprung der Ziegelgewölbe . . . . .	142			
3	Ziegelgewölbe im 16. bis 19. Jahrhundert	144			

6	Die Baugesellschaft Gebrüder Rank und die Einführung der Ziegelgewölbe in München ab 1947 . . . . .	149	6.5	Gewölbe für die Landeszentralbank in Zusammenarbeit mit Carl Sattler . . . . .	153
6.1	Die Baufirma Gebrüder Rank . . . . .	149	6.6	Von Rank ausgeführte Ziegelgewölbe in Bayern . . . . .	158
6.2	Die Baufirma Rank in Spanien . . . . .	150	7	Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	160
6.3	Max Rank und die Ziegelgewölbe in Spanien . . . . .	151	8	Literatur . . . . .	162
6.4	Erste Versuche mit Ziegelgewölben in Bayern . . . . .	153			

**C Bemessung**

<b>I</b>	<b>Verstärkungsmethode für aussteifende Mauerwerkswände in Erdbebengebieten . . . . .</b>	<b>167</b>			
	Axel Wertenbroch, Dortmund und Atilla Ötes, Karben				
1	Einführung . . . . .	167	3.2	Numerische Untersuchungen . . . . .	172
2	Konzept und Aufbau des Verstärkungssystems . . . . .	167	4	Wirkungsweise des Verstärkungssystems	172
3	Untersuchungen zum Tragverhalten des Verstärkungssystems . . . . .	168	5	Wirksamkeit der Verstärkungsmaßnahme . . . . .	175
3.1	Experimentelle Untersuchungen . . . . .	168	6	Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	176
3.1.1	Tragverhalten der Verstärkungselemente	168	7	Literatur . . . . .	177
3.1.2	Tragverhalten der Verbindungen . . . . .	169			
3.1.3	Wandversuche . . . . .	170			

**D Bauphysik - Brandschutz**

<b>I</b>	<b>Schlagregenschutz von Außenwänden nach DIN 4108-3:2018 . . . . .</b>	<b>181</b>			
	Helmut Marquardt, Buxtehude				
1	Schlagregenbeanspruchung . . . . .	181	5	Befeuchtung und Trocknung kapillarporöser Außenwände . . . . .	188
2	Beanspruchungsgruppen . . . . .	181	6	Genormte Bauarten von Außenwänden .	190
3	Mechanismen des Schlagregeneintritts . .	183	7	Zusammenfassung . . . . .	191
4	Schlagregenschutz kapillarporöser Außenwände . . . . .	186	8	Literatur . . . . .	192
4.1	Maßgebliche Eigenschaften . . . . .	186			
4.2	Wasseraufnahmekoeffizient $W_w$ . . . . .	186			
4.3	Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke $s_d$ . . . . .	186			

**E Normen - Zulassungen - Regelwerk**

<b>I</b>	<b>Geltende Technische Regeln für den Mauerwerksbau (Deutsche, Europäische und Internationale Normen) (Stand 15.06.2019) . . . . .</b>	<b>197</b>			
	Carola Hauschild, Radebeul				
1	Vorbemerkung . . . . .	197	3	Regelwerk . . . . .	199
2	EuGH-Urteil vom 16. Oktober 2014 (Rs. C-100/13) . . . . .	198			

<b>II</b>	<b>Verzeichnis der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen/allgemeinen Bauartgenehmigungen für den Mauerwerksbau (Stand 15.06.2019)</b> .....	217
	Wolfram Jäger, Dresden und Roland Hirsch, Berlin	
1	Mauerwerk mit Normal- oder Leichtmörtel .....	219
1.1	Mauerziegel .....	219
1.2	Verfüllziegel .....	231
1.3	Kalksandsteine .....	232
1.4	Betonsteine .....	234
1.4.1	Vollsteine und Vollblöcke .....	234
1.4.2	Hohlblocksteine .....	236
1.4.3	Hohlblocksteine mit integrierter Wärmedämmung .....	237
1.5	Sonstige Mauersteine .....	237
2	Mauerwerk mit Dünnbettmörtel .....	237
2.1	Plansteine üblichen Formates und dafür zugelassene Dünnbettmörtel .....	237
2.1.1	Planziegel .....	237
2.1.2	Planziegel mit integrierter Wärmedämmung .....	263
2.1.3	Planfüllziegel .....	275
2.1.4	Kalksand-Plansteine .....	279
2.1.5	Porenbeton-Plansteine .....	282
2.1.6	Beton-Plansteine .....	284
2.1.6.1	Planvollsteine und Planvollblöcke .....	284
2.1.6.2	Planhohlblocksteine .....	292
2.1.6.3	Plansteine aus Leichtbeton mit integrierter Wärmedämmung .....	297
2.2	Planelemente und dafür zugelassene Dünnbettmörtel .....	305
2.2.1	Planziegel-Elemente .....	305
2.2.2	Kalksand-Planelemente .....	305
2.2.3	Porenbeton-Planelemente .....	311
2.2.4	Beton-Planelemente .....	312
2.3	Wandbauart aus Panelementen in drittel- oder halbgoschosshoher Ausführung .....	314
2.4	Weitere Dünnbettmörtel .....	315
3	Mauerwerk mit Mittelbettmörtel .....	316
4	Vorgefertigte Wandtafeln .....	317
4.1	Geschosshohe Mauertafeln .....	317
5	Geschosshohe Wandtafeln .....	322
6	Schalungsstein-Bauarten .....	323
7	Trockenmauerwerk .....	324
8	Mauerwerk mit PU-Kleber .....	325
8.1	Planziegel .....	325
8.2	Planverfüllziegel .....	328
8.3	Porenbeton-Plansteine .....	329
8.4	Vorgefertigte Wandtafeln .....	330
9	Bewehrtes Mauerwerk .....	331
9.1	Bewehrung für bewehrtes Mauerwerk ..	331
9.2	Hochlochziegel für bewehrtes Mauerwerk .....	331
9.3	Stürze .....	331
10	Ergänzungsbauteile .....	333
10.1	Mauerfuß-Dämmelemente .....	333
10.2	Anker zur Verbindung der Mauerwerksschalen von zweischaligen Außenwänden .....	333
10.3	Sonstige Ergänzungselemente .....	335
11	Anhang .....	336
11.1	Zulassungsübersicht .....	336
<b>III</b>	<b>Bauaufsichtliche Regelungen im Umbruch – Regelungen für den Mauerwerksbau</b> .....	353
	Bettina Hemme, Berlin	
1	Einleitung .....	353
2	Aktuelle Rechtsgrundlagen .....	353
2.1	Musterbauordnung/Bauordnungen der Länder .....	353
2.2	Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) .....	354
2.3	Bauproduktenverordnung (EU-BauPVO) .....	354
3	Nachweise für die Verwendung und Anwendung .....	355
3.1	Regelungen für die Verwendung von Bauprodukten .....	355
3.2	Regelungen für die Verwendung von Bauprodukten bei unvollständigen Europäischen Normen .....	355
3.3	Regelungen für die Anwendung von Bauarten .....	356
3.4	Übersicht und Systematik der erforderlichen Nachweise .....	356
4	Übersicht über die bauaufsichtlichen Regelungen für Produkte des Mauerwerksbaus .....	356
4.1	MVV TB Kapitel A 1 Mechanische Festigkeit und Standsicherheit .....	356
4.2	MVV TB Kapitel A 2 Brandschutz .....	356
4.3	MVV TB Kapitel A 3 Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz .....	356
4.4	MVV TB Abschnitt A 5 Schallschutz und A 6 Wärmeschutz .....	357
4.5	MVV TB Abschnitt C 2.2 Bauprodukte für den Mauerwerksbau .....	357
4.6	MVV TB Abschnitt D 2.2 .....	358

5	Europäische Produktregeln gemäß EU-BauPVO .....	358	6	Anwendung .....	359
5.1	Europäische Technische Spezifikationen	358	6.1	Mauerwerksprodukte nach harmonisierten europäischen Spezifikationen in Deutschland .....	359
5.2	Grundlagen der CE-Kennzeichnung .....	358	6.2	Mauerwerksprodukte nach nationalen Regeln .....	360
5.3	Inhalt eines EAD .....	358	7	Zusammenfassung .....	360
5.4	EAD für den Bereich des Mauerwerksbaus .....	359	8	Literatur .....	360
<b>Stichwortverzeichnis</b> .....					365

## Autoren

Neben der Nennung von Titulatur und Anschrift wird auf den jeweiligen Beitrag des Autors in diesem Mauerwerk-Kalender in Klammern verwiesen (Rubrik und Ordnungsnummer des Beitrags).

**Bühler**, Dirk, Dr.-Ing., Deutsches Museum, Museumsinsel 1, 80538 München (**B III**).

**Hauschild**, Carola, Dipl.-Ing., Jäger Ingenieure GmbH, Wichernstraße 12, 01445 Radebeul (**E I**).

**Hemme**, Bettina, Dipl.-Ing., Deutsches Institut für Bautechnik, Kolonnenstraße 30B, 10829 Berlin (**E III**).

**Herzina**, Peter, Dipl.-Ing. (FH), Ingenieurkonsulent für Bauwesen und Baumanagement, gerichtlich beeideter und zertifizierter Sachverständiger, Dr. Pech Ziviltechniker GmbH, Johann-Strauß-Gasse 32, A 1040 Wien (**B II**).

**Hirsch**, Roland, Dr.-Ing., Deutsches Institut für Bautechnik Berlin DIBt, Kolonnenstraße 30 B, 10829 Berlin (**A II, E II**).

**Jäger**, Wolfram, Prof. Dr.-Ing., Technische Universität Dresden, Fakultät Architektur, Lehrstuhl Tragwerksplanung, Zellescher Weg 17, 01069 Dresden sowie Jäger Ingenieure GmbH, Wichernstraße 12, 01445 Radebeul (**A II, E II**).

**Herzina**, Peter, Dipl.-Ing. (FH), Ingenieurkonsulent für Bauwesen und Baumanagement, gerichtlich beeideter und zertifizierter Sachverständiger, Dr. Pech Ziviltechniker GmbH, Ziviltechnikergesellschaft für Bauingenieurwesen, Johann-Strauß-Gasse 32/11, A 1040 Wien (**B II**).

**Huerta**, Santiago, Fernández, Prof., Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Avda. Juan de Herrera 4, 28040 Madrid, Spanien (**B III**).

**Klatecki**, Marc, Dipl.-Ing., Ingenieurbüro Prof. Dr. Hauser GmbH, Leipziger Straße 184, 34123 Kassel (**B I**).

**Küenzlen**, Jürgen, Dr.-Ing., Adolf-Würth-GmbH & Co. KG, Reinhold-Würth-Straße 12–17, 74653 Künzelsau (**B I**).

**Lenke**, Manfred, Dipl.-Ök., Dachverband Lehm e. V., Friedrich-Naumann-Straße 16, 99423 Weimar (**A III**).

**Marquardt**, Helmut, Prof. Dr.-Ing., Institut für Weiterbildung & Bauprüfung (IWB) e. V. an der Hochschule 21, Harburger Straße 6, 21614 Buxtehude (**D I**).

**Ötes**, Atilla, Prof. Dr.-Ing., Technische Universität Dortmund, Höfer Weg 28A, 61184 Karben (**C I**).

**Pech**, Anton, FH-Hon.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn., Ingenieurkonsulent für Bauwesen, gerichtlich beeideter und zertifizierter Sachverständiger, Dr. Pech Ziviltechniker GmbH, Ziviltechnikergesellschaft für Bauingenieurwesen, Johann-Strauß-Gasse 32/11, A 1040 Wien (**B II**).

**Raupach**, Michael, Prof. Dr. Ing., Lehrstuhl Baustoffkunde – Bauwerkserhaltung, RWTH Aachen University, Schinkelstraße 3, 52062 Aachen (**A I**).

**Saenger**, Dorothea, Dipl.-Ing., RWTH Aachen University, Institut für Baustoffforschung (ibac), Schinkelstraße 3, 52062 Aachen (**A I**).

**Scheller**, Eckehard, Dipl.-Ing. (FH), Deutsche Gesellschaft für Mauerwerks- und Wohnungsbau e. V., Kochstraße 6–7, 10969 Berlin (**B I**).

**Schroeder**, Horst, Dr.-Ing., Dachverband Lehm e. V., Friedrich-Naumann-Straße 16, 99423 Weimar (**A III**).

**Wertenbroch**, Axel, Dr.-Ing., Technische Universität Dortmund, Lehrstuhl Tragkonstruktionen, August-Schmidt-Straße 8, 44227 Dortmund (**C I**).

**Winkels**, Bernd, Dipl.-Ing., RWTH Aachen University, Institut für Baustoffforschung (ibac), Schinkelstraße 3, 52062 Aachen (**A I**).



## **A Baustoffe ■ Bauprodukte**

- I Eigenschaften und Eigenschaftswerte von Mauersteinen,  
Mauermörtel und Mauerwerk 3  
Michael Raupach, Dorothea Saenger und Bernd Winkels, Aachen
- II Neuentwicklungen im Mauerwerksbau  
mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (abZ)  
bzw. mit allgemeiner Bauartgenehmigung (aBG) 17  
Wolfram Jäger, Dresden und Roland Hirsch, Berlin
- III Ökologische Bilanzierungen für Lehmbaustoffe 39  
Horst Schroeder, Weimar und Manfred Lemke, Norden



# 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<sup>†</sup> initiiert und ab dem Jahr 1989 als Dauerbeitrag unter seinem Namen veröffentlicht. Ab dem Jahr 2013 wurde der Beitrag durch Prof. Wolfgang Brameshuber weitergeführt. Für diese Ausgabe wurde er neu aufbereitet und wird zukünftig fortgeschrieben.

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 Institut für Baustoffforschung (ibac) der RWTH Aachen University 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. Durch die Lochung bei Lochsteinen (Lochanteil, Form der Lochung, Lochanordnung etc.) resultiert eine weitaus kleinere Druckfestigkeit. 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 Sekan-

**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 $\geq 4$	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 $\geq 4$	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]

tenmodul bei einem Drittel der Höchstspannung unter 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 können nach [1] folgende Beziehungen gewählt werden, wobei der Wert in Klammern das Bestimmtheitsmaß der gewählten Regression angibt:

Kalksandsteine (Prismen; 12 Einzelwerte):

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

Porenbetonsteine (Zylinder; 18 Mittelwerte):

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

## 2.2.2 Querdehnungsmodul, Querdehnzahl

Beim Querdehnungsmodul von Mauersteinen unter einer Druckbeanspruchung in 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 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]. Für verschiedene Mauersteine sind in Tabelle 2 ebenfalls Wertebereiche für die Querdehnzahl aufgeführt, vgl. auch [3].

Neben dem E-Modul spielt auch die Querdehnzahl  $\mu$  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.

**Tabelle 2.** Mauersteine; Querdehnungsmodul  $E_{q,i}$  in  $10^3$  N/mm<sup>2</sup>, Querdehnzahl  $\mu$  (aus [1] und [3])

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

Kalksandsteine (Prismen; 13 Mittelwerte)

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

Leichtbetonsteine (Prismen; 35 Einzelwerte)

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

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)

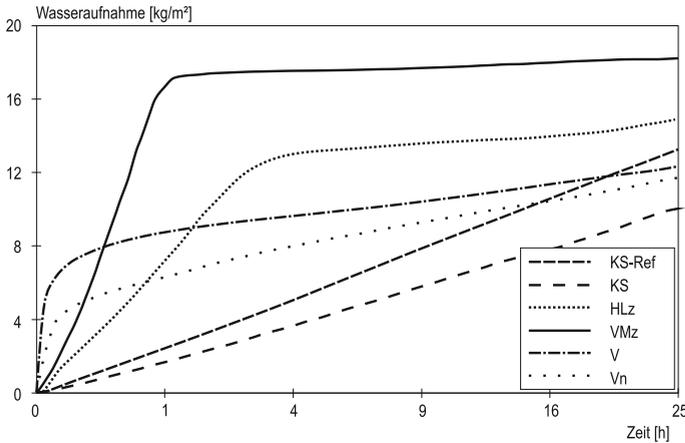
## 2.3 Kapillare Wasseraufnahme

Die Wasseraufnahmefähigkeit von Mauersteinen kann durch die kapillare Wasseraufnahme bzw. den Wasseraufnahmekoeffizienten  $\omega$  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 Wasseraufnahmekoeffizienten  $\omega$  – vor dem Vermörteln nicht vorgegärt, 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  $\omega$  in  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$  gekennzeichnet.

Tabelle 3 enthält  $\omega$ -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



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

**Tabelle 3.** Mauersteine; Wasseraufnahmekoeffizient  $\omega$  (aus [4])

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

in kürzester Zeit Wasser aufnehmen, während Kalksandsteine über einen langen Zeitraum kontinuierlich saugen.

### 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  $\beta_D$  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 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

**Tabelle 4.** Mauermörtel; Trockenrohdichte  $\rho_d$ , Druckfestigkeit  $\beta_D$  und Querdehnungsmodul  $E_q$  (aus [1])

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

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].

In Bild 2 ist die auf die Prismen-Druckfestigkeit  $\beta_D$  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), Methylhydroxypropylcellulose (MPHC) und Methylcellulose (MC).

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.

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 Verbundeigenschaftswerte zwischen Mauerstein und Mauermörtel

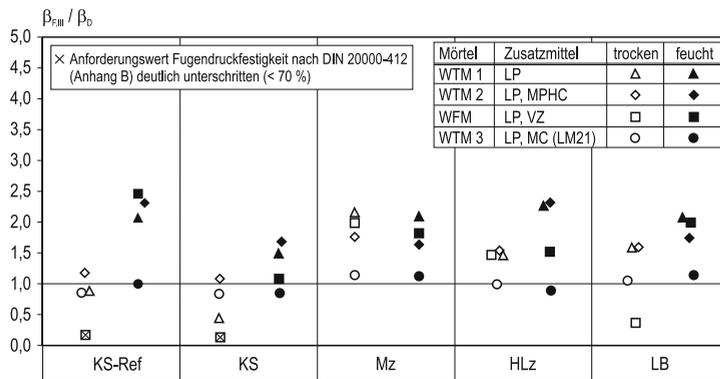
### 5.1 Allgemeines

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.

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 gleichzei-



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

tiger 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, 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 5 angegebenen 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 und unabhängig von 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.

### 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.

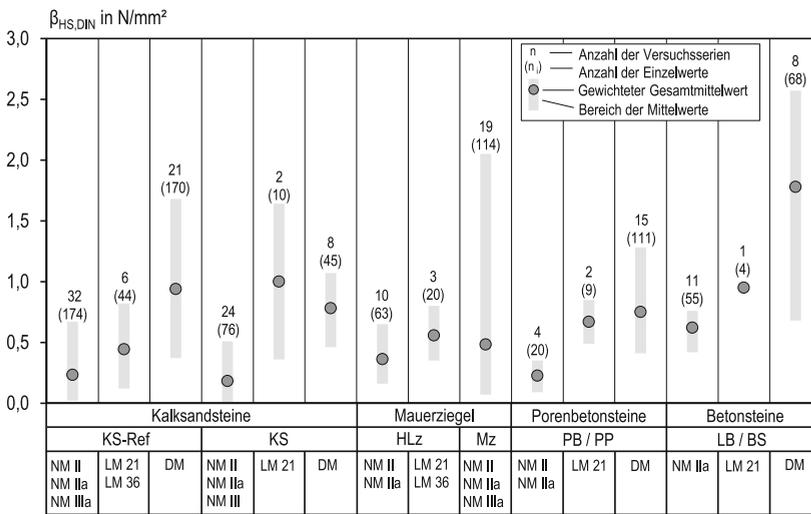
Diese Kennwerte sind u. a. für die Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen von Relevanz.

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

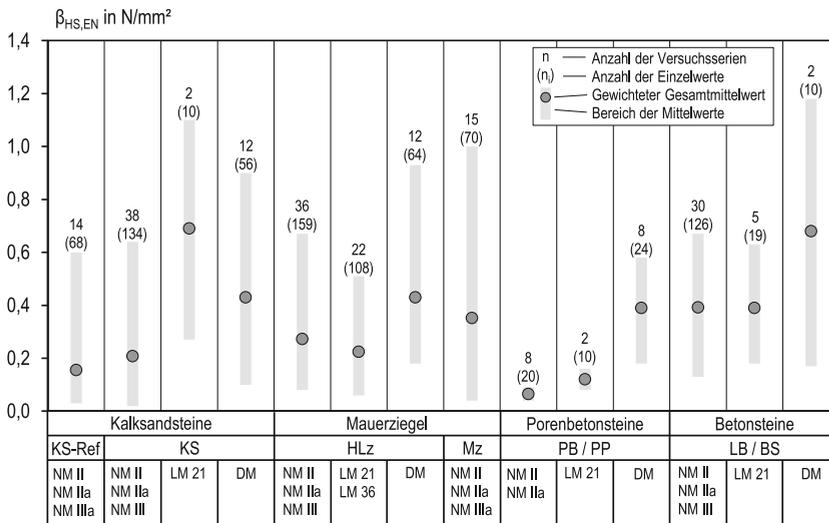
## 6 Eigenschaftswerte von Mauerwerk

### 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



**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  $\beta_{HS}$  in N/mm<sup>2</sup> nach [7]

Mauerstein	Mauermörtel				Werte für $f_{vk0}$ nach DIN EN 1996-1-1/NA [17]				
	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	–		–			

**Tabelle 6.** Stein/Mörtel; Haftzugfestigkeit  $\beta_{HZ}$ ; Prüfalter im Allgemeinen mind. 14 d (aus [1])

Mauerstein		Mauermörtel	Prüfverfahren <sup>1)</sup>	$\bar{x}$	min x	max x	n ( $n_i$ )
Art	Feuchtezustand <sup>2)</sup>			N/mm <sup>2</sup>			
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	0,26	0,36	5 <sup>4)</sup>
PP	I, f	DM	Z	0,37	0,25	0,50	14

1) Z: zentrisch; BW: Bondwrench

2) I, f: lufttrocken, feucht

3) Keine Angabe von Einzelwerten

4) Prüfalter unter 14 d

n: Anzahl der Versuchsserien

(n<sub>i</sub>): Anzahl der Einzelwerte $\bar{x}$ , min x, max x: Mittelwert, Kleinstwert, Größtwert

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.

Für viele Mauerstein-Mauermörtel-Kombinationen liegen zahlreiche Versuchsergebnisse von Mauerwerkdruckversuchen vor, aus denen folgende empirische Beziehung zur Ermittlung eines charakteristischen Wertes  $f_k$  der Mauerwerkdruckfestigkeit, bezogen auf eine Schlankheit  $\lambda = 5$ , abgeleitet wurde:

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

mit

$f_k$  charakteristische Druckfestigkeit von Mauerwerk in N/mm<sup>2</sup>

$K, \alpha, \beta$  Faktor und Exponenten, ermittelt über Regressionen ( $\beta = 0$  für LM und DM)

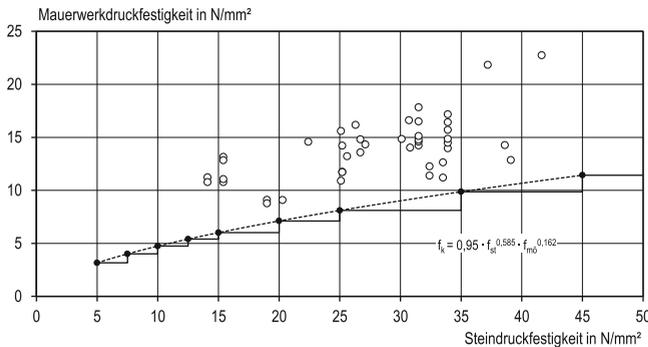
$f_{st}$  umgerechnete mittlere Mindeststeindruckfestigkeit in N/mm<sup>2</sup>

$f_m$  die der Mörtelklasse zugeordnete Festigkeit des Mauermörtels in N/mm<sup>2</sup>

Werte für die Parameter  $K, \alpha$  und  $\beta$  sowie  $f_{st}$  und  $f_m$  sind DIN EN 1996-1-1/NA [17] zu entnehmen.

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 Mauerwerkände



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

$\lambda = 5$  umgerechneten Versuchswerte der Mauerwerkdruckfestigkeit  $\beta_{D,mw}$  in Abhängigkeit der geprüften Steindruckfestigkeit  $\beta_{D,st}$  einschließlich Formfaktor. Zusätzlich enthält das Diagramm die gemäß 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 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 DIN EN 1996-1-1/NA [17] mit derselben 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 Längsdruckfestig-

keit 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 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 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 angegeben (aus [1] bzw. [11]). 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

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

Mauerstein			Mauermörtel		SF	$f_t$
Art, Sorte	Format	Festigkeitsklasse	Art	Gruppe		
Mz	NF	28	NM	Ila	vm	0,45 (1)
KMz	NF	60	NM	IIla	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 (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	Ila	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	Ila	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

des Mörtelschwindens und einer oftmals mangelhaften Ausführung vernachlässigbar klein ist.

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

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

Bei Fugenversagen müssen die im Bereich einer Steinlage und Mörtelfuge auftretenden Zugspannungen parallel zu den Lagerfugen über Schubspannungen in der Lagerfuge auf der Überbindelänge ( $l_{ol}$ ) 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
- $f_{t,u}$  Zugfestigkeit des Steins in Längsrichtung
- $f_{v0}$  Haftscherfestigkeit
- $\mu$  Reibungsbeiwert
- $\sigma_d$  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 Verblendscha-

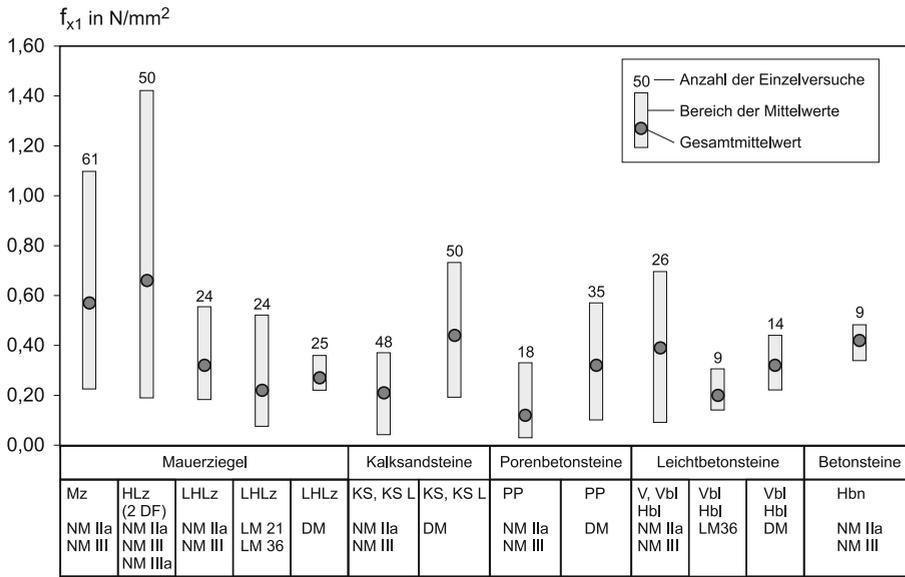


Bild 6. Bandbreite der Biegezugfestigkeitswerte senkrecht zur Lagerfuge (aus [13])

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

Die Überschreitung der Biegezugfestigkeit einer Mauerwerk wand 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 normge-

mäß 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 Mauerwerkswände 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  $f_{vt}$  der charakteristischen Schubfestigkeit. Analog zur rechnerischen Ermittlung der Biegezugfestigkeit besteht auch bei der Berechnung des Grenzwerts  $f_{vt}$  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 Elastizitätsmodul

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

**Tabelle 8.** Mauerwerk; Elastizitätsmodul 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 %)