

2017

# MAUERWERK KALENDER



Befestigungen  
Lehmmauerwerk



2017

# MAUERWERK KALENDER

---

**Befestigungen  
Lehmmauerwerk**

---

**Herausgegeben von  
Wolfram Jäger, Dresden**

**42. 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: Brick-topia  
Architekten: Map13 Barcelona ([www.map13bcn.com](http://www.map13bcn.com))  
Foto: Map13 Barcelona

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.

© 2017

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: Dörr + Schiller GmbH, Stuttgart  
Druck und Bindung:

Printed in the Federal Republic of Germany.  
Gedruckt auf säurefreiem Papier.

ISSN 0170-4958

Print ISBN 978-3-433-03161-2  
ePDF ISBN 978-3-433-60757-2  
ePub ISBN 978-3-433-60759-6  
eMobi ISBN 978-3-433-60758-9  
oBook ISBN 978-3-433-60756-5

## Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

bei dem vor Ihnen liegenden Mauerwerk-Kalender 2017 haben wir uns für zwei Schwerpunktthemen entschieden: Breiter Raum wurde der Problematik Befestigungen eingeräumt. Es gilt einiges zu beachten, um die Bemessung für die verschiedenen Mauerwerksbaustoffe sicher durchführen zu können. Insbesondere für neu entwickelte Produkte wie dämmstoffgefüllte Hohllochsteine muss der Planer genau Bescheid wissen und sich stets auf dem aktuellen Stand der Technik und des Wissens halten. Lehm als leistungs- und zukunftsfähigen umweltschonenden Baustoff aus der alternativen Nische herauszuholen, wo er längst nicht mehr hingehört, auch dazu will der Mauerwerk-Kalender 2017 einen Beitrag leisten. Viele weitere interessante Themen lohnen das Lesen der aktuellen Ausgabe des Jahrbuchs.

– Im Bereich *Baustoffe · Bauprodukte* finden Sie komprimiert die Eigenschaftswerte von Mauersteinen, Mauermörtel, Mauerwerk und Putzen mit Angabe der zugrunde liegenden Quellen, sodass bei Bedarf auch tiefer in die Materie eingestiegen werden kann, indem die Ermittlung anhand der originalen Versuche und Literatur nachvollzogen wird. Der Beitrag über den Mauerwerksbau mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung stellt die im letzten Jahr neu erteilten Zulassungen des Fachgebietes vor.

– Die Abteilung *Konstruktion · Bauausführung · Bauwerkserhaltung* beginnt mit einer ausführlichen Schilderung der bauphysikalischen und befestigungstechnischen Anforderungen bei der Montage von Fenstern und Türen. Dieser Beitrag wurde im Verlauf der letzten Jahre von den Autoren in Abständen immer wieder für den Mauerwerk-Kalender aktualisiert und erweitert, sodass nun eine tatsächlich umfassende Darstellung des Themas entstanden ist. Den Part Bauwerkserhaltung und Sanierung bedient ein Aufsatz über den Dom St. Marien in Zwickau. Der Dombaumeister berichtet über frühere und aktuelle Schäden, deren Ursachen und den Stand der Bauhaltung, der Sanierungsplanungen und -maßnahmen. In einer der kommenden Ausgaben des Mauerwerk-Kalenders wird über den weiteren Fortgang der Sanierung berichtet werden. Die Leistungsfähigkeit von Lehm-mauerwerk wird in drei weiteren Beiträgen gezeigt und berücksichtigt dabei sowohl die Bemessung nach neuesten Erkenntnissen, wobei hier der künftige Forschungsbedarf spezifiziert wird, als auch die zu beachtenden Besonderheiten bei Konstruktion und Ausführung.

– Das Kapitel *Bemessung* zeigt das Verhalten von Mauerwerk unter hochdynamischen Einwirkungen.

Die theoretischen Materialmodellierungen werden am Ende mit einem Anwendungsbeispiel unterlegt. Aktuelle Forschungsergebnisse mit Berechnungshinweisen für Befestigungen in Hohllochmauerwerk ergänzen den Beitrag B I. Der Nachweis von gemauerten Gewölbebrücken im Bestand stellt Planer immer wieder vor Herausforderungen – wie damit umgehen, wenn Unterlagen und Kennwerte fehlen? Es müssen dann durch intelligente Schlussfolgerungen unter Berücksichtigung einer ausreichenden Sicherheit Annahmen für den Nachweis getroffen und notwendige Bauwerksuntersuchungen angeordnet werden. Die „Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand“ des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung soll dem Planer Hilfestellung für die nötigen Nachweise geben. Im Rahmen der laufenden Überarbeitung der Nachrechnungsrichtlinie haben sich die Autoren mit dem Thema beschäftigt und informieren darüber. Aktuelle Forschungsergebnisse aus der deutschen und europäischen Normungsarbeit werden aus dem Bereich Knicken und Nachweis der Mindestauflast vorgestellt.

– Die Rubrik *Bauphysik · Brandschutz* widmet sich dem Schallschutz im Mauerwerksbau von der praktischen Seite her und geht auf zweckmäßige Festlegungen der Schallschutzanforderungen und die Konsequenzen für den Planer ein.

– Auch der 42. Jahrgang des Mauerwerk-Kalenders bietet im Bereich *Normen · Zulassungen · Regelwerk* wie gewohnt einen Überblick über die aktuell geltenden Technischen Regeln für den Mauerwerksbau sowie Zugriff auf sämtliche zulassungsbedürftige Neuentwicklungen des Fachgebietes in den bekannten tabellari-schen Übersichten, gegliedert nach dem Einsatzgebiet der jeweiligen Produkte. Dem Verzeichnis folgt eine Liste, geordnet nach Zulassungsnummern und mit Verweisen auf die entsprechenden Seiten dieses Beitrags sowie auf die des Beitrags A II „Neuentwicklungen beim Mauerwerksbau mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung“ aus dem Kapitel *Baustoffe · Bauprodukte*. Die Informationen zum Eurocode 6 werden im Abschluss dieser Rubrik mit Darlegungen zur Ausführung nach Teil 2 des EC6 ergänzt.

– Der Bereich *Forschung* bietet wie immer den jährlichen Überblick über die aktuelle Forschungssituation im Mauerwerksbau.

Allen Beteiligten sei für die Mitwirkung an der aktuellen Ausgabe des Mauerwerk-Kalenders gedankt. Ich wünsche den Leserinnen und Lesern gute Lektüre und freue mich wie immer über Ihre Anregungen, die wir gern aufgreifen wollen.

Dresden,  
im Februar 2017

Wolfram Jäger  
jj@jaeger-ingenieure.de



## Inhaltsübersicht

### A Baustoffe - Bauprodukte

- I Eigenschaften von Mauersteinen, Mauermörtel, Mauerwerk und Putzen 3  
Wolfgang Brameshuber, Aachen
- II Neuentwicklungen beim Mauerwerksbau mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (abZ) 31  
Wolfram Jäger, Dresden und Roland Hirsch, Berlin

### B Konstruktion - Bauausführung - Bauwerkserhaltung

- I Bauphysikalische und befestigungstechnische Anforderungen an die Montage von Fenstern und Türen 65  
Jürgen Künzlen, Künzelsau; Marc Klatecki, Kassel; Eckehard Scheller, Künzelsau und Rainer Becker, Dortmund
- II Ev.-Luth. Hauptpfarrkirche Zwickaus – seit 1935 Dom St. Marien Zwickau – Stand der Bauerhaltung von Kirchenschiff und Chorraum 161  
Michael Kühn, Zwickau
- III Versuchsgestützte Kalibrierung von Teilsicherheitsbeiwerten im Lehmmauerwerksbau – Empfehlungen für die Erarbeitung eines Bemessungskonzepts 181  
Philipp Müller, Singapur; Patrick Fontana, Lorenzo Miccoli und Christof Ziegert, Berlin
- IV Modellierung des mechanischen Verhaltens von Lehmsteinmauerwerk unter statischer Druck- und Schubbeanspruchung 195  
Lorenzo Miccoli, Berlin; Angelo Garofano, Lausanne, Schweiz; Patrick Fontana, Berlin und Urs Müller, Borås, Schweden
- V Lehmmauerwerk – Entwurfs- und Konstruktionsprinzipien für den Wohnbau 209  
Dipl.-Ing. Raik Hartmann

### C Bemessung

- I Mauerwerk unter (hoch-)dynamischen Einwirkungen  
Theoretische, numerische und experimentelle Untersuchungen 245  
Tobias Linse und Norbert Gebbeken, München
- II Tragverhalten und Bemessung von Injektionsdübeln in Mauerwerk 297  
Jan Hofmann, Stuttgart und Georg Welz, Renningen
- III Nachrechnung gemauerter Bogenbrücken 327  
Gero Marzahn, Bonn; Eckard Bothe, Chemnitz und Wolfram Jäger, Dresden
- IV Knicken von Mauerwerk – Kritische Anmerkungen zum empirischen Verfahren und neuer Vorschlag für den EC 6 343  
Tammam Bakeer, Dresden und Poul Dupont Christiansen, Aarhus (Dänemark)
- V Zum Nachweis der Mindestauflast nach DIN EN 1996-3/NA 369  
Wolfram Jäger, Dresden

### D Bauphysik - Brandschutz

- I Praktischer Schallschutz mit Mauerwerk 409  
Elmar Sälzer, Wiesbaden

**E Normen - Zulassungen - Regelwerk**

- I Geltende Technische Regeln für den Mauerwerksbau (Deutsche, Europäische und Internationale Normen) (Stand 31.10.2016) 445  
Peter Rauh, Berlin und Carola Hauschild, Radebeul
- II Verzeichnis der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen für den Mauerwerksbau (Stand 31.7.2016) 463  
Wolfram Jäger, Dresden und Roland Hirsch, Berlin
- III Ausführung von Mauerwerk nach Eurocode 6 601  
Dieter Figge, Warburg

**F Forschung**

- I Übersicht über abgeschlossene und laufende Forschungsvorhaben im Mauerwerksbau 639  
Anke Eis, Dresden

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	III
<b>Autoren</b> .....	XIX
<b>A Baustoffe · Bauprodukte</b>	
<b>I Eigenschaften von Mauersteinen, Mauermörtel, Mauerwerk und Putzen</b> .....	3
Wolfgang Brameshuber, Aachen	
1 Allgemeines .....	3
2 Eigenschaftskennwerte von Mauersteinen .....	3
2.1 Festigkeitseigenschaften .....	3
2.1.1 Längsdruckfestigkeit .....	3
2.1.2 Zugfestigkeiten .....	4
2.2 Verformungseigenschaften .....	6
2.2.1 Elastizitätsmodul senkrecht zur Lagerfuge unter Druckbeanspruchung .....	6
2.2.2 Elastizitätsmodul in Steinlängsrichtung unter Zugbeanspruchung .....	6
2.2.3 Spannungs-Dehnungslinie .....	7
2.2.4 Querdehnungsmodul .....	7
2.3 Dehnung aus Schwinden und Quellen, thermische Ausdehnungskoeffizienten .....	7
3 Eigenschaftswerte von Mauermörteln .....	7
3.1 Allgemeines .....	7
3.2 Festigkeitseigenschaften .....	7
3.2.1 Zugfestigkeit $\beta_Z$ .....	7
3.2.2 Scherfestigkeit $\beta_S$ .....	7
3.3 Verformungseigenschaften .....	9
3.3.1 E-Modul (Längsdehnungsmodul) E .....	9
3.3.2 Querdehnungsmodul $E_q$ .....	9
3.3.3 Feuchtedehnung (Schwinden $\varepsilon_s$ ) .....	9
3.3.4 Kriechen (Kriechzahl $\varphi$ ) .....	9
4 Verbundeigenschaften zwischen Stein und Mörtel .....	9
4.1 Allgemeines .....	9
4.2 Haftscherfestigkeit .....	9
4.3 Haftzugfestigkeit .....	10
5 Eigenschaftswerte von Mauerwerk .....	13
5.1 Allgemeines .....	13
5.2 Druckfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen .....	13
5.2.1 Experimentelle Bestimmung .....	13
5.2.2 Rechnerische Bestimmung .....	13
5.3 Druckfestigkeit parallel zu den Lagerfugen .....	15
5.4 Zugfestigkeit und -tragfähigkeit .....	15
5.5 Biegezugfestigkeit und -tragfähigkeit .....	16
5.6 Verformungseigenschaften .....	20
5.6.1 Allgemeines .....	20
5.6.2 Druckbeanspruchung senkrecht zu den Lagerfugen .....	20
5.6.2.1 Druck-E-Modul $E_D$ .....	20
5.6.2.2 Querdehnungszahl $\mu_D$ und Dehnung bei Höchstspannung $\varepsilon_{u,D}$ .....	21
5.6.2.3 Völligkeitsgrad $\alpha_0$ .....	21
5.6.3 Druckbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen .....	21
5.6.3.1 Druck-E-Modul $E_{D,p}$ .....	21
5.6.3.2 Dehnung bei Höchstspannung $\varepsilon_{u,D,p}$ .....	21
5.6.4 Zug-E-Modul $E_Z$ (Zugbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen) .....	21
5.6.5 Feuchtedehnung $\varepsilon_f$ (Schwinden $\varepsilon_s$ , irreversibles Quellen $\varepsilon_q$ ), Kriechen (Kriechzahl $\varphi$ ), Wärmedehnungskoeffizient $\alpha_T$ .....	21
6 Feuchtigkeits Technische Kennwerte von Mauersteinen, Mauermörtel und Mauerwerk .....	23
6.1 Kapillare Wasseraufnahme .....	23
6.2 Wasserdampfdurchlässigkeit .....	23
7 Natursteine, Natursteinmauerwerk .....	24
8 Eigenschaftswerte von Putzen (Außenputz) .....	24
8.1 Allgemeines .....	24
8.2 Festigkeitseigenschaften .....	24
8.2.1 Druckfestigkeit $\beta_D$ .....	24
8.2.2 Zugfestigkeit $\beta_Z$ .....	24
8.3 Verformungseigenschaften .....	24
8.3.1 Zug-E-Modul $E_{Z_1}$ dynamischer E-Modul $\text{dyn E}$ .....	24
8.3.2 Zugbruchdehnung $\varepsilon_{Z,u}$ .....	24
8.3.3 Zugrelaxation $\psi$ .....	24
8.3.4 Schwinden $\varepsilon_s$ , Quellen $\varepsilon_q$ .....	26
8.4 Eigenschaftszusammenhänge .....	26
9 Literatur .....	26

<b>II</b>	<b>Neuentwicklungen beim Mauerwerksbau mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (abZ)</b> . . . . .	31			
	Wolfram Jäger, Dresden und Roland Hirsch, Berlin				
	Vorbemerkungen . . . . .	31	4	Vorgefertigte Wandtafeln . . . . .	51
0	Allgemeines . . . . .	33	5	Geschosshohe Wandtafeln . . . . .	56
0.1	Nachweis der Mindestauflast – Mauerwerk nach DIN 1053-1 . . . . .	33	6	Schalungsstein-Bauarten . . . . .	56
0.2	Wände mit teilweise aufliegender Decke – Mauerwerk nach DIN 1053-1 . . . . .	33	7	Trockenmauerwerk . . . . .	57
0.3	Sonderregelungen zur Knicklänge . . . . .	33	8	Mauerwerk mit PU-Kleber . . . . .	57
0.4	Gesonderte Regelungen zu Schlitzen . . . . .	34	9	Bewehrtes Mauerwerk . . . . .	57
1	Mauerwerk mit Normal- oder Leichtmörtel . . . . .	34	10	Ergänzungsbauteile . . . . .	57
2	Mauerwerk mit Dünnbettmörtel . . . . .	38	11	Literatur . . . . .	61
3	Mauerwerk mit Mittelbettmörtel . . . . .	51		Bildnachweis . . . . .	62
<b>B</b>	<b>Konstruktion • Bauausführung • Bauwerkserhaltung</b>				
<b>I</b>	<b>Bauphysikalische und befestigungstechnische Anforderungen an die Montage von Fenstern und Türen</b> . . . . .	65			
	Jürgen Küenzlen, Künzelsau; Marc Klatecki, Kassel; Eckehard Scheller, Künzelsau und Rainer Becker, Dortmund				
1	Einleitung . . . . .	65	5.2.2	Abdichtung von Schwellen- konstruktionen . . . . .	78
2	Bauphysikalische Anforderungen – Einführung . . . . .	66	5.2.3	Ausführung des Fensterbankanschlusses und der Fensterbank . . . . .	80
2.1	Grundsätzliches . . . . .	66	6	Praktische Umsetzung . . . . .	81
2.2	Einwirkungen auf Fenster und Fenstertüren . . . . .	66	6.1	Energetisch optimierter Fenstereinbau im Neubau . . . . .	81
2.3	Grundlagen der Anschlussausbildung . . . . .	67	6.2	Sicherstellung des Mindestwärme- schutzes im Altbau . . . . .	81
3	Bauphysikalische Anforderungen an Fenster und Fenstertüren . . . . .	67	6.3	Leitdetails für die Anschlussausbildung im Neubau . . . . .	84
3.1	Anforderungen an den Wärmeschutz . . . . .	67	6.4	Leitdetails für die Anschlussausbildung im Altbau . . . . .	84
3.2	Anforderungen an den Mindest- wärmeschutz . . . . .	69	7	Anforderungen an die mechanische Befestigung: Einführung – Definition „Fenster“ . . . . .	86
3.3	Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz . . . . .	70	8	Regelwerke . . . . .	86
3.4	Anforderungen an die Luftdichtheit . . . . .	71	8.1	Allgemeine Anforderungen an die Dübeltechnik . . . . .	86
3.5	Anforderungen an den Schlag- regenschutz . . . . .	71	8.2	Leitfaden zur Planung und Aus- führung der Montage von Fenstern und Haustüren . . . . .	87
3.6	Anforderungen an den Schallschutz . . . . .	73	8.2.1	Standardfall . . . . .	87
3.7	Anforderungen im Altbau . . . . .	75	8.2.2	Sonderfall 1 . . . . .	87
4	Berechnung wärmeschutztechnischer Kennwerte . . . . .	76	8.2.3	Sonderfall 2 . . . . .	87
5	Fugenausbildung . . . . .	76	8.2.4	Korrosionsschutz . . . . .	88
5.1	Allgemeines . . . . .	76			
5.2	Neubau . . . . .	77			
5.2.1	Kopplungsfugen . . . . .	78			

8.3	Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen	88	12.2	Statisches Modell	117
8.4	Normenreihe DIN 18008 „Glas im Bauwesen“	88	12.2.1	Lastweiterleitung aus dem Blendrahmen in den Fensterbefestiger	117
8.4.1	Allgemeines	88	12.2.2	Lastweiterleitung aus dem Fensterbefestiger in den Verankerungsgrund	118
8.4.2	DIN 18008, Teil 1 und Teil 2: Linienförmig gelagerte Verglasungen	88	12.2.3	Betrachtung der unterschiedlichen Versagensstellen	120
8.4.3	DIN 18008, Teil 4 – Regelungen für absturzsichernde Verglasungen	89	12.2.4	Verifizierung des statischen Modells der Quertragfähigkeit der Schraube im Verankerungsgrund anhand von Versuchen	121
8.5	Produktnorm DIN EN 14351-1:2010-08	89	13	Bemessung am Beispiel der AMO-Combi-Schraube	124
8.6	DIN 18055: Anforderungen und Empfehlungen an Fenster und Außentüren	90	13.1	Allgemeines	124
8.6.1	Allgemeines	90	13.2	Windlast	124
8.6.2	Merkmale, die ein Fenster erfüllen muss	91	13.3	Überlagerung horizontale Nutzlast plus Last aus 90° geöffnetem Fenster	124
8.7	ift-Richtlinie MO-02/1	94	13.3.1	Lösungsmöglichkeit 1	124
8.7.1	Allgemeines	94	13.3.2	Lösungsmöglichkeit 2	124
8.7.2	Anwendungsbereich	95	13.3.3	Lösungsmöglichkeit 3	126
8.7.3	Weitere Regelungen	95	13.3.4	Lösungsmöglichkeit 4	126
9	Einwirkungen auf ein Fenster	95	14	Befestigung von absturzsichernden Fensterelementen	126
10	Prüfung von Befestigern für Fenster am Gesamtsystem	96	14.1	Einführung	126
10.1	Widerstandsfähigkeit bei Windlast	99	14.2	Aus TRAV wurde DIN 18008, Teil 4 – Regelungen für absturzsichernde Verglasungen	127
10.1.1	Auswirkung der Windbelastungen bei einflügeligen Elementen	100	14.2.1	Allgemeines	127
10.1.2	Auswirkung der Windbelastungen bei einem zweiflügeligen Element	103	14.2.2	Kategorien nach DIN 18008-4	127
10.1.3	Auswirkung der Windbelastungen bei einem zweiflügeligen Element mit Profilverbreiterungen	105	14.2.3	Erforderliche Holmhöhe	128
10.2	Bedienkräfte nach DIN EN 13115	106	14.2.4	Nachweis der Tragfähigkeit von absturzsichernden Verglasungen	128
10.3	Mechanische Festigkeit nach DIN EN 13115	106	14.2.5	Nachweis der Tragfähigkeit für die unmittelbaren Glasbefestigungen	128
10.4	Dauerfunktion nach DIN EN 12400	108	14.2.6	„Nachweiskette“ von absturzsichernden Fensterelementen	129
10.4.1	Prüfung von Fenstern und Fenstertüren	109	14.3	ETB-Richtlinie – Bauteile, die gegen Absturz sichern	129
10.4.2	Prüfung von Haustüren	109	14.3.1	Allgemeines	129
10.5	Differenzklimaverhalten nach DIN EN 13420	109	14.3.2	Horizontale, statische Lasten	130
10.6	Stoßfestigkeit nach DIN EN 13049	111	14.3.3	Stoßartige Belastung	130
11	Abschätzung der Einwirkungen auf die Fensterbefestiger	111	14.4	Befestigung am Bauwerk	130
11.1	Rechenbeispiel – Allgemeines	111	14.5	Nachweisführung für die Befestigung	131
11.2	Lastermittlung	112	14.5.1	Allgemeines	131
11.3	Trag- und Distanzklötze	113	14.5.2	Nachweis der horizontalen, statischen Belastung	132
11.4	Einwirkung aus Windlast	114	14.5.3	Nachweis der stoßartigen Belastung	135
11.4.1	Allgemeines	114	14.6	Bemessungsbeispiel	136
11.4.2	Fortsetzung Beispiel	114	14.6.1	Allgemeine Hinweise	136
11.4.3	Einfluss der Achsabstände bei umlaufender oder rein seitlicher Befestigung	115	14.6.2	Ausgangsdaten	136
12	Konzept zur Ermittlung der Tragfähigkeit eines Fensterbefestigers	117	14.6.3	Nachweis Brüstungsverglasung	136
12.1	Allgemeines	117	14.6.4	Nachweis der unmittelbaren Glasbefestigung	137

14.6.5	Nachweis des Brüstungsriegels . . . . .	137	16	Montage von Fenstern mit Anforderungen an die Einbruchhemmung . . . . .	141
14.6.6	Nachweis Verbindung Brüstungsriegel an Fensterrahmen . . . . .	137	16.1	Allgemeines . . . . .	141
14.6.7	Nachweis Fensterrahmen . . . . .	137	16.2	Prüfungen und Verankerungsgründe . . . . .	142
14.6.8	Nachweis der Befestigung zwischen absturzsichernder Fensterelementbefestigung W-ABZ und Mauerwerk . . . . .	138	16.3	Durchgeführte Versuche . . . . .	143
			16.3.1	Versuche nach DIN V ENV 1627 bis 1630:1999-04 . . . . .	143
14.6.9	Nachweis der Fensterelementbefestigung . . . . .	139	16.3.2	Versuche nach DIN EN 1627 bis 1630 . . . . .	148
14.7	Mauerwerk mit geringer Tragfähigkeit . . . . .	139	16.4	Montagebescheinigung nach erfolgreichem Einbau einbruchhemmender Elemente . . . . .	155
15	Montage in der Dämmebene . . . . .	139	17	Fazit . . . . .	156
15.1	Allgemeines . . . . .	139	18	Literatur . . . . .	157
15.2	Bauphysikalische Betrachtung . . . . .	141			
15.3	Dübelauswahl . . . . .	141			
<b>II</b>	<b>Ev.-Luth. Hauptpfarrkirche Zwickau – seit 1935 Dom St. Marien Zwickau – Stand der Bauerhaltung von Kirchenschiff und Chorraum . . . . .</b>				<b>161</b>
	Michael Kühn, Zwickau				
1	Allgemeines . . . . .	161	6	Hydrologische und hydro-geologische Beeinflussung . . . . .	173
2	Bauwerks- und Bauschadensgeschichte der Kirche . . . . .	161	7	Geotechnischer Bericht . . . . .	175
3	Einfluss des untertägigen Steinkohleabbaus . . . . .	164	8	Statisch-konstruktive Belange . . . . .	175
4	Hauptbaustoff Kohlesandstein . . . . .	169	9	Sanierungsplanung für die Pfeiler 16/M1 und 26/M2 . . . . .	176
5	Markscheiderische Messungen und geologisches Modell . . . . .	171	10	Literatur . . . . .	178
<b>III</b>	<b>Versuchsgestützte Kalibrierung von Teilsicherheitsbeiwerten im Lehmmauerwerksbau – Empfehlungen für die Erarbeitung eines Bemessungskonzepts . . . . .</b>				<b>181</b>
	Philipp Müller, Singapur; Patrick Fontana, Lorenzo Miccoli und Christof Ziegert, Berlin				
1	Einführung . . . . .	181	2.3.1	Steine und Mörtel . . . . .	186
			2.3.2	Mauerwerk . . . . .	187
2	Druckversuche an Komponenten und Mauerwerk . . . . .	183	3	Diskussion und Empfehlungen . . . . .	189
2.1	Material und Prüfkörperherstellung . . . . .	183	3.1	Teilsicherheitsbeiwert auf Materialseite . . . . .	189
2.1.1	Steine und Mörtel . . . . .	183	3.2	Rechnerische Bestimmung der Mauerwerksdruckfestigkeit . . . . .	190
2.1.2	Mauerwerk . . . . .	184	3.3	Prüfverfahren und Normung . . . . .	191
2.2	Versuchsaufbau und -durchführung . . . . .	185	4	Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	192
2.2.1	Steine und Mörtel . . . . .	185	5	Literatur . . . . .	193
2.2.2	Mauerwerk . . . . .	185			
2.3	Ergebnisse und Auswertung . . . . .	186			

<b>IV</b>	<b>Modellierung des mechanischen Verhaltens von Lehmsteinmauerwerk unter statischer Druck- und Schubbeanspruchung</b> .....	195		
	Lorenzo Miccoli, Berlin; Angelo Garofano, Lausanne, Schweiz; Patrick Fontana, Berlin und Urs Müller, Borås, Schweden			
1	Einleitung .....	195	3.2.1.	Allgemeine Annahmen .....
2	Versuchsprogramm .....	196	3.2.2.	Einaxialer Druckversuch .....
2.1	Ausgangsstoffe und Herstellung der Prüfkörper .....	196	3.2.3.	Schubversuch .....
2.2	Anfangsscherfestigkeit .....	197	3.3	Mikro-Modellierungsansatz .....
2.3	Druckversuche am Lehmsteinmauerwerk .....	197	3.3.1.	Allgemeine Annahmen .....
2.4	Schubversuche am Lehmsteinmauerwerk .....	198	3.3.2.	Einaxialer Druckversuch .....
3	Numerische Modellierung .....	199	3.3.3.	Schubversuch .....
3.1	Modellierungsansatz und Ziele .....	199		Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....
3.2	Makro-Modellierungsansatz .....	200		Danksagung .....
				Literatur .....
<b>V</b>	<b>Lehmmauerwerk – Entwurfs- und Konstruktionsprinzipien für den Wohnbau</b> .....	209		
	Dipl.-Ing. Raik Hartmann			
1	Einleitung .....	209	3.2	Prinzipien für den Grundrissentwurf nach Funktionsbereichen .....
1.1	Chancen des modernen Lehmbaus im Wohnungsbau .....	209	3.2.1	Erschließung .....
1.2	Stand der Technik und Forschung/ Vorhandene Voruntersuchungen .....	210	3.2.2	Leitungsführung und Nassbereiche .....
1.3	Themenspektrum und Schwerpunkt des Forschungsprojekts EGsL .....	210	3.2.3	Zeichnerische Darstellung der Prinzipien zur Optimierung der Lage von Installationen im Grundriss und Schnitt .....
2	Vorbetrachtungen – Ausgangsbasis .....	210	3.2.4	Optimierter Nassbereich, optimierte Nasszelle .....
2.1	Lehm als Baustoff .....	211	3.2.4.1	Schematische Grundrissdarstellung – Nasszelle .....
2.1.1	Eigenschaften von Lehm .....	211	3.2.4.2	Schnittdarstellungen Schacht/Vorwandinstallation .....
2.1.2	Lebensdauer .....	211		
2.1.3	Lehm unter Feuchtigkeitseinwirkung .....	211	4	Vorschläge von Konstruktionsprinzipien anhand ausgewählter Details eines Wohnhauses .....
2.1.4	Lebenszyklus und Rezyklierbarkeit .....	212	4.1	Erörterung von Konstruktionsprinzipien anhand von Details .....
2.1.5	Lehmsteine .....	212	4.2	Allgemeine Bauteilanforderungen .....
2.1.6	Moderne Lehmsteine .....	212	4.2.1	Wandaufbau .....
2.1.7	Energieaufwand zur Herstellung von modernen HL-Lehmsteinen .....	214	4.2.1.1	Aufbau Lehmmauerwerk .....
2.2	Beanspruchung der Bauteilkonstruktionen durch Feuchteinwirkung .....	215	4.2.1.2	Einsatz und Vorteile von ökologischen Dämmstoffen .....
2.2.1	Kondenswasser am und im Bauteil .....	215	4.2.1.3	Vorgehängte Fassade – Diskussion einer speziellen Variante mit Holzverschalung und Hanfdämmung .....
2.2.2	Feuchtigkeitsbeanspruchung in Nasszellen .....	215	4.2.1.4	Zu untersuchende Befestigungen an Lehmsteinmauerwänden .....
2.2.3	Vorschläge für konstruktiv schützende Maßnahmen .....	215		
3	Vorschläge von Entwurfsprinzipien .....	215		
3.1	Prinzipien für den Grundrissentwurf nach Gebäudetypen .....	215		

4.2.1.5	Beispielzeichnungen Wandaufbau	221	4.2.5.2	Beispielzeichnungen	230
4.2.1.6	Erkenntnisse und Schlussfolgerungen	224	4.2.5.3	Erkenntnisse und Schlussfolgerungen	230
4.2.2	Deckenanschlüsse	224	4.2.6	Fenster- und Türanschlüsse	232
4.2.2.1	Deckentypen	224	4.2.6.1	Verwendete Konstruktionstypen für Fenster und Türen	232
4.2.2.2	Beispielzeichnungen	224	4.2.6.2	Beispielzeichnungen	232
4.2.2.3	Erkenntnisse und Schlussfolgerungen	227	4.2.6.3	Holzrahmen-Fenster und Türen	232
4.2.3	Treppenanschlüsse	227	4.2.7	Entwässerungsanschlüsse	232
4.2.3.1	Treppentypen nach Wohntypologie	227	4.2.7.1	Terrassen und Loggien	232
4.2.3.2	Beispielzeichnungen	227	4.2.7.2	Nassbereiche und -zellen	235
4.2.3.3	Erkenntnisse und Schlussfolgerungen	227	5	Zusammenfassung	237
4.2.4	Fußpunktanschlüsse	227	5.1	Ergebnisse	237
4.2.4.1	Typen	227	5.2	Ausblick	238
4.2.4.2	Beispielzeichnungen	227	6	Literatur	240
4.2.4.3	Erkenntnisse und Schlussfolgerungen	227			
4.2.5	Dachanschlüsse	230			
4.2.5.1	Verwendete Dachtypen	230			

**C Bemessung**

<b>I</b>	<b>Mauerwerk unter (hoch-)dynamischen Einwirkungen</b>	
	<b>Theoretische, numerische und experimentelle Untersuchungen</b>	245
	Tobias Linse und Norbert Gebbeken, München	

1	Einleitung	245	3	Eigenschaften von Mauerwerksmaterialien	253
1.1	Eigenschaften von Mauerwerk	247	3.1	Materialeigenschaften von Mauerwerksteinen	253
1.1.1	Mauerwerkstypen	247	3.1.1	Ziegelsteine	253
1.1.2	Versagensmechanismen von Mauerwerk	247	3.1.2	Lehmsteine	254
1.1.2.1	Schubversagen	247	3.1.3	Kalksandsteine	255
1.1.2.2	Biegeversagen	247	3.1.4	Querverformungszahlen für Mauerwerksteine	255
1.1.2.3	Querzugversagen	247	3.1.5	Verzerrungsratenabhängigkeit	255
1.1.2.4	Besondere Versagenszustände bei Beanspruchung in Scheibenebene	248	3.1.6	Eigene Versuche an Mauerwerkssteinen	257
1.1.2.5	Weitere Versagensmechanismen bei Belastungen senkrecht zur Wandebene	249	3.1.6.1	Zugversuche	257
1.1.3	Herausforderungen an die Modellierung	249	3.1.6.2	Druckversuche	258
1.2	Stand der Forschung	249	3.1.6.3	Versuche zur Ermittlung der Elastizitätsmoduln	259
1.2.1	Numerische Modellierung von Mauerwerksstrukturen	249	3.1.6.4	Dynamische Materialversuche	259
1.2.2	Makromodell	249	3.2	Materialeigenschaften von Mörtel	261
1.2.3	Vereinfachtes Mikromodell	250	3.2.1	Zusammenstellung von Versuchsdaten von Mörtel	261
1.2.4	Detailliertes Mikromodell	250	3.2.1.1	Druckfestigkeit	261
1.2.5	Ein neuer Ansatz zur Simulation des Verhaltens von Mauerwerk	250	3.2.1.2	Zugfestigkeit	262
2	Grundlagen	250	3.2.1.3	Druck-E-Modul	262
2.1	Grundlagen der Materialmodellierung	250	3.2.1.4	Zug-E-Modul	262
2.1.1	Dynamische Prozesse	250	3.2.1.5	Querverformungszahl	262
2.1.2	Verzerrungsraten	250	3.2.1.6	Bruchenergie	262
2.1.3	Dynamischer Steigerungsfaktor	251	3.2.1.7	Versuche von Bierwirth	264
2.2	Bestimmung von Materialdaten	251	3.2.1.8	Abhängigkeit des Mörtels von Verzerrungsraten	266
2.2.1	Statische Materialtests	251	3.2.1.9	Restfestigkeit	268
2.2.2	Dynamische Materialtests	252	3.3	Verbundverhalten zwischen Stein und Mörtel	269

3.3.1	Haftzugfestigkeit .....	269	4.2.5.3	Anpassung der Materialfestigkeiten durch das Schädigungsmodell .....	283
3.3.2	Scherfestigkeit und Haftscherfestigkeit ..	270	4.2.5.4	Beschreibung des hydrostatischen Materialverhaltens .....	284
4	Eigene Materialmodelle für Mörtel und Mauerwerkssteine .....	272	4.3	Eigenes Materialmodell für Mauerwerkssteine – LG-Modell für Mauerwerkssteine .....	284
4.1	Bekannte Materialmodelle für Mauerwerk, Ziegel, Keramik und Beton .....	272	4.3.1	Festigkeitsmodell .....	284
4.1.1	Materialmodell für Mauerwerk von <i>Lourenço</i> .....	272	4.3.2	Berücksichtigung der Verzerrungsraten-abhängigkeit .....	287
4.1.2	Materialmodell für Keramik von <i>Johnson</i> und <i>Holmquist</i> .....	274	4.3.2.1	Zugfestigkeitssteigerung .....	287
4.1.3	Materialmodell für Beton von <i>Hartmann</i> , <i>Pietzsch</i> und <i>Gebbeken</i> .....	275	4.3.2.2	Druckfestigkeitssteigerung .....	287
4.2	Eigenes Materialmodell für Mörtel – LG-Modell für Mörtel .....	276	4.3.3	Zustandsgleichung .....	287
4.2.1	Festigkeitsmodell .....	276	4.3.4	Schädigungsmodell, Anpassung des Festigkeitsmodells nach Material-schädigung .....	287
4.2.2	Abgrenzung elastisches und elastisch-plastisches Materialverhalten .....	279	4.3.5	Anpassung der Materialsteifigkeiten .....	288
4.2.3	Abgrenzung elastisch-plastisches und elastisch-plastisch-schädigendes Materialverhalten .....	280	4.4	Zusammenfassung der eigenen Modelle ..	289
4.2.4	Berücksichtigung der Verzerrungsraten-abhängigkeit .....	280	5	Berechnungen einer Mauerwerkswand unter Explosionsbelastung .....	289
4.2.4.1	Zugfestigkeitssteigerung .....	280	5.1	Versuchsbeschreibung .....	289
4.2.4.2	Druckfestigkeitssteigerung .....	280	5.2	Beschreibung der numerischen Modellierung .....	290
4.2.5	Schädigungsmodell .....	281	5.3	Ergebnisvergleich Simulation und Experiment .....	292
4.2.5.1	Bruchverzerrungen auf dem Druck-meridian .....	281	5.4	Diskussion – Ausblick .....	292
4.2.5.2	Bruchverzerrungen auf dem Schub-meridian .....	283	6	Zusammenfassung und Ausblick .....	292
<b>II Tragverhalten und Bemessung von Injektionsdübeln in Mauerwerk</b> .....			7	Literatur .....	294
Jan Hofmann, Stuttgart und Georg Welz, Renningen					
1	Einleitung .....	297	5	Tragverhalten unter Querbelastung .....	309
2	Ankergrund Mauerwerk .....	298	5.1	Versagensarten .....	309
3	Injektionsdübel für Mauerwerk .....	298	5.1.1	Stahlversagen .....	309
3.1	Injektionsmörtel, Gebinde und Statikmischer .....	298	5.1.2	Rückwärtiger Steinausbruch und Herausziehen .....	311
3.2	Ankerstange und Siebhülse .....	299	5.1.3	Lokales Steinversagen .....	313
3.3	Dübelmontage .....	300	5.1.4	Steinspalten .....	314
4	Tragverhalten unter Zugbelastung .....	301	5.1.5	Steinauszug am Rand .....	315
4.1	Versagensarten .....	301	5.2	Einfluss von Fugen und Rändern .....	315
4.1.1	Herausziehen des Dübels .....	302	6	Versuche am Bauwerk .....	318
4.1.2	Stahlversagen .....	302	6.1	Allgemeines .....	318
4.1.3	Steinausbruch .....	303	6.2	Einfluss der Abstützung .....	318
4.1.4	Steinspalten .....	304	7	Bemessung von Verankerungen in Anlehnung an ETAG 029 .....	320
4.1.5	Steinauszug .....	305	7.1	Allgemeines .....	320
4.2	Einfluss von Fugen und Rändern .....	306	7.2	Stahlversagen .....	321
4.3	Einfluss von Gruppenanordnung .....	307	7.2.1	Zugbelastung .....	321
			7.2.2	Querbelastung .....	321

7.3	Herausziehen	321	7.6	Torsionsbelastung	323
7.3.1	Zugbelastung	321	7.7	Berücksichtigung von Fugen	323
7.3.2	Querbeltung	321	7.8	Interaktion bei kombinierter Zug- und Querbeltung	323
7.4	Steinversagen	321	8	Zusammenfassung	323
7.4.1	Zugbelastung	321	9	Literatur	324
7.4.2	Querbeltung	322			
7.5	Herausziehen des Steins	322			
<b>III</b>	<b>Nachrechnung gemauerter Bogenbrücken</b>	327			
	Gero Marzahn, Bonn; Eckard Bothe, Chemnitz und Wolfram Jäger, Dresden				
1	Einleitung	327	3.1.2	Mechanische Modelle	333
2	Bedeutung im Verkehrsnetz	327	3.1.3	Materialkennwerte	334
2.1	Baujahr, Anzahl der Felder, Einzelstützweiten	327	3.1.4	Nachweise	335
2.2	Bestandsdokumentation	330	3.2	Bogenbrücke Gleisberg	339
2.3	Baustoffkennwerte	331	3.2.1	Geometrische und stoffliche Grundlagen	339
2.4	Lasten	332	3.2.2	Mechanisches Modell	340
3	Beispiel einer Nachweisführung auf der Grundlage der Nachrechnungsrichtlinie	333	3.2.3	Materialkennwerte	340
3.1	Autobahnbrücke im Zuge der A 3 über die Sieg bei Siegburg	333	3.2.4	Nachweise	340
3.1.1	Geometrische und stoffliche Grundlagen	333	4	Zusammenfassung	342
			5	Literatur	342
<b>IV</b>	<b>Knicken von Mauerwerk – Kritische Anmerkungen zum empirischen Verfahren und neuer Vorschlag für den EC 6</b>	343			
	Tammam Bakeer, Dresden und Poul Dupont Christiansen, Aarhus (Dänemark)				
1	Einleitung	343	5.5	Formel von <i>Kirtschig</i>	355
2	Formelzeichen	344	5.6	Ansatz von <i>Graubner/Glock</i>	355
3	Numerische Referenzlösung	344	5.7	Ansatz von <i>Sandoval/Roca</i>	355
4	Materialmodelle	345	5.8	Ansatz von <i>Graubner/Förster</i>	356
4.1	Normalisierte Spannungs-Dehnungs-Beziehung	345	6	Bewertung der empirischen Methoden	356
4.2	Grundlegende Materialparameter für das Stabilitätsproblem	347	7	Mögliche Lösungen für einen empirischen Ansatz	357
4.3	Annäherung des Materialmodells	349	7.1	Lösung auf der Basis von Regressionsmodellen	357
5	Empirische Methoden	350	7.2	Lösung unter Berücksichtigung der Nichtlinearität des Materials	359
5.1	Johnsons Parabel	351	8	Vorschlag für den Eurocode 6	362
5.2	Rankine-Methode	352	9	Schlussbemerkungen	364
5.3	Momenten-Vergrößerungs-Verfahren	353	10	Literatur	365
5.4	Formel von <i>Mann</i>	354			

<b>V</b>	<b>Zum Nachweis der Mindestauflast nach DIN EN 1996-3/NA</b> .....			369
	Wolfram Jäger, Dresden			
1	Einführung .....	369	9.3.1 Allgemeines .....	383
2	Derzeitige Normungssituation .....	370	9.3.2 Ausmitten infolge der Deckenverdrehung und Einstellung des Bogenmodells .....	384
3	Hintergrund der Formeln in EN 1996-3 von <i>Beuker</i> .....	371	9.3.3 Schlussfolgerung .....	387
4	Ausarbeitungen von <i>Reeh/Schlundt</i> sowie <i>Jäger/Baier</i> .....	373	10 Ergebnisse .....	387
5	<i>Jäger/Baier</i> .....	373	10.1 Bei Vorhandensein von Stahlbeton- decken unter Ansatz des Bogenmodells ..	387
6	Abminderungsfaktoren für das vereinfachte Verfahren nach <i>Mann</i> in DIN 1053-1 ...	374	10.1.1 Tatsächliche Ausbildung .....	387
7	Ansatz des DIBt für die Mindestauflast ..	375	10.1.2 Verformbarkeit der Widerlager .....	388
8	Genauere Hintergründe zum Trag- verhalten und dessen Beschreibung .....	376	10.1.3 Mögliche Stabilitätsfälle .....	389
8.1	Allgemeiner Ansatz eines Abminderungs- faktors .....	376	10.1.4 Lage der Resultierenden in Wandmitte ..	391
8.2	Der Wand-Decken-Knoten und die Bestimmung der inneren Momente .....	377	10.1.5 Zusammenfassung .....	393
8.3	Rücksetzregel .....	377	10.2 Beim Fehlen einer Massivdecke .....	393
8.4	Am Kopf und Fuß der Wand .....	378	10.3 Anwendung auf Beispiele .....	393
8.5	In der Mitte der Wand mit der Knick- abminderung nach DIN EN 1996-1-1/NA Anhang NA.G (bilinare Kurvenschar) ..	378	10.3.1 Voll aufliegende Deckenplatte und Winddruck .....	393
8.6	In Wandmitte mit der Knickabminderung nach DIN EN 1996-1-1, Anhang G (Glockenkurve) .....	380	10.3.2 Teilweise aufliegende Deckenplatte unter Windsog .....	395
8.7	Zusammenfassung .....	380	10.4 Parameterstudie .....	396
9	Bogenmodell nach DIN EN 1996-1-1 ...	382	10.5 Auswertung der Ergebnisse der Parameterstudie .....	396
9.1	Nach gültiger Normenfassung .....	382	10.5.1 Voll aufliegende Deckenplatte .....	397
9.2	Gegenwärtige Kritik am Bogenmodell ..	383	10.5.2 Teilweise aufliegende Deckenplatte .....	399
9.3	Unterschied zwischen Bogen- und Stabmodell .....	383	11 Zusammenfassung der Ergebnisse .....	401
			11.1 Thesen .....	401
			11.2 Kernaussage .....	402
			11.3 Bei Vorhandensein von Stahlbeton- decken .....	402
			11.4 Wenn keine Stahlbetondecke vorhanden ..	402
			11.5 Notwendige Anpassungen in der Norm ..	402
			12 Literatur .....	403
			12.1 Normen und Regelwerke .....	403
			12.2 Monografien, Artikel, Berichte .....	404
<b>D</b>	<b>Bauphysik - Brandschutz</b>			
<b>I</b>	<b>Praktischer Schallschutz mit Mauerwerk</b> .....			409
	Elmar Sälzer, Wiesbaden			
1	Einleitung .....	409	2.4 VDI 4100 „Schallschutz im Hochbau – Wohnungen“ .....	421
1.1	Allgemeines .....	409	2.5 DEGA-Schallschutzausweis .....	423
1.2	Ingenieurmäßige Schallschutzplanung ...	410	3 Die wichtigsten theoretischen Zusammenhänge .....	423
2	Anforderungen .....	410	3.1 Direktschalldämmung (Transmissions- schalldämmung) .....	423
2.1	Geschichtliche Entwicklung .....	410	3.2 Schalllängsdämmung .....	427
2.2	DIN 4109:1989-11 „Schallschutz im Hochbau“ .....	411		
2.3	DIN 4109:2016 „Schallschutz im Hochbau“ .....	415		

3.3	Schalldämmung im tieffrequenten Bereich .....	428	5	Schalldämmung mit einschaligem Mauerwerk .....	435
4	Mauerwerksarten .....	428	5.1	Transmissionsschalldämmung (Direktdämmung) .....	435
4.1	Grundsätzliches .....	428	5.2	Schalllängsdämmung .....	436
4.2	Ziegel .....	429	5.3	Kimmsteine .....	436
4.2.1	Vollziegel, Lochziegel .....	429	5.3.1	Anwendung .....	436
4.2.2	Porosierte Hochlochziegel .....	429	5.3.2	Einschaliges Mauerwerk mit Kimmsteinen .....	436
4.2.2.1	Porosierte Hochlochziegel ohne zusätzliche Dämmung .....	429	5.3.3	Kimmsteine bei zweischaligem Mauerwerk .....	436
4.2.2.2	Porosierte Hochlochziegel mit Wärmedämmeinlage .....	429	6	Schallschutz mit zwei- und mehrschaligen Mauerwerkskonstruktionen .....	437
4.2.3	Verfüllziegel .....	430	6.1	Konstruktionen mit zwei Massivschalen .....	437
4.3	Kalksandsteine .....	430	6.1.1	Reihenhaus- und Gebäudetrennwände ..	437
4.3.1	Konventionelle Mauerwerksformate ..	430	6.1.1.1	Optimal entkoppelte Schalen .....	437
4.3.2	Planblockelemente .....	430	6.1.1.2	Schallschutz bei unvollständiger Trennung .....	439
4.4	Betonsteinmauerwerk .....	431	6.2	Mauerwerkswände mit Vorsatzschalen ..	439
4.4.1	Leichtbetonhohlblock- und -vollsteine ..	431	6.2.1	Mit biegeweichen Vorsatzschalen .....	439
4.4.2	Schwerbetonsteine .....	431	6.2.2	Mit biegesteifen Vorsatzschalen .....	439
4.4.3	Porenbetonmauerwerk .....	432	6.3	Dreischalige Konstruktionen .....	439
4.4.4	Weitere Betonstein-Systeme .....	432	7	Erhöhter Schallschutz .....	440
4.4.4.1	Gisoton .....	432	8	Literatur .....	441
4.4.4.2	Holzbeton-Verfüllsteine .....	432			
4.5	Natursteinmauerwerk .....	433			
4.6	Historisches Mauerwerk .....	433			
4.6.1	Ausgemauertes Fachwerk .....	433			
4.6.2	Mauerwerk mit Trümmerschuttsteinen ..	433			
4.7	Wände aus verfüllten Hartschaumelementen .....	435			

**E Normen • Zulassungen • Regelwerk**

<b>I</b>	<b>Geltende Technische Regeln für den Mauerwerksbau (Deutsche, Europäische und Internationale Normen) (Stand 31.10.2016)</b> .....	445			
	Peter Rauh, Berlin und Carola Hauschild, Radebeul				
1	Vorbemerkung .....	445			
2	EuGH-Urteil vom 16. Oktober 2014 (Rs. C-100/13) .....	446			
3	Regelwerk .....	447			
<b>II</b>	<b>Verzeichnis der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen für den Mauerwerksbau (Stand 31.7.2016)</b> .....	463			
	Wolfram Jäger, Dresden und Roland Hirsch, Berlin				
1	Mauerwerk mit Normal- oder Leichtmörtel .....	465	1.1.4.2	Hohlblocksteine .....	483
1.1	Mauersteine üblichen Formates .....	465	1.1.4.3	Hohlblocksteine mit integrierter Wärmedämmung .....	484
1.1.1	Mauerziegel .....	465	1.1.5	Sonstige Mauersteine .....	484
1.1.2	Verfüllziegel .....	477	2	Mauerwerk mit Dünnbettmörtel .....	485
1.1.3	Kalksandsteine .....	478	2.1	Plansteine üblichen Formates und dafür zugelassene Dünnbettmörtel .....	485
1.1.4	Betonsteine .....	480	2.1.1	Planziegel .....	485
1.1.4.1	Vollsteine und Vollblöcke .....	480			

2.1.2	Planziegel mit integrierter Wärmedämmung	509	4.3	Verguss- und Verbundtafeln	568
2.1.3	Planverfüllziegel	521	5	Geschosshohe Wandtafeln	569
2.1.4	Kalksand-Plansteine	525	6	Schalungsstein-Bauarten	569
2.1.5	Porenbeton-Plansteine	528	7	Trockenmauerwerk	571
2.1.6	Beton-Plansteine	530	8	Mauerwerk mit PU-Kleber	572
2.1.6.1	Planvollsteine und Planvollblöcke	530	8.1	Planziegel	572
2.1.6.2	Planhohlblocksteine	538	8.2	Planverfüllziegel	574
2.1.6.3	Plansteine aus Leichtbeton mit integrierter Wärmedämmung	543	8.3	Porenbeton-Plansteine	575
2.2	Planelemente und dafür zugelassene Dünnbettmörtel	550	8.4	Vorgefertigte Wandtafeln	576
2.2.1	Planziegel-Elemente	550	9	Bewehrtes Mauerwerk	577
2.2.2	Kalksand-Planelemente	551	9.1	Bewehrung für bewehrtes Mauerwerk	577
2.2.3	Porenbeton-Planelemente	557	9.2	Hochlochziegel für bewehrtes Mauerwerk	577
2.2.4	Beton-Planelemente	558	9.3	Stürze	577
2.3	Wandbauart aus Planelementen in drittel- oder halbgeschosshoher Ausführung	561	10	Ergänzungsbauteile	579
2.4	Weitere Dünnbettmörtel	562	10.1	Mauerfuß-Dämmelemente	579
3	Mauerwerk mit Mittelbettmörtel	563	10.2	Anker zur Verbindung der Mauerwerkschalen von zweischaligen Außenwänden	580
4	Vorgefertigte Wandtafeln	564	10.3	Sonstige Ergänzungselemente	581
4.1	Geschosshohe Mauertafeln	564	Anhang		582
4.2	drittel- oder halbgeschosshohe Mauertafeln	568	Zulassungsübersicht		582
<b>III</b>	<b>Ausführung von Mauerwerk nach Eurocode 6</b>	<b>601</b>			
	Dieter Figge, Warburg				
1	Allgemeines	601	2.4.3	Bewährte Regeln/Normmaße	609
2	Grundsätzliche Planungs- und Konstruktionsregeln	603	2.4.4	Anschlüsse	610
2.1	Normen und Merkblätter	603	2.4.5	Dehnungsfugen	613
2.2	Einflüsse auf die Dauerhaftigkeit des Mauerwerks	603	2.5	Toleranzen	614
2.2.1	Mikroumweltbedingungen	603	3	Außenwände	614
2.2.2	Klimafaktoren (Makroumweltbedingungen)	603	3.1	Dämmung von Außenwänden	614
2.2.3	Aggressive chemische Umgebungen	604	3.2	Sichtmauerwerk/Verblendmauerwerk	615
2.3	Auswahl der Baustoffe	605	3.2.1	Tragende Außenwände mit Sichtmauerwerk	615
2.3.1	Allgemeines	605	3.2.1.1	Mauersteine	615
2.3.1.1	Mauersteine	606	3.2.1.2	Mörtel Vormauerschale	615
2.3.1.2	Mauermörtel	606	3.2.2	Verblend- oder Vormauerschale	616
2.4	Mauerwerk	606	3.2.3	Ausbildung	617
2.4.1	Verarbeitung von Mauersteinen und Mauermörtel	606	3.2.3.1	Fugenglattstrich	618
2.4.1.1	Mauerwerk mit Normal- und Leichtmauermörtel	606	3.2.3.2	Nachträgliches Verfugen	618
2.4.1.2	Mauerwerk mit Dünnbettmörtel	606	3.3	Anschlussdetails und Abdichtungen	618
2.4.1.3	Stoßfugenausbildung	607	3.3.1	Dachanschluss	618
2.4.2	Grundsätzliches zu Mauerwerksverbänden	607	3.3.2	Deckenaufleger	618
			3.3.3	Stürze	620
			3.3.4	Fenster- und Türanschlüsse	622
			3.3.5	Gesimse, Sohlbänke, Abdeckungen	623
			3.3.6	Fußpunkte im Erd- und im Kellergeschoss	624

4	Innenwände	626	6.1	Mischkonstruktionen	633
4.1	Tragende Innenwände	626	6.2	Schutz vor mechanischer Beschädigung	633
4.1.1	Anforderungen	626	6.3	Bauhöhe des Mauerwerks	633
4.1.2	Anschlüsse	627	6.4	Zulässige Abweichungen	633
4.2	Nichttragende Innenwände	627	6.5	Aussteifung während der Herstellung	633
4.2.1	Anwendungsbereich und Anforderungen	627	6.6	Nachbehandlung und Schutz des Mauerwerks während der Bauausführung	634
4.2.2	Befestigungen an angrenzenden Bauteilen	630	6.6.1	Allgemeines	634
4.2.3	Regeln für die schadensfreie Ausführung	631	6.6.2	Schutz gegen Regen	634
5	Erddruck auf Kelleraußenwände	631	6.6.3	Schutz gegen Frost-Tau-Wechsel	635
6	Ausführung von Mauerwerk und Tipps für die Baustelle	633	6.6.4	Schutz gegen Austrocknung	635
			7	Literatur	635

## F Forschung

I	<b>Übersicht über abgeschlossene und laufende Forschungsvorhaben im Mauerwerksbau</b>	639			
	Anke Eis, Dresden				
	Vorbemerkung	639	2.2.1	EU-Projekt INSYSME: Innovative Techniken für erdbebensichere Ausfachungswände aus Ziegelmauerwerk in Stahlbetonrahmentragwerken	654
	Forschungsstellen (F)	639	2.2.2	Entwicklung einer zementfreien Injektionstechnologie auf Kalkbasis für historisch wertvolles, gipshaltiges Mauerwerk – IngiMa	654
1	Abgeschlossene Forschungsvorhaben	643	2.2.3	Umsetzung einer optimierten Prüfung der Haftscherfestigkeit im Mauerwerksbau in Anlehnung an das bisherige europäische Verfahren nach DIN EN 1052-3	657
1.1	Übersicht Forschungsprojekte und Forschungsstellen	643	2.2.4	Einsatz von Ankern und Nadeln aus Faserwerkstoffen bei der Sanierung historischer Bauwerke – FaAnNa	659
1.2	Kurzberichte	643	2.2.5	Textile Bewehrung in der Lagerfuge von gemauerten Kellerwänden zur Erhöhung der Tragfähigkeit gegen Erddruck (Faserbewehrtes Kellermauerwerk – FBKM)	661
1.2.1	Untersuchungen zur Reduzierung der Tragfähigkeit von Mauerwerk bei Schwächung des Querschnittes infolge von Aussparungen und Schlitzen	643	2.2.6	Mauerwerksbauten an der Hochhausgrenze – Entwicklung und Anwendung eines neuen Rechenmodells für Schubwände	662
1.2.2	Energetische und mechanische Optimierung des Anschlusses der Decke an monolithische Außenwände aus Mauerwerk mit Passivhausstandard	647	2.2.7	Niedrigstenergiehäuser in Mauerwerksbauweise	663
1.2.3	Untersuchung der zivil- und baurechtlichen Situation zur Nutzung der Eurocodes in anderen europäischen Ländern	649			
1.2.4	Nachhaltigkeit von Mauerwerk im Geschosswohnungsbau	652			
2	Laufende Forschungsvorhaben	653			
2.1	Übersicht Forschungsprojekte und Forschungsstellen	653			
2.2	Kurzberichte	654			
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	665			
	<b>Anbieterverzeichnis</b>	677			

## Autoren

Neben der Titulatur und der Anschrift sind nachstehend auch die Haupttätigkeit der Autoren und ggf. weitere für ihren Beitrag in diesem Mauerwerk-Kalender besonders relevante spezielle Tätigkeiten angegeben. Außerdem wird auf den jeweiligen Beitrag des Autors in diesem Mauerwerk-Kalender in Klammern verwiesen (Rubrik und Ordnungsnummer des Beitrages).

**Bakeer**, Tammam, Dr.-Ing., TU Dresden, Fakultät Architektur, Lehrstuhl für Tragwerksplanung, Zellescher Weg 17, 01069 Dresden.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Mitglied der Forschungsgruppe „Mauerwerk“ am Lehrstuhl für Tragwerksplanung der TU Dresden; Forschungsschwerpunkt: Numerische und Analytische Untersuchung von Mauerwerk (C IV).

**Becker**, Rainer, Dipl.-Ing., fobatec GmbH, Edelstahlweg 5c, 44287 Dortmund.

Geschäftsführer fobatec Forschungsinstitut Bautechnik, Kooperationspartner der TU Dortmund; Mitarbeit in AK Schraubanker, Telleranker, Setzbolzen des DIBt (B I).

**Bothe**, Eckard, Dr.-Ing., Jäger und Bothe Ingenieure GmbH, Haydnstraße 3, 09119 Chemnitz.

Geschäftsführer der Jäger und Bothe Ingenieure GmbH (C III).

**Brameshuber**, Wolfgang (†16.09.2016), Prof. Dr.-Ing., RWTH Aachen University, Institut für Bauforschung (ibac), Schinkelstraße 3, 52062 Aachen.

Professor für Baustoffkunde, Leiter des Instituts für Bauforschung; Mitglied einschlägiger DIN-Normenausschüsse; Mitglied des DIBt-Sachverständigenausschusses „Wandbauelemente“; RILEM-Beauftragter für Deutschland; Redaktionsbeiratsmitglied der Zeitschrift „Mauerwerk“ (A I).

**Christiansen**, Poul, Civ. Eng., Danish Technological Institute, Senior Consultant, Kongsvang Allé 29, 8000 Aarhus C, Dänemark (bis 08/2016).

Mitarbeit im Europäischen Projektteam PTSC6.T1 zur Überarbeitung und Weiterentwicklung der EN 1996-1-1 Bemessung von Mauerwerk (C IV).

**Eis**, Anke, Dipl.-Ing. (FH), Jäger Ingenieure GmbH, Wichernstraße 12, 01445 Radebeul.

Redaktionsassistentin Mauerwerk-Kalender und Zeitschrift Mauerwerk (F I).

**Figge**, Dieter, Dr.-Ing., Eggestraße 3, 34414 Warburg. Geschäftsführer Ziegel-Zentrum NordWest e. V., Warburg. Technischer Geschäftsführer Fachverband Ziegelindustrie Nordwest e. V. Duisburg. Technischer Geschäftsführer Arbeitsgemeinschaft Ziegelelementbau e. V. Bonn. Lehre: Vorlesungen Massivbau, Mauerwerksbau, Brandschutz und Nachhaltiges Bauen an den Hochschulen Detmold, Kassel,

Würzburg und Münster. Mitglied des DIN-Spiegel-ausschusses „Mauerwerksbau“, Mitglied im DIN-Ausschuss DIN 4103 „Leichte Trennwände“ (E III).

**Fontana**, Patrick, Dr.-Ing., BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Fachbereich Baustoffe, Unter den Eichen 87, 12205 Berlin.

(B III, B IV).

**Garofano**, Angelo, Dr., Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne (EPFL) Applied Computing and Mechanics Laboratory, EPFL ENAC IIC IMAC, Station 16, 1015 Lausanne, Schweiz.

(B IV).

**Gebbeken**, Norbert, Prof. Dr.-Ing. habil., Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften/ Institut für Mechanik und Statik, Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg

Universität der Bundeswehr München, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen, Professur für Baustatik, Institutsleiter des Instituts für Mechanik und Statik, Forschungszentrum RISK – Risiko, Infrastruktur, Sicherheit und Konflikt Geschäftsführer der AJG Ingenieure GmbH München, Prüflingenieur für Baustatik, Präsident der Bayerischen Ingenieurkammer-Bau (C I).

**Hartmann**, Raik, Dipl.-Ing., TU Dresden, Fakultät Architektur, Lehrstuhl für Tragwerksplanung, Zellescher Weg 17, 01069 Dresden.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Forschungsschwerpunkt Entwurfs- und Konstruktionsgrundsätze im modernen Lehm- und Ziegelbau (B V).

**Hauschild**, Carola, Dipl.-Ing., Jäger Ingenieure GmbH, Wichernstraße 12, 01445 Radebeul.

(E I)

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

Mitarbeiter des Fachgebietes „Mauerwerksbau“ im DIBt; Mitglied der DIN-Arbeitsausschüsse für Mauersteine und Mauermörtel und der DIN-Arbeitsausschüsse „Mauerwerk“, Geschäftsführer des DIBt-Sachverständigenausschusses „Wandbauelemente“ (A II, E II).

**Hofmann**, Jan, Prof. Dr.-Ing., Universität Stuttgart, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Pfaffenwaldring 4, 70569 Stuttgart.

Professor für Befestigungs- und Verstärkungsmethoden und stellv. Direktor des Instituts für Werkstoffe im Bauwesen; Forschung und Lehre: Befestigungs-, Bewehrungs- und Klebetechnik, Schutz, Instandsetzung und Ertüchtigung von Bauwerken; Mitglied DIN Spiegelausschuss „Bemessung und Konstruk-

tion“ und Obmann des „AK Befestigungsmittel“, Mitglied des DIBt-Sachverständigenausschusses „Befestigungen“ und „Kleben“ sowie Mitglied in CEN/TC „Design of fastening for use in concrete“ und der fib SAG „Fastenings to Concrete and Reinforcement concrete structures“ (C II).

**Jäger**, Wolfram, Prof. Dr.-Ing., Technische Universität Dresden, Fakultät Architektur, Lehrstuhl für Tragwerksplanung, Zellescher Weg 17, 01069 Dresden. Beratender Ingenieur für Bauwesen und Prüflingenieur für Standsicherheit; Gesellschafter der Jäger Ingenieure GmbH in Radebeul und der Jäger u. Bothe Ingenieure in Chemnitz; Mitarbeit in deutschen und europäischen Normungsgremien; Chefredakteur der Zeitschrift „Mauerwerk“ (Herausgeber, A II, B II, C III, C IV, E II).

**Klatecki**, Marc, Dipl.-Ing., Ingenieurbüro Prof. Dr. Hauser GmbH, Moritzstraße 17, 34127 Kassel. (B I).

**Künzlen**, Jürgen H. R., Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) M. A., Adolf Würth GmbH & Co. KG, Reinhold-Würth-Straße 12–17, 74653 Künzelsau. Projektleiter bei der Adolf Würth GmbH & Co. KG in Künzelsau mit den Schwerpunkten Zulassung und Entwicklung von Dübelssystemen/technisches Marketing (B I).

**Kühn**, Michael, Dr.-Ing., Sachverständigen- und Ingenieurbüro, Talstraße 5, 08066 Zwickau. Dombaumeister, Erster Vorsitzender des Dombaufördervereins Dom Zwickau (B II).

**Linse**, Tobias, Dr.-Ing., Dr. Gollwitzer – Dr. Linse Ingenieure, Karlstraße 42, 80333 München. Partner und Geschäftsführer der Dr. Gollwitzer – Dr. Linse Ingenieure, Beratender Ingenieur BayIK Bau (C I).

**Marzahn**, Gero, Dr.-Ing., TRDir, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur BMVI, Robert-Schuman-Platz 1, 53175 Bonn. Leiter des Referates StB 17 (BN) Brücken-, Tunnel- und sonstige Ingenieurbauwerke, Abt. Straßenbau, Obmann der Unterarbeitsgruppe „Nachrechnungsrichtlinie“ zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (C III).

**Miccoli**, Lorenzo, Dr.-Ing., BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Fachbereich Baustoffe, Unter den Eichen 87, 12205 Berlin. (B III, B IV).

**Müller**, Philipp, M.Sc., ETH Zürich, Singapore ETH-Centre, Alternative Construction Materials, 1 Create Way, # 06–01 Create Tower, Singapore 138602. (B III).

**Müller**, Urs, Dr., CBI Swedish Cement and Concrete Research Institute, Brinellgatan 4, 50462 Borås, Sweden. (B IV).

**Rauh**, Peter, Dipl.-Ing., DIN Deutsches Institut für Normung, Normenausschuss Bauwesen, Burggrafenastraße 6, Am DIN-Platz, 10787 Berlin. Projektmanager im Normenausschuss Bauwesen insbesondere für den Fachbereich „Mauerwerksbau“; verantwortlich für alle DIN-Arbeitsausschüsse im Mauerwerksbau und für die Internationalen Mauerwerksausschüsse CEN/TC 250/SC6, CEN/TC 125/WG 1 und ISO/TC 179 (E I).

**Sälzer**, Elmar, Dipl.-Ing., ITA Ingenieurgesellschaft für Technische Akustik mbH, Beratende Ingenieure VBI, Max-Planck-Ring 49, 65205 Wiesbaden. (D I).

**Scheller**, Eckehard, Dipl.-Ing. (FH), Adolf Würth GmbH & Co. KG, Niederlassung Berlin Hohenschönhausen, Grenzgrabenstraße 4, 13053 Berlin. Projektleiter Technisches Marketing Befestigungstechnik (B I).

**Welz**, Georg, Dr.-Ing., Hilti Entwicklungsgesellschaft mbH, 86916 Kaufering. (C II).

**Ziegert**, Christof, Prof. Dr.-Ing., Ziegert Roswag Seiler Architekten Ingenieure, Schlesische Straße 26, Aufgang A, 10997 Berlin. Geschäftsführer der Ziegert Roswag Seiler Architekten Ingenieure, Beratender Ingenieur der Baukammer Berlin, Honorarprofessur „Bauen und Erhalten mit Lehm“ FH Potsdam, Obmann des DIN-Normenausschusses Lehm, Vorstandsmitglied „Dachverband Lehm e. V.“, öbuv Sachverständiger „Schäden im Lehm“ IHK Berlin (B III).

## **A Baustoffe ■ Bauprodukte**

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

Wolfgang Brameshuber, Aachen

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

Wolfram Jäger, Dresden und Roland Hirsch, Berlin



# I Eigenschaften von Mauersteinen, Mauermörtel, Mauerwerk und Putzen

Wolfgang Brameshuber, Aachen

## 1 Allgemeines

Dieses Kapitel des Mauerwerk-Kalenders wird als ständiger Beitrag jährlich aktualisiert. Der Autor bedankt sich ausdrücklich bei den Mitarbeitern/-innen der Arbeitsgruppe Mauerwerk am Lehrstuhl für Baustoffkunde der RWTH Aachen (Dorothea Saenger, Markus Graubohm) für die Zuarbeiten zur Fortschreibung dieses Beitrags.

Im Zuge der Ablösung der nationalen Bemessungsnorm DIN 1053-1 [1] bzw. DIN 1053-100 [2] durch den Eurocode 6 [3–6] inklusive der zugehörigen Nationalen Anhänge [7–9] führen die Rechenansätze zur Bemessung von Mauerwerk insofern eine Veränderung herbei, dass auch europäische Steine und Mörtel mit teilweise anderen Eigenschaften ihr Einsatzgebiet in Deutschland finden. Daher sind die überwiegend deutschen Ausgangsstoffe und das daraus erstellte Mauerwerk mit den erzielten Eigenschaften in diesem Beitrag zusammengestellt, der somit die direkte Möglichkeit eines Vergleichs mit Materialien anderer Länder gibt.

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

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

Die hier aufgeführten Eigenschaftswerte beziehen sich auf das tatsächliche Verhalten von Mauerstein, Mauermörtel und Mauerwerk, womit deutlich wird, dass aufgrund der vielfältigen Materialien und Kombinationen eine große Bandbreite von Eigenschaften entsteht. Anforderungen aus Normen und allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen sind Mindesteigenschaften. Die hier genannten Eigenschaftswerte gehen über Normanforderungen hinaus und sollen bei gesonderten Fragestellungen helfen, eine fachlich fundierte Antwort zu finden, wie z. B. bei der Beurteilung der Rissicherheit von Mauerwerk (Gebrauchstauglichkeitsnachweis), bei einer Schadensdiagnose oder aber bei genaueren Nachweisen für die Tragfähigkeit bestehender Bauwerke. In Grenzfällen kann ein ingenieurmäßig überdachter Ansatz geeigneter Kennwerte zusätzliche Sicherheit bieten. Die Zusammenstellung der Eigenschaftskennwerte bezieht sich in einigen Fällen auf frühere Beiträge des Mauerwerk-Kalenders. In anderen Fällen wurde eine Aktualisierung vorgenommen. Der Bezug bei einer unveränderten Datenlage ist dann der Artikel aus dem Mauerwerk-Kalender 2010 [10]. Wenn Materialkennwerte/Rechenwerte aus dem Eurocode 6 entnommen wurden, wird hierfür auf die Kommentierung zum EC6 [11] verwiesen, die noch weiterführende Erläuterungen enthält.

## 2 Eigenschaftskennwerte von Mauersteinen

### 2.1 Festigkeitseigenschaften

#### 2.1.1 Längsdruckfestigkeit

Die Längsdruckfestigkeit von Mauersteinen wird überall dort benötigt, wo eine Biegebeanspruchung in Wandebene erfolgt, so z. B. bei Wänden auf sich durchbiegenden Decken oder Stürzen mit Übermauerung. Gemäß [10] ergibt sich nach Auswertung der Literatur [12–14] folgendes Bild: Für Hochlochziegel lässt sich kein Zusammenhang zwischen dem Nennwert der Steindruckfestigkeit und der Längsdruckfestigkeit angeben, unabhängig vom Lochanteil, genausowenig für Leichtbeton. Dies hat im Wesentlichen den Einfluss der Loch-/Steganordnung als Ursache. Im Einzelfall wird empfohlen, den Nachweis experimentell zu führen. Für

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

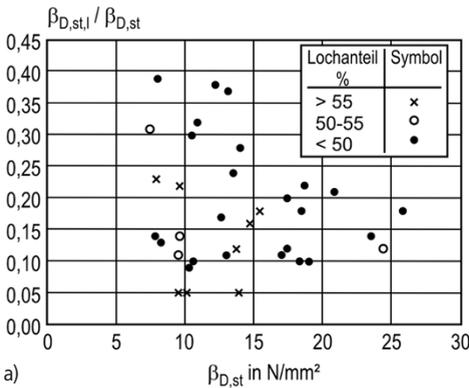
Mauerstein	n	$\beta_{D,st}$ Wertebereich N/mm <sup>2</sup>	$\beta_{D,st,l} / \beta_{D,st}$		
			$\bar{x}$	min x	max x
Mz	2	21,9/22,7	0,67	0,64	0,70
HLz <sup>1)</sup>	5	20...47	0,23	0,12	0,33
HLz <sup>2)</sup>	37	7, 4...26	0,18	0,05	0,39
KS	8	24,1...36,8	0,59	0,32	0,75
KS L	7	8,9...26,9	0,40	0,32	0,56
V	5	4,1...23,1	0,75	0,61	0,83
Vbl	5	2,7...3,6	0,90	0,36	1,13
Hbl	12	2,5...7,9	0,61	0,35	0,81
Hbn	1	15,8	0,46	–	–
PB, PP	15	2,3...9,4	0,70	0,50	0,92

n Anzahl der Versuchsserien  
 $\bar{x}$  Mittelwert  
 min x; max x = Kleinst-, Größtwert  
 1) Trockenrohichte  $\rho_d > 1,0 \text{ kg/dm}^3$   
 2)  $\rho_d \leq 1,0 \text{ kg/dm}^3$

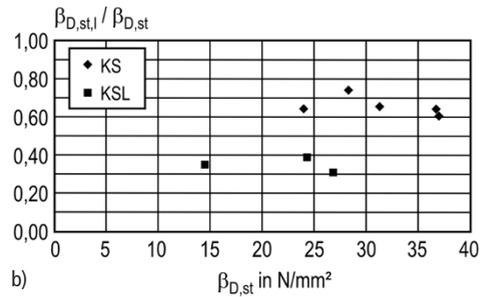
Kalksandvollsteine und Kalksandlochsteine ergibt sich nach [10] ein durchaus verwertbarer Zusammenhang. Für Mauerziegel, Kalksandvollsteine und Kalksandlochsteine ist das Verhältnis Längsdruck-/Mauersteindruckfestigkeit von der Steindruckfestigkeit weitgehend unabhängig. Der Unterschied zwischen Längsdruck-/Normdruckfestigkeit bei Vollsteinen entsteht zum einen dadurch, dass die Normdruckfestigkeit durch Umrechnung der Prüfwerte mittels Formfaktoren ermittelt und für die Längsdruckfestigkeit der Prüfwert ohne Formfaktor gewählt wurde. Zum anderen ist eine produktionsbedingte leichte Anisotropie möglich. Für Porenbeton ergibt sich eine Abnahme des Druckfestigkeitsverhältnisses gemäß dem Zusammenhang  $\beta_{D,st,l} / \beta_{D,st} = 0,91 - 0,04 \beta_{D,st}$  [10]. Auch hier ist ein Teil auf die Umrechnung mit Formfaktoren zurückzuführen, aber auch auf eine leichte Anisotropie durch den Herstellprozess. In den Bildern 1 a bis 1 d sind für verschiedene Steinsorten die Verhältnisse  $\beta_{D,st,l} / \beta_{D,st}$  in Abhängigkeit von der Normdruckfestigkeit  $\beta_{D,st}$  aufgetragen. Tabelle 1 gibt eine Zusammenfassung des derzeitigen Stands der Literatur wieder.

**2.1.2 Zugfestigkeiten**

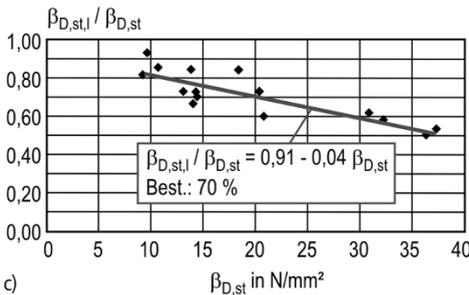
Für Mauerwerk mit Dickbettfuge (Normal- und Leichtmörtel) ist bei Druckbeanspruchung senkrecht



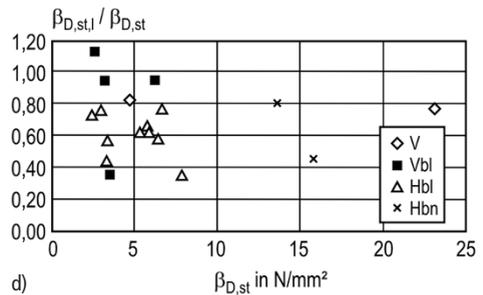
a)



b)



c)



d)

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

Tabelle 2. Verhältniswerte Steinzug-/Steindruckfestigkeit

Steinart	$\delta_1 = f_{bt,cal} / f_{st}$ DIN EN 1996-1-1/NA [7]	Mauerstein	$\beta_{z,l} / \beta_{D,st,prüf}$ [10]		
			Mittelwert	Wertebereich	Anzahl Versuchswerte
Hohlblocksteine	0,020	Hbl	0,08	0,05...0,13	8
		Hbl 2	0,09	0,07...0,13	5
		Hbl $\geq 4$	0,07	0,06...0,10	3
		Hbn	0,08	0,06...0,09	2
Hochlochsteine	0,026	HLz	0,03	0,13...0,41	20
		LHLz	0,01	0,002...0,019	54
		KS L	0,035	0,026...0,055	19
Steine mit Grifföchern und Griffaschen	0,026	KS(GL)	0,045	0,027...0,065	24
Vollsteine ohne Grifflöcher oder Griffaschen	0,032	KS	0,063	0,039...0,081	18
		Mz	0,04	0,01...0,08	9
		V, Vbl	0,08	0,04...0,21	23
		V2, Vbl2	0,11	0,06...0,18	16
		V, Vbl $\geq 4$	0,07	0,05...0,09	7
Porenbeton	$0,082 \cdot \frac{1}{1,25 \cdot \left(0,7 + \frac{f_{st}}{25}\right)^{0,5}}$	PB, PP	0,11	0,06...0,19	24
		PB2, PP2	0,18	0,13...0,20	7
		PB und PP 4, 6, 8	0,11	0,09...0,13	8

$f_{bt,cal}$  rechnerische Steinzugfestigkeit nach DIN EN 1996-1-1/NA  
 $f_{st}$  umgerechnete mittlere Steindruckfestigkeit nach DIN EN 1996-1-1/NA  
 $\beta_{z,l}$  Prüfwert der Steinzugfestigkeit in Richtung Steinlänge  
 $\beta_{D,st,prüf}$  Prüfwert der Steindruckfestigkeit in Richtung Steinhöhe

zur Lagerfuge bei bestimmten Verhältnissen Stein-/Mörteldruckfestigkeit wegen des entstehenden mehraxialen Spannungszustandes die Zugfestigkeit der Mauersteine eine für die Druckfestigkeit von Mauerwerk maßgebende Größe. Für die Schubtragfähigkeit und die Biegezugfestigkeit in Wandebene kann die Steinzugfestigkeit maßgebend werden. Es ist daher sehr hilfreich, etwas detailliertere Angaben im Vergleich zu den Normangaben zu erhalten. Bislang gilt, und dies ist in DIN EN 1996-1-1/NA [7] auch so von DIN 1053-1 [1] übernommen worden (2. Spalte der Tabelle 2), die Einteilung nach Hohlblocksteinen, Hochlochsteinen, Steinen mit Grifföchern oder Griffaschen, Vollsteinen ohne Grifflöcher oder Griffaschen. Hinzugenommen wurde in DIN EN 1996-1-1/NA [7] der Porenbetonstein. Die Prüfung der Zugfestigkeit ist relativ aufwendig. Eine Prüfnorm oder -richtlinie existiert zurzeit nicht (siehe aber [15]). Meist werden die Mauersteine in Richtung Steinlänge geprüft. Wesentliche Eigenschaftsunterschiede zwischen Steinlänge und -breite ergeben sich vor allem bei Lochsteinen mit richtungsorientierten Lochungen. Zugfestigkeitswerte in Richtung Steinbreite liegen nur für HLz vor (8 Werte, Wertebereich  $\beta_{z,b}/\beta_{D,st} = 0,003...0,026$ , Mittelwert: 0,009).

Sinnvollerweise werden die in Richtung Steinlänge bestimmten Zugfestigkeitswerte auf die in Richtung Steinhöhe geprüften Druckfestigkeitswerte bezogen als Verhältniswerte  $\beta_{z,l}/\beta_{D,st}$  angegeben.

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

Die beiden angeführten Verhältniswerte sind nicht direkt miteinander vergleichbar, da der Prüfwert jeweils noch mit Formbeiwerten zu versehen und näherungsweise beim Druck mit 0,8 und beim Zug mit 0,7 zu multiplizieren wäre, um auf die charakteristischen Werte zu kommen. Näherungsweise kann man aber die Verhältniswerte gleichsetzen (im Rahmen der hier vorliegenden Genauigkeit).

Für Vollsteine besteht wegen der versuchstechnisch sehr aufwendigen Bestimmung der einaxialen Längszugfestigkeit noch die Möglichkeit der Messung der Spaltzugfestigkeit. Allerdings gibt es für Mauersteine noch keinen einheitlichen Wert zur Umrechnung von der Spaltzugfestigkeit auf die Zugfestigkeit. Dieser Wert hängt erfahrungsgemäß von der Festigkeit ab. Näherungsweise gilt, dass das Verhältnis Spaltzugfestigkeit  $\beta_{sz,l}$  zu Zugfestigkeit  $\beta_{z,l}$  zwischen 1,1 und 1,3 liegt. Für Lochsteine ist nach Auffassung des Verfassers die Ermittlung

der Spaltzugfestigkeit [18] aus Gründen des Spannungszustands nicht sinnvoll anzuwenden.

**2.2 Verformungseigenschaften**

**2.2.1 Elastizitätsmodul senkrecht zur Lagerfuge unter Druckbeanspruchung**

Der Elastizitätsmodul der Mauersteine beeinflusst die Steifigkeit des Mauerwerks maßgeblich, er muss in den Fällen, in denen sie eine Rolle spielt, im Einzelfall nachgewiesen werden.

Der E-Modul ist als Sekantenmodul bei 1/3 der Höchstspannung (Druckspannung senkrecht zu den Lagerfugen) und einmaliger Belastung definiert:

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

mit

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

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

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

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

Der Verfasser empfiehlt, bei den wenigen Einzelfällen, wo der Elastizitätsmodul des Mauerwerks für Nachweise benötigt wird, z. B. Durchbiegung bei Brückenüberbauten, den Elastizitätsmodul von Steinen vor dem Vermauern bzw. bei bestehenden Bauwerken mittels Probenentnahme zu bestimmen und eine rechnerische Abschätzung vorzunehmen, wozu allerdings eine sehr große Erfahrung erforderlich ist.

**2.2.2 Elastizitätsmodul in Steinlängsrichtung unter Zugbeanspruchung**

Der Elastizitätsmodul der Mauersteine unter Zugbeanspruchung liegt erfahrungsgemäß in der gleichen Größenordnung wie der unter Druckbeanspruchung. Geringe Abweichungen sind in der Nichtlinearität der Spannungs-Dehnungslinien der Steinmaterialien begründet. Der Zug-E-Modul ist analog zum Druck-E-Modul als Sekantenmodul bei 1/3 der Höchstspannung (Zugfestigkeit) und einmaliger Belastung definiert. Zwischen dem Elastizitätsmodul und der Steinzugfestigkeit wurden folgende Zusammenhänge ermittelt [10] (Best.: Bestimmtheitsmaß):

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

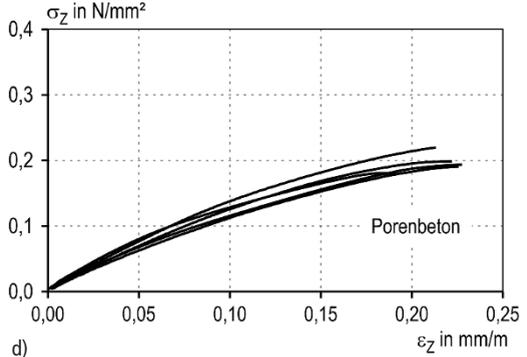
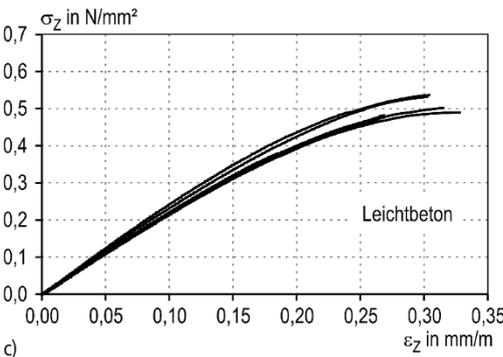
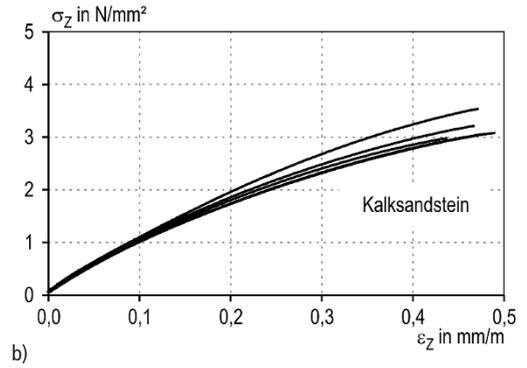
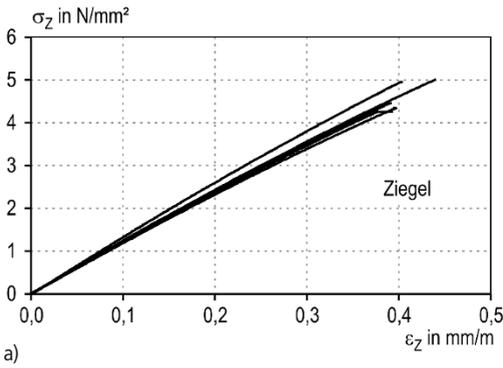


Bild 2. Spannungs-Dehnungslinien von Ziegeln (a), Kalksandstein (b), Leichtbeton (c) und Porenbeton (d)

**Tabelle 3.** Mauersteine; Querdehnungsmodul  $E_{q,l}$  in  $10^3$  N/mm<sup>2</sup>, Querdehnungszahl  $\mu$ , Anhaltswerte [19–22], aus [10]

Mauerstein	Festigkeitsklasse	$E_{q,l}$		$\mu$
		n	Wertebereich	
Hbl, Vbl	2...6	8	3,6...20	0,08...0,11
PB, PP	2...6	7	5,6...25	0,15
KS, KS L, KSHbl	8...28	12	12...100	
HLz	6	4	2,7...40	0,11...0,20
	8	8	12...59	
	12	4	31...55	
	48	–	133	

n Anzahl der Versuchswerte

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

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

Porenbetonsteine

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

(Zylinder, Prismen; 21 Mittelwerte)

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

(Zylinder; 11 Mittelwerte)

### 2.2.3 Spannungs-Dehnungslinie

In Bild 2 sind die Spannungs-Dehnungslinien von Ziegeln, Kalksandstein, Leichtbeton und Porenbeton, wie man sie am Vollmaterial ermittelt, beispielhaft dargestellt.

### 2.2.4 Querdehnungsmodul

Diese Kenngröße ist von maßgebender Bedeutung für die Drucktragfähigkeit von Mauerwerk. Bei einem ungünstigen Verhältnis der Querdehnungsmoduln von Mörtel und Stein wird letzterer stärker auf Zug beansprucht, was die Druckfestigkeit des Mauerwerks reduziert. Nach [10] können die Wertebereiche aus Tabelle 3 für den Querdehnungsmodul von Mauersteinen angegeben werden.

## 2.3 Dehnung aus Schwinden und Quellen, thermische Ausdehnungskoeffizienten

Für die Steinmaterialien selbst werden eher selten Formänderungswerte aus lastunabhängiger Beanspruchung angegeben, siehe z. B. [23, 24]. Bei einem Verbundwerkstoff wie Mauerwerk hängen Formänderungswerte sehr stark ab von den jeweiligen Anteilen; z. B. schwindet großformatiges Mauerwerk mit Dünnbettfuge anders als kleinformatiges mit Dickbettfuge. Für Abschätzungen wird daher auf Abschnitt 5.6.5 verwiesen.

## 3 Eigenschaftswerte von Mauermörteln

### 3.1 Allgemeines

Mauermörtel wird durch den Kontakt mit den Steinen in mehr oder weniger starkem Umfang beeinflusst. In aller Regel wird dem Mörtel Wasser entzogen, sodass nach einer gewissen Phase der Konsolidierung – entspricht quasi einer echten Reduktion des Wasserzementwertes – der Wasserentzug leere Poren hinterlässt, die sich festigkeitsmindernd auswirken. Insofern können Eigenschaftswerte, die an nicht beeinflusstem Mörtel ermittelt werden, für weiterführende Analysen und Abschätzungen meist nicht verwendet werden. Die zur Verfügung stehenden Daten werden nachfolgend aufgeführt und sind [10] entnommen.

### 3.2 Festigkeitseigenschaften

#### 3.2.1 Zugfestigkeit $\beta_Z$

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

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

#### 3.2.2 Scherfestigkeit $\beta_S$

Die Scherfestigkeit von Mauermörtel ist definiert als maximale Spannung bei einschrittiger Scherbeanspruchung. Ein genormtes Prüfverfahren existiert nicht. Üblicherweise wird die Scherfestigkeit an nach DIN EN 1015 hergestellten Mörtelprismen  $160 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$  geprüft. Dabei wird das Prisma senkrecht zur Prismenlängsachse auf Scheren beansprucht.

Die Scherfestigkeit von Mauermörtel ist z. B. von Interesse bei der rechnerischen Berücksichtigung von mit Mauermörtel verfüllten Mauersteinkanälen (Verfüllziegel-Mauerwerk) und beim rechnerischen Nachweis von Verankerungen mit Haken, z. B. bei zweischaligem Mauerwerk.

Mit den für diese Auswertung vorliegenden 11 Versuchswerten für Werk-Trockenmörtel, Werk-Frischmörtel und Rezeptmörtel ergeben sich folgende Zusammenhänge zwischen der Scherfestigkeit  $\beta_S$  und der Normmörteldruckfestigkeit  $\beta_D$ , ermittelt nach DIN EN 1015-11 [25] (Bereich für  $\beta_D$ : 4 bis 18 N/mm<sup>2</sup>):

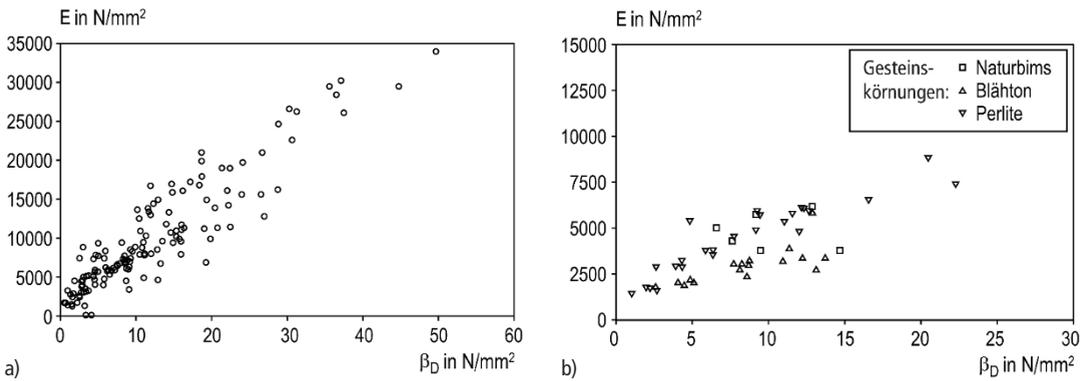
$$\beta_S = 0,55 \beta_D^{0,68} \quad (\text{Best.: } 89\%)$$

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

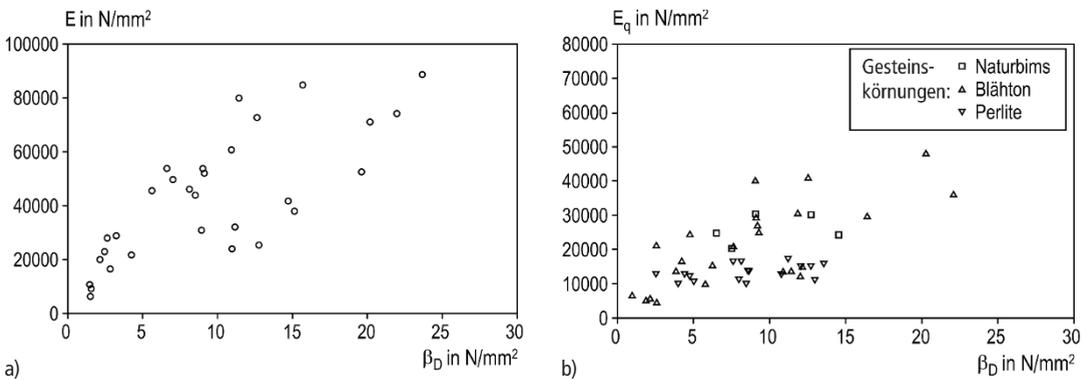
Die Auswertung einer Vielzahl von Festigkeitsprüfungen in [26] ergab

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

$$\beta_S = 2 \beta_Z$$



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



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

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

Mörtelart	n	$\rho_d$	$\beta_D$	$E_q$
		kg/dm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup>
Normalmörtel	49	1,1...1,9	1,5...24	1,2...116
Dünnbettmörtel	5	1,4...1,6	14...21	36...49
Leichtmörtel LM 21 (Zuschlag, Polystyrol, Perlite, Naturbims)	23	0,6...0,8	8,4...11,6	6,7...15
Leichtmörtel LM 36 (Zuschlag, Naturbims, Blähton, Bläh- schiefer)	36	0,8...1,2	4,0...21	16...48

n Anzahl Versuchswerte  
 $\rho_d$  Trockenrohddichte  
 $\beta_D$  Normdruckfestigkeit

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

Relative Luftfeuchte %	Rechenwerte	Wertebereich
	mm/m	
30	1,2	0,7...2,0
50	0,9	0,5...1,5
65	0,8	0,5...1,5
80	0,5	0,2...1,0