

2015

# MAUERWERK KALENDER



Bemessung  
Bauen im Bestand



2015

# MAUERWERK KALENDER

---

Bemessung  
Bauen im Bestand

---

Herausgegeben von  
Wolfram Jäger, Dresden

40. 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: Paasitorni Hotel & Conference Centre, Helsinki, Finnland

Foto: Marko Huttonen

Mit freundlicher Genehmigung von K2S Architects Ltd, Helsinki, Finnland

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.

© 2015 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 photoprint, microfilm, or any other means – nor transmitted or translated into a machine language without written permission from the publishers.

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.

Herstellung: pp030 – Produktionsbüro Heike Praetor, Berlin

Satz: Dörr + Schiller GmbH, Stuttgart

Druck: Medialis, Berlin

Bindung: Stein + Lehmann, Berlin

Printed in the Federal Republic of Germany

ISSN 0170-4958

Print ISBN 978-3-433-03106-3

oBook 978-3-433-60528-8

ePDF 978-3-433-60531-8

ePub 978-3-433-60530-1

eMobi 978-3-433-60529-5

## Vorwort

Der Mauerwerk-Kalender 2015 hat in seiner 40. Ausgabe schwerpunktmäßig die beiden Themen Bemessen von Mauerwerk und Bauen im Bestand zum Inhalt. Damit dem Leser dieses traditionsreichen Standardwerkes eine abwechslungsreiche Lektüre geboten wird, behandelt er wie immer auch weitere interessante Themen des Fachgebietes, bildet den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik ab und schreibt diesen fort.

- Im Bereich *Baustoffe · Bauprodukte* finden Sie den jährlich aktualisierten Grundlagenbeitrag Eigenschaftswerte von Mauersteinen, Mauermörtel, Mauerwerk und Putzen. Der bekannte Beitrag über den Mauerwerksbau mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung umfasst in dieser Ausgabe erstmals seit 2012 wieder alle erteilten Zulassungen des Fachgebietes als vollständige aktuelle Übersicht. Die Umstellung auf den Eurocode 6 ist in diesem Bereich noch nicht vollständig vollzogen, das heißt, ein Großteil der Zulassungen muss demnächst noch vom DIBt angepasst werden. Der Leser wird mit diesem Beitrag auf dem Laufenden gehalten.

- Die Abteilung *Konstruktion · Bauausführung · Bauwerkserhaltung* fällt der diesjährigen Schwerpunktsetzung des Mauerwerk-Kalenders entsprechend mit insgesamt 7 Beiträgen besonders umfangreich aus. Das 300 Jahre alte Herkulesbauwerk in Kassel besteht aus Tuffsteinmauerwerk und gehört zum Weltkulturerbe der UNESCO. Die statisch-konstruktive Bau- und wechselvolle Sanierungsgeschichte ist für den Leser sicher ebenso interessant wie die Beschreibung ausgewählter Maßnahmen der aktuellen Instandsetzung. Ein weiteres Thema ist das Verblendmauerwerk, das die Stadtbilder vieler nordeuropäischer Küstenstädte prägt. Der Beitrag zur zweischaligen Ausführung dieser Mauerwerksart gibt geeignete Handlungsempfehlungen zur fachkundigen Planung und sachgerechten handwerklichen Ausführung. Weitere Beiträge in dieser Rubrik befassen sich mit experimentellen Untersuchungen an Verpressankern in Ziegel- und Lehmsteinmauerwerk sowie der praxisgerechten Aufbereitung von Modellen für gemauerte Bögen, Gewölbe und Strebebögen. Die traditionelle Bautechnik der Trockenmauern ist Thema gleich zweier Beiträge, wobei einer den Schwerpunkt auf die technisch-statische Seite und die Berechnungsmodelle legt und ein weiterer eher die handwerkliche Seite betont. Der Beitrag zur Sicherung und Instandsetzung der Frauenkirche Dresden in der Zeit von 1918 bis 1932 bewertet und würdigt die Baumaßnahmen aus heutiger Sicht. Die aus dieser Zeit vorliegenden Erkenntnisse zum Bauwerk haben wesentlich die Planungen zu dessen Wiederaufbau beeinflusst bzw. dessen fachgerechte Ausführung unterstützt. Der Aufsatz ist auch eine Anerkennung des Mutes und der vollbrachten fachlichen Leistungen der Erbauer dieses einmaligen Bauwerkes sowie der an der Sanierung Beteiligten.

- Das Kapitel *Bemessung* bietet das Hintergrundwissen zur Entstehung der Druckfestigkeitswerte im EC6 und ermöglicht die europäische Fortschreibung bzw. Aktualisierung im Zuge der vor uns liegenden Revision des Normenpaketes. Ein weiterer Aufsatz diskutiert eine umfangreiche, erstmals durchgeführte Parameterstudie zur Tragfähigkeit von normalkraftbeanspruchten Wänden unter Berücksichtigung geringer Auflasten. Er stellt einen Beitrag zur aktuellen Diskussion um die Notwendigkeit des Nachweises dar und zeigt Wege auf, wie mit alternativen Modellen ggf. vorhandene Nachweislücken gefüllt werden können. Außerdem gibt er einen Einblick in das Zustandekommen der Forderungen im EC6 nach einer Mindestauflast von durch Wind beanspruchten Wänden und soll helfen, die bisher einfache Nachweisführung nach dem vereinfachten Verfahren für die wesentlichen Anwendungsgebiete beizubehalten. Auch der daran anschließende Beitrag widmet sich den wirtschaftlichen Potenzialen bei der Bemessung von Mauerwerk, jedoch auf einer anderen Grundlage – der vollprobabilistischen Zuverlässigkeitsanalyse.

- Die Rubrik *Bauphysik · Brandschutz* schildert aus ministerialer Sicht, wie die Energiestandards der Zukunft aussehen werden und welche unterstützenden Maßnahmen hierfür geplant sind.

- Im Bereich *Normen · Zulassungen · Regelwerk* stehen wie gewohnt die tabellarischen Übersichten zu den geltenden technischen Regeln für den Mauerwerksbau sowie das aktuelle Verzeichnis der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen (mit Angabe der wichtigsten statischen Werte sowie der Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit) zur Verfügung, welches nach dem Einsatzgebiet der jeweiligen Produkte gegliedert ist. Dem Verzeichnis folgt eine Liste, geordnet nach Zulassungsnummern und mit Verweisen auf die entsprechenden Seiten dieses Beitrags sowie auf die des Beitrags A II „Mauerwerksbau mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung“ aus dem Kapitel *Baustoffe · Bauprodukte*. Ein dritter Aufsatz behandelt die europäischen und nationalen rechtlichen Rahmenbedingungen für das Inverkehrbringen und die Verwendung von Bauprodukten sowie die Vorgehensweise bei der Umsetzung von harmonisierten Normen in das nationale Regelwerk.

- Mit dem Kapitel *Forschung* und dem jährlichen Überblick über die aktuelle Forschungssituation im Mauerwerksbau schließt wie gewohnt der Mauerwerk-Kalender.

Ich bedanke mich bei allen Beteiligten – sowohl bei den Autoren als auch beim Verlag – für die zuverlässige Mitarbeit und wünsche den Lesern eine spannende Lektüre der interessanten Beiträge des 40. Mauerwerk-Kalenders.

Dresden,  
im Februar 2015

Wolfram Jäger  
jj@jaeger-ingenieure.de



## Inhaltsübersicht

### A Baustoffe - Bauprodukte

- I Eigenschaften von Mauersteinen, Mauermörtel, Mauerwerk und Putzen 3  
Wolfgang Brameshuber, Aachen
- II Mauerwerksbau mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (abZ) 35  
Wolfram Jäger, Dresden und Roland Hirsch, Berlin

### B Konstruktion - Bauausführung - Bauwerkserhaltung

- I Statisch-konstruktive Instandsetzung am Tuffsteinmauerwerk des Herkulesmonuments in Kassel 237  
Ulrich Huster, Kassel
- II Zweischaliges Verblendmauerwerk 263  
Birger Gigla, Lübeck
- III Verpressanker für den Erdbeschutz von Gebäuden aus Mauerwerk – experimentelle Untersuchungen des Verbundverhaltens 293  
Lorenzo Miccoli, Berlin; Sara Paganoni, Bath, UK; Patrick Fontana, Berlin und Dina D’Ayala, London, UK
- IV Bautechnische Instandsetzungen der Dresdner Frauenkirche in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Teil 1: 1918–1932 309  
Hans-Joachim Jäger und Wolfram Jäger, Dresden
- V Tragverhalten und Berechnung gemauerter Bögen, Gewölbe und Strebepfeiler 343  
Berthold Alsheimer, Herrieden
- VI Historische Stützmauern 373  
Berthold Alsheimer, Herrieden
- VII Trockenmauerwerk – Renaissance einer traditionellen Bautechnik 397  
Ingrid Schegk, Haimhausen

### C Bemessung

- I Druckfestigkeit von Mauerwerk – zur statistischen Auswertung von Versuchsdaten mithilfe von Potenzfunktionen als Grundlage für den Eurocode 6 423  
Wolfram Jäger, Dresden und Anton Pech, Wien
- II Tragfähigkeit von normalkraftbeanspruchten Wänden unter Berücksichtigung geringer Auflasten 449  
Wolfram Jäger, Dresden
- III Wirtschaftliche Potenziale bei der Bemessung von Mauerwerksgebäuden – Wie sicher ist sicher genug? 559  
Eric Brehm, Bensheim

### D Bauphysik - Brandschutz

- I Standards der Zukunft: Verschärfung der EnEV, Förderung und Forschung 581  
Hans-Dieter Hegner, Berlin

**E Normen - Zulassungen - Regelwerk**

- I Geltende Technische Regeln für den Mauerwerksbau (Deutsche, Europäische und Internationale Normen) (Stand 30.9.2014) 599  
Peter Rauh, Berlin
- II Verzeichnis der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen für den Mauerwerksbau (Stand 31.8.2014) 617  
Wolfram Jäger, Dresden und Roland Hirsch, Berlin
- III Die Bauproduktenverordnung und ihre Bedeutung für das Inverkehrbringen und die Verwendung von Bauprodukten 733  
Matthias Springborn, Berlin

**F Forschung**

- I Übersicht über abgeschlossene und laufende Forschungsvorhaben im Mauerwerksbau 767  
Anke Eis und Sebastian Ortlepp, Dresden

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	III
<b>Autoren</b> .....	XVII
<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-Dehnungs-Linie .....	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 $\phi$ ) .....	9
4 Verbundeigenschaften zwischen Stein und Mörtel .....	9
4.1 Allgemeines .....	9
4.2 Haftscherfestigkeit .....	9
4.3 Haftzugfestigkeit .....	9
5 Eigenschaftswerte von Mauerwerk .....	13
5.1 Druckfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen .....	13
5.2 Druckfestigkeit parallel zu den Lagerfugen .....	20
5.3 Zugfestigkeit und -tragfähigkeit .....	20
5.4 Biegezugfestigkeit und -tragfähigkeit ...	21
5.5 Verformungseigenschaften .....	24
5.5.1 Allgemeines .....	24
5.5.2 Druckbeanspruchung senkrecht zu den Lagerfugen .....	24
5.5.2.1 Druck-E-Modul $E_D$ .....	24
5.5.2.2 Querdehnungszahl $\mu_D$ und Dehnung bei Höchstspannung $\varepsilon_{u,D}$ .....	26
5.5.2.3 Völligkeitsgrad $\alpha_0$ .....	26
5.5.3 Druckbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen .....	26
5.5.3.1 Druck-E-Modul $E_{D,p}$ .....	26
5.5.3.2 Dehnung bei Höchstspannung $\varepsilon_{u,D,p}$ ...	26
5.5.4 Zug-E-Modul $E_Z$ (Zugbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen) .....	27
5.5.5 Feuchtedehnung $\varepsilon_f$ , (Schwinden $\varepsilon_s$ , irreversibles Quellen $\varepsilon_q$ ), Kriechen (Kriechzahl $\phi$ ), Wärmedehnungskoeffizient $\alpha_T$ ..	27
6 Feuchtigkeitstechnische Kennwerte von Mauersteinen, Mauermörtel und Mauerwerk .....	28
6.1 Kapillare Wasseraufnahme .....	28
6.2 Wasserdampfdurchlässigkeit .....	29
7 Natursteine, Natursteinmauerwerk .....	29
8 Eigenschaftswerte von Putzen (Außenputz) .....	29
8.1 Allgemeines .....	29
8.2 Festigkeitseigenschaften .....	31
8.2.1 Druckfestigkeit $\beta_D$ .....	31
8.2.2 Zugfestigkeit $\beta_Z$ .....	31
8.3 Verformungseigenschaften .....	31
8.3.1 Zug-E-Modul $E_Z$ , dynamischer E-Modul $\text{dyn } E$ .....	31
8.3.2 Zugbruchdehnung $\varepsilon_{Z,u}$ .....	31
8.3.3 Zugrelaxation $\psi$ .....	31
8.3.4 Schwinden $\varepsilon_s$ , Quellen $\varepsilon_q$ .....	31
8.4 Eigenschaftszusammenhänge .....	31
9 Literatur .....	32

<b>II</b>	<b>Mauerwerksbau mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (abZ)</b> .....	<b>35</b>		
	Wolfram Jäger, Dresden und Roland Hirsch, Berlin			
	Vorbemerkungen .....	35	4	Vorgefertigte Wandtafeln .....
			4.1	Geschosshohe Mauertafeln .....
			4.2	Drittel- oder halbggeschosshohe Mauertafeln .....
			4.3	Verguss- und Verbundtafeln .....
			5	Geschosshohe Wandtafeln .....
			6	Schalungsstein-Bauarten .....
			6.1	Konstruktion und Baustoffe .....
			6.1.1	Konstruktion .....
			6.1.2	Steine .....
			6.1.3	Mörtel .....
			6.1.4	Füllbeton .....
			6.2	Herstellung des Mauerwerks auf der Baustelle, Konstruktion .....
			6.3	Entwurf und Berechnung .....
			6.4	Wärmeschutz .....
			6.5	Brandschutz .....
			6.6	Sonderfälle von Schalungsstein-Bauarten
			7	Trockenmauerwerk .....
			8	Mauerwerk mit PU-Kleber .....
			8.1	Planziegel .....
			8.2	Planverfüllziegel .....
			8.3	Porenbeton-Plansteine .....
			9	Bewehrtes Mauerwerk .....
			9.1	Bewehrung für bewehrtes Mauerwerk ...
			9.2	Hochlochziegel für bewehrtes Mauerwerk .....
			9.3	Stürze .....
			10	Ergänzungsbauteile .....
			10.1	Mauerfuß-Dämmelemente .....
			10.2	Anker zur Verbindung der Mauerwerks- schalen von zweischaligen Außenwänden
			10.3	Sonstige Ergänzungselemente .....
			11	Literatur .....
			12	Bildnachweis .....
				146
				146
				155
				156
				159
				163
				163
				163
				164
				166
				166
				166
				167
				168
				168
				168
				176
				176
				185
				189
				192
				192
				195
				195
				214
				214
				219
				229
				232
				234
<b>B</b>	<b>Konstruktion • Bauausführung • Bauwerkserhaltung</b>			
<b>I</b>	<b>Statisch-konstruktive Instandsetzung am Tuffsteinmauerwerk des Herkulesmonuments in Kassel</b> .....			<b>237</b>
	Ulrich Huster, Kassel			
	1 Baugeschichte .....	237	1.2.3	Ertüchtigungs- und Instandsetzungs- phase 3 zwischen 1923 und 1939 .....
	1.1 Erbauung .....	237	1.2.4	Ertüchtigungs- und Instandsetzungs- phase 4 zwischen 1951 und 1971 .....
	1.2 Instandsetzungsgeschichte .....	238	1.2.5	Aktuelle Instandsetzungsphase .....
	1.2.1 Ertüchtigungs- und Instandsetzungs- phase 1 zwischen 1714 und 1850 .....	239		242
	1.2.2 Ertüchtigungs- und Instandsetzungs- phase 2 zwischen 1864 und 1870 .....	240		

2.1	Wände	244	7.3	Nachberechnung der Versuche	253
2.2	Pfeiler	244	8	Verwendung von mangelbehafteten Tuffsteinen durch differenzierte Qualitätseinstufung in niedrig beanspruchten Bauwerksbereichen als Beitrag zur Ressourcenschonung und Beschleunigung des Bauablaufs	256
2.3	Bögen und Gewölbe	244	9	Entwicklung von Kunststoff als Beitrag zur Ressourcenschonung	258
3	Baustoff Tuffstein: Eigenschaften und Ressourcen	245	10	Instandsetzung und Ertüchtigung: Verankerung und Vernadelung des Felsenmauerwerks	259
4	Bestands- und Schadensuntersuchungen	247	11	Einbau eines Speichenrades als Ertüchtigungselement	260
5	Schäden und Schadensursachen	248	12	Zusammenfassung und Ausblick	261
6	Statische Untersuchung	249	13	Literatur	261
6.1	Modellierung Hofinnenwand	250	14	Bildnachweis	262
7	Druckfestigkeitsversuche an nachgestellten Mauerwerkskörpern als Grundlage zur Minimierung des statisch begründeten Ertüchtigungsbedarfs	251			
7.1	Versuchsaufbau	251			
7.2	V Versuchsergebnisse	252			
7.2.1	Versuchsergebnisse Kuhberg	252			
7.2.2	Versuchsergebnisse Steine aus anderen Brüchen	252			
<b>II</b>	<b>Zweischaliges Verblendmauerwerk</b> Birger Gigla, Lübeck	263			
1	Einführung	263	6	Hinweise zur Ausführung	280
2	Grundsätzliche technische Regeln und Stand der Baupraxis in Norddeutschland	264	6.1	Mauersteine	280
2.1	Zweischaliges Verblendmauerwerk	264	6.2	Mörtel	281
2.2	Tragende Innenschale	266	6.3	Dehnungsfugen und Lüftungsöffnungen	282
2.3	Verblendschale	266	6.4	Schalenzwischenraum: Abdichtung	283
2.4	Schalenzwischenraum	270	6.5	Schalenzwischenraum: Kerndämmung und Drahtanker	285
3	Dauerhaftigkeit der Verblendschale	272	6.6	Tragschale und Abfangungen	285
4	Energiesparender Wärmeschutz	273	6.7	Reinigung und Beschichtung der Verblendschale	286
5	Eindringen von Feuchte durch Schlagregen	273	6.8	Nachhaltigkeit	287
			7	Zusammenfassung	287
			8	Literatur	288
<b>III</b>	<b>Verpressanker für den Erdbebenschutz von Gebäuden aus Mauerwerk – experimentelle Untersuchungen des Verbundverhaltens</b> Lorenzo Miccoli, Berlin; Sara Paganoni, Bath, UK; Patrick Fontana, Berlin und Dina D’Ayala, London, UK	293			
1	Einführung	293	3	Ankerauszugversuche	298
2	Ankersysteme und Prüfkörperherstellung	294	3.1	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	298
2.1	Ankersysteme	294	3.2	V Versuchsergebnisse	300
2.2	Prüfkörperherstellung	296	4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	307
2.2.1	Mauerwerk	296	5	Literatur	307
2.2.2	Herstellung der Anker	296			

<b>IV</b>	<b>Bautechnische Instandsetzungen der Dresdner Frauenkirche in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Teil 1: 1918–1932</b> .....	309			
	Hans-Joachim Jäger und Wolfram Jäger, Dresden				
	Vorbemerkungen .....	309	2.3	Sanierung der Emporen 1929–1931 .....	329
1	Einführung .....	310	2.4	Ertüchtigung der Pfeiler 1931/32 .....	331
1.1	Ausgangssituation ab 1918 .....	311	2.5	Zur Wiederherstellung des Innenraums und der Raumfarbigkeit sowie die Wiederweihe 1932 .....	334
1.2	Anlass für nun notwendige Arbeiten 1924 .....	314	2.6	Dokumentation der Leistungen .....	335
1.3	Wichtige Voraussetzung: Einwerbung finanzieller Mittel .....	316	3	Zusammenfassende Beurteilung von Befundergebnissen und Restaurierungsmaßnahmen .....	337
2	Bauzustands- und Schadenserfassung, Analysen und abgeleitete Maßnahmen ..	317	4	Literatur .....	339
2.1	Restaurierung der Laterne 1924/25 .....	323			
2.2	Instandsetzungen an Kuppel, Kuppelanlauf, Gesimsen, Außenwänden und Erdgeschosssockel 1926–1929 .....	325			
<b>V</b>	<b>Tragverhalten und Berechnung gemauerter Bögen, Gewölbe und Strebepfeiler</b> .....	343			
	Berthold Alsheimer, Herrieden				
1	Vorbemerkungen .....	343	4.2	Berücksichtigung des Teilsicherheitskonzeptes .....	354
2	Tragverhalten von Mauerwerk .....	343	4.3	Einfluss der Hinterfüllung auf die Tragfähigkeit gemauerter Bogenkonstruktionen .....	354
2.1	Der Traglastansatz von <i>Heyman</i> als einfaches Modell .....	343	5	Tragverhalten von gemauerten Gewölbekonstruktionen .....	363
2.2	Grundsätzliche Fragestellungen .....	344	6	Zur Tragfähigkeit und Sicherheit gemauerter Strebepfeiler .....	365
2.3	Stützlinie versus Seillinie .....	347	6.1	Tragverhalten des lotrechten rechteckigen Strebepfeilers .....	366
3	Normative Festlegungen in DIN 1053 bzw. DIN EN 1996-1-1 (EC6) .....	350	6.2	Tragverhalten des geneigten rechteckigen Strebepfeilers .....	367
4	Stützlinienverfahren zur Beurteilung gemauerter Bogen (Tonnengewölbe) .....	350	7	Literatur .....	370
4.1	Berechnungen unter Anwendung einer zulässigen Ausmitte und eines Spannungsnachweises .....	350			
<b>VI</b>	<b>Historische Stützmauern</b> .....	373			
	Berthold Alsheimer, Herrieden				
1	Einleitung .....	373	3	Untersuchungen .....	379
2	Schadensbilder und -mechanismen .....	374	3.1	Kartierung der Schadensbilder und Erkundungen .....	379
2.1	Innere und äußere Standsicherheit .....	374	3.2	Einstufung von Stützmauern in Geotechnische Kategorien .....	380
2.2	Ausbauchungen .....	374	4	Erddruckbelastung und Nachweise nach DIN EN 1997-1 mit DIN 1054 .....	380
2.3	Überhänge .....	375	4.1	Erddruckbelastung .....	381
2.4	Rissbildung .....	375	4.2	Nachweise nach DIN EN 1997-1:2009-09 in Verbindung mit DIN 1054:2010-12 .....	383
2.5	Versagensmechanismus unter Annahme einer starren Mauer .....	376	5	Grundsätzliche Sanierungsmöglichkeiten .....	383
2.6	Beispiele .....	377	5.1	Stabilisierung historischer Stützmauern ..	383
2.6.1	Stadtmauer in Fritzlär – Verlust der äußeren Standsicherheit .....	377	5.2	Entlastung historischer Stützmauern .....	386
2.6.2	Starkenburg (Odenwald) – Verlust der inneren Standsicherheit .....	378	5.3	Verringerung der Wandhöhe .....	386
2.6.3	Schloss Lichtenberg (Odenwald) – Verlust der inneren Standsicherheit .....	378			

5.4	Festlegen eines Sanierungskonzeptes . . . .	387	6.4	Neue Empfehlungen für Trockenmauern aus Naturstein in Deutschland . . . . .	394
6	Ansätze zur Beurteilung der inneren Standsicherheit . . . . .	388	7	Entwässerung . . . . .	394
6.1	Grundlagen . . . . .	388	8	Literatur . . . . .	394
6.2	Gleichgewichtsmethode (Limit equilibrium method) . . . . .	389	9	Bildnachweise . . . . .	396
6.3	Discontinuity layout optimization (DLO) als numerische Methode für den Grenz-zustand der Tragfähigkeit . . . . .	392			
<b>VII</b>	<b>Trockenmauerwerk – Renaissance einer traditionellen Bautechnik</b> . . . . .	<b>397</b>			
	Ingrid Schegk, Haimhausen				
1	Einführung . . . . .	397	3.2	Europäische Entwicklungen . . . . .	404
2	Geschichtliche Entwicklung und Bedeutung . . . . .	397	3.2.1	Transnationale Projekte . . . . .	405
2.1	Die Ursprünge . . . . .	397	3.2.2	Internationale Kongresse der SDS . . . . .	405
2.1.1	Megalithkultur . . . . .	397	3.2.3	Wissenstransfer durch die Stiftung Umwelt-Einsatz Schweiz . . . . .	406
2.1.2	Rundbauten . . . . .	398	3.3	Projekte in Deutschland . . . . .	406
2.2	Bedeutung in der Baukunst der Hochkulturen . . . . .	399	3.3.1	Historische Weinberge . . . . .	406
2.2.1	Natursteinbaukunst der vorrömischen Zeit . . . . .	399	3.3.2	Praxisnahe Publikationen . . . . .	408
2.2.2	Römische Innovationen . . . . .	399	4	Trockenmauern in der Praxis . . . . .	408
2.3	Trockenmauern in der Kulturlandschaft . . . . .	399	4.1	Umweltwirkung . . . . .	408
2.3.1	Vernakuläre Baukultur . . . . .	399	4.1.1	Energiebilanz . . . . .	408
2.3.2	Trockenmauern und Weinbau . . . . .	399	4.1.2	Lebensraumfunktion . . . . .	408
2.4	Trockenmauern als Infrastrukturelement und Ingenieurbauwerk . . . . .	400	4.2	Regelwerk . . . . .	409
2.4.1	Trockenmauern und Eisenbahn . . . . .	400	4.2.1	Normen . . . . .	409
2.4.2	Trockenmauern im Straßenbau . . . . .	402	4.2.2	Bautechnische Informationen des DNV . . . . .	409
2.5	Trockenmauern in der Landschaftsarchitektur . . . . .	402	4.2.3	Empfehlungen der FLL . . . . .	409
2.6	Verlust und Renaissance . . . . .	403	4.3	Bemessung . . . . .	409
2.6.1	Landschaftswandel . . . . .	403	4.3.1	Abmessungen . . . . .	411
2.6.2	Landschaftsschutz . . . . .	403	4.3.2	Mauerwichte . . . . .	411
3	Trockenmauern als Forschungsgegenstand . . . . .	403	4.3.3	Bemessungshilfen der FLL . . . . .	411
3.1	Historische Ansätze . . . . .	404	4.4	Handwerksgerechte Bauausführung . . . . .	413
3.1.1	Antike . . . . .	404	4.4.1	Steintypen . . . . .	413
3.1.2	Weinbau . . . . .	404	4.4.2	Gründung und Entwässerung . . . . .	413
3.1.3	Militär . . . . .	404	4.4.3	Mauerwerksverband . . . . .	414
3.1.4	Verkehr . . . . .	404	4.5	Instandhaltung . . . . .	415
3.1.5	Kulturwissenschaft . . . . .	404	4.5.1	Inspektion und Wartung . . . . .	415
			4.5.2	Instandsetzung und Verbesserung . . . . .	416
<b>C</b>	<b>Bemessung</b>		5	Fazit und Ausblick . . . . .	417
<b>I</b>	<b>Druckfestigkeit von Mauerwerk – zur statistischen Auswertung von Versuchsdaten mithilfe von Potenzfunktionen als Grundlage für den Eurocode 6</b> . . . . .	<b>423</b>	6	Literatur . . . . .	417
	Wolfram Jäger, Dresden und Anton Pech, Wien		7	Bildquellen . . . . .	419
1	Einführung . . . . .	423	3	Generelle Anmerkungen zur Bestimmung der K-Faktoren und freien Exponenten . . . . .	424
2	Bestimmung der charakteristischen Druckfestigkeit von Mauerwerk nach EN 1996-1-1 . . . . .	423	4	Auswertung einer Datenbasis . . . . .	424

4.1	Sichtung und ggf. Korrektur der Versuchswerte	424	4.3.1	Vorgehen bei festen Exponenten	429
4.2	Direkte Ermittlung von $K$ , $\alpha$ und $\beta$ aus Versuchswerten	427	4.4	Vorgehen bei variablen Exponenten	430
4.2.1	Allgemeine Beschreibung der Mauerwerksfestigkeit mittels Potenzfunktion	427	4.5	Umgang mit Grenzwerten	430
4.2.2	Näherungsfunktion für den Mittelwert der Wandfestigkeit	427	5	Häufigkeit der Prüfwerte und deren Verteilung	431
4.2.3	Streuungsfunktion	428	6	Beispiele	431
4.2.4	Funktion der Quantilwerte	429	6.1	Direkte Ermittlung	431
4.3	Empirische Ermittlung aus Versuchswerten unter Zugrundelegung der Zusammenhänge aus der Statistik	429	6.2	Empirische Ermittlung mit festen Exponenten	433
			7	Diskussion der Ergebnisse	433
			8	Literatur	447
<b>II</b>	<b>Tragfähigkeit von normalkraftbeanspruchten Wänden unter Berücksichtigung geringer Auflasten</b>	<b>449</b>			
	Wolfram Jäger, Dresden				
1	Ausgangspunkt	449	4.1.5	In der Mitte der Wand mit der Knickabminderung nach DIN EN 1996-1-1/NA Anhang NA.G (bilinare Kurvenschar)	466
1.1	Normenlage	449	4.1.6	In Wandmitte mit der Knickabminderung nach DIN EN 1996-1-1, Anhang G (Glockenkurve)	468
1.1.1	DIN EN 1996-3 und NA	449	4.1.7	Zusammenfassung	469
1.1.2	DIN EN 1996-1-1 und NA	451	4.2	Tragverhalten von Wänden unter nicht ausreichender Auflast und Momentenbeanspruchung	471
1.2	Nachweis einer Mindestauflast nach DIN EN 1996-3/NA-A2	456	4.2.1	Bei Vorhandensein von Stahlbetondecken	471
1.3	Beanspruchung von Außenwänden aus Wind	457	4.2.2	Beim Fehlen einer Massivdecke	475
1.4	Rückblick auf die Entwicklung des vereinfachten Nachweises nach DIN EN 1996-3	458	5	Parameterstudie	476
1.4.1	Ausarbeitungen von <i>Beuker</i>	458	5.1	Lastkombinationen	476
1.4.2	Ausarbeitungen von <i>Reehl/Schlund</i> sowie <i>Jäger/Baier</i>	459	5.2	Einfluss von Winddruck und Windsog	476
1.4.3	<i>Jäger/Baier</i>	460	5.3	Rücksetzregel	479
1.4.4	Abminderungsfaktoren für das vereinfachte Verfahren nach <i>Mann</i> in DIN 1053-1	460	5.4	Bogenmodell	479
2	Kritik	461	5.5	Materialkombinationen und Ansätze	481
3	Konsequenzen aus der Forderung nach einer Mindestauflast	461	5.5.1	Mit Knickformel nach NA	481
3.1	Erhöhung der Anzahl der Nachweistellen	462	5.5.2	Mit Knickformel nach EC 6	481
3.2	Konsequenzen aus der Nichteinhaltung nach dem vereinfachten Verfahren	462	5.6	System und Geometrie	482
4	Genauere Hintergründe zum Tragverhalten und dessen Beschreibung	463	5.7	Voll aufliegende Deckenplatte	482
4.1	Tragfähigkeit gemauerter Wände unter Normalkraft und Moment aus Wind	463	5.7.1	Windlast-Nr. 3 – Winddruck	482
4.1.1	Allgemeiner Ansatz eines Abminderungsfaktors	463	5.7.1.1	Wind als Leiteinwirkung, Wandhöhe $h = 2,75$ m	483
4.1.2	Der Wand-Decken-Knoten und die Bestimmung der inneren Momente	463	5.7.1.2	Wind als Leiteinwirkung, Wandhöhe $h = 12 \cdot t$	497
4.1.3	Rücksetzregel	464	5.7.1.3	Wind als Begleiteinwirkung	507
4.1.4	Am Kopf und Fuß der Wand	465	5.7.2	Windlast-Nr. 3 – Windsog	509
			5.7.2.1	Wind als Leiteinwirkung	509
			5.8	Teilweise aufliegende Deckenplatte	519
			5.8.1	Windlast-Nr. 3 – Winddruck	519
			5.8.1.1	Wind als Leiteinwirkung	519
			5.8.2	Windlast-Nr. 3 – Windsog	527
			5.8.2.1	Wind als Leiteinwirkung, $h = 2,88$ m	527
			5.8.2.2	Wind als Leiteinwirkung, $h = 12$ t	538

5.8.2.3	Wind als Begleiteinwirkung	546	5.9.1	Windsog	553
5.8.3	Nachweis ohne Wind	550	5.9.2	Winddruck	553
5.9	Nachweis eines kritischen Falles mit dem Bogenmodell	553	5.10	Auswertung und Schlussfolgerungen	554
6			6	Quellen und Literatur	555
<b>III</b>	<b>Wirtschaftliche Potenziale bei der Bemessung von Mauerwerksgebäuden – Wie sicher ist sicher genug?</b>				559
	Eric Brehm, Bensheim				
1	Einleitung	559	4.3	Auswertung der Versuchsdatenbank	567
2	Zuverlässigkeit von Gebäuden	559	5	Stochastisches Modell	567
3	Tragverhalten von Aussteifungsscheiben aus unbewehrtem Mauerwerk	561	6	Durchführung der Zuverlässigkeitsanalyse	569
4	Vorhersage der Querkrafttragfähigkeit und Modellunsicherheiten	562	7	Auswertung der Ergebnisse	571
4.1	Statisches System	562	7.1	Vorgehensweise	571
4.2	Vorhersagemodelle	563	7.2	Theoretischer Wert der vorhandenen Zuverlässigkeit	571
4.2.1	Notation	563	7.3	Realistischer Wert der vorhandenen Zuverlässigkeit	572
4.2.2	Bemessungsmodell nach DIN 1053-1 und DIN 1053-100	564	8	Optimaler Wert der Zuverlässigkeit unter volkswirtschaftlichen Aspekten	574
4.2.3	Bemessungsmodell nach DIN EN 1996-1-1/NA (Entwurf)	565	9	Zusammenfassung	576
4.2.4	Berechnungsmodelle nach <i>Mann</i> und <i>Müller</i> und nach <i>Kranzler</i>	566	10	Literatur	577
4.2.5	Anmerkungen zu den unterschiedlichen Traglasten nach DIN 1053-1 und DIN 1053-100	566			
<b>D</b>	<b>Bauphysik - Brandschutz</b>				
<b>I</b>	<b>Standards der Zukunft: Verschärfung der EnEV, Förderung und Forschung</b>				581
	Hans-Dieter Hegner, Berlin				
1	Wirtschafts- und klimapolitische Ausgangslage	581	4	Neue Standards für energieeffizientes Bauen	591
2	Die Bauforschung des Bundesbauministeriums	585	5	Staatliche Förderung der Gebäudeenergieeffizienz	594
3	Neue ordnungsrechtliche Vorschriften in Kraft: die Energieeinsparverordnung (EnEV) 2014	586			
<b>E</b>	<b>Normen - Zulassungen - Regelwerk</b>				
<b>I</b>	<b>Geltende Technische Regeln für den Mauerwerksbau (Deutsche, Europäische und Internationale Normen) (Stand 30.9.2014)</b>				599
	Peter Rauh, Berlin				
1	Vorbemerkung	599	2.1	Vorwort	600
2	Erläuterungen zur Anwendung des Eurocodes 6: „Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten“ vor der Bekanntmachung als Technische Baubestimmung	600	2.2	Allgemeines	600
			2.3	Tragwerksbemessung für Normaltemperatur	600
			2.3.1	Es sind folgende Normenteile bei der Anwendung zu berücksichtigen:	600

2.3.2	Bei Anwendung von DIN EN 1996-1-1 in Verbindung mit DIN EN 1996-1-1/NA ist zusätzlich Folgendes zu beachten: . . . . .	601	2.4	Tragwerksbemessung für den Brandfall . . .	601
2.3.3	Bei Anwendung der vereinfachten Berechnungsmethoden nach DIN EN 1996-3 in Verbindung mit DIN EN 1996-3/NA ist zusätzlich Folgendes zu beachten: . . . . .	601	2.5	Zur Anwendbarkeit des Eurocode 6 bei der Bemessung von Mauerwerk mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (Übergangsregeln) . . . . .	601
			3	Regelwerk . . . . .	602
<b>II</b>	<b>Verzeichnis der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen für den Mauerwerksbau (Stand 31.8.2014)</b> . . . . .	<b>617</b>			
	Wolfram Jäger, Dresden und Roland Hirsch, Berlin				
1	Mauerwerk mit Normal- oder Leichtmörtel . . . . .	619	2.2.4	Beton-Planelemente . . . . .	697
1.1	Mauersteine üblichen Formates . . . . .	619	2.3	Wandbauart aus Planelementen in drittel- oder halbgoschosshoher Ausführung . . . . .	700
1.1.1	Mauerziegel . . . . .	619	2.4	Weitere Dünnbettmörtel . . . . .	701
1.1.2	Verfüllziegel . . . . .	627	3	Mauerwerk mit Mittelbettmörtel . . . . .	702
1.1.3	Kalksandsteine . . . . .	628	4	Vorgefertigte Wandtafeln . . . . .	703
1.1.4	Betonsteine . . . . .	629	4.1	Geschosshohe Mauertafeln . . . . .	703
1.1.4.1	Vollsteine und Vollblöcke . . . . .	629	4.2	drittel- oder halbgoschosshohe Mauertafeln . . . . .	705
1.1.4.2	Hohlblocksteine . . . . .	632	4.3	Verguss- und Verbundtafeln . . . . .	706
1.1.4.3	Hohlblocksteine mit integrierter Wärmedämmung . . . . .	633	5	Geschosshohe Wandtafeln . . . . .	706
1.1.5	Sonstige Mauersteine . . . . .	633	6	Schalungsstein-Bauarten . . . . .	707
2	Mauerwerk mit Dünnbettmörtel . . . . .	634	7	Trockenmauerwerk . . . . .	708
2.1	Plansteine üblichen Formates und dafür zugelassene Dünnbettmörtel . . . . .	634	8	Mauerwerk mit PU-Kleber . . . . .	709
2.1.1	Planziegel . . . . .	634	9	Bewehrtes Mauerwerk . . . . .	712
2.1.2	Planziegel mit integrierter Wärmedämmung . . . . .	651	9.1	Bewehrung für bewehrtes Mauerwerk . . . . .	712
2.1.3	Planverfüllziegel . . . . .	660	9.2	Hochlochziegel für bewehrtes Mauerwerk . . . . .	712
2.1.4	Kalksand-Plansteine . . . . .	663	9.3	Stürze . . . . .	712
2.1.5	Porenbeton-Plansteine . . . . .	666	10	Ergänzungsbauteile . . . . .	714
2.1.6	Beton-Plansteine . . . . .	669	10.1	Mauerfuß-Dämmelemente . . . . .	714
2.1.6.1	Planvollsteine und Planvollblöcke . . . . .	669	10.2	Anker zur Verbindung der Mauerwerksschalen von zweischaligen Außenwänden . . . . .	715
2.1.6.2	Planhohlblocksteine . . . . .	677	10.3	Sonstige Ergänzungselemente . . . . .	716
2.1.6.3	Plansteine aus Leichtbeton mit integrierter Wärmedämmung . . . . .	682	Anhang . . . . .		717
2.2	Planelemente und dafür zugelassene Dünnbettmörtel . . . . .	689	Zulassungsübersicht . . . . .		717
2.2.1	Planziegel-Elemente . . . . .	689			
2.2.2	Kalksand-Planelemente . . . . .	690			
2.2.3	Porenbeton-Planelemente . . . . .	696			
<b>III</b>	<b>Die Bauproduktenverordnung und ihre Bedeutung für das Inverkehrbringen und die Verwendung von Bauprodukten</b> . . . . .	<b>733</b>			
	Matthias Springborn, Berlin				
1	Einführung . . . . .	733	2.1	Grundanforderungen und Wesentliche Merkmale . . . . .	735
1.1	Hintergrund der europäischen Harmonisierung . . . . .	733	2.2	Leistungserklärung und CE-Kennzeichnung . . . . .	736
1.2	Historie der Bauproduktenverordnung . . . . .	733	2.3	Harmonisierte Spezifikationen nach der Bauproduktenverordnung . . . . .	736
1.3	Der Neue Ansatz . . . . .	734	2.3.1	Harmonisierte Normen . . . . .	736
2	Die Bauproduktenverordnung und ihre Besonderheiten . . . . .	735	2.3.1.1	Mandate . . . . .	736

2.3.1.2	Der Aufbau harmonisierter Normen nach der Bauproduktenverordnung . . . . .	737	3.2.4	Die weitere Konkretisierung des Verfahrens durch die EOTA . . . . .	751
2.3.1.3	Einige typische Mängel in harmonisierten Normen . . . . .	737	3.2.5	Vertraulichkeit, Wahrung des Geschäftsgeheimnisses . . . . .	755
2.3.2	Europäische Bewertungsdokumente und Europäische Technische Bewertungen . . . . .	739	3.2.6	Verfahrensänderungen und -anpassungen . . . . .	755
2.4	Vollständigkeit der Wesentlichen Merkmale in harmonisierten Spezifikationen . . . . .	740	3.2.7	Wie ist der Stand der Beratung hinsichtlich Befristung, Zurückziehung, Änderung von Europäischen Bewertungsdokumenten und Europäischen Technischen Bewertungen? . . . . .	755
2.5	Formale Einwände gegen harmonisierte Spezifikationen, Schutzklauselverfahren . . . . .	741	3.3	Die Europäische Organisation für Technische Bewertung . . . . .	756
2.6	Bewertung und Überprüfung der Leistungsbeständigkeit . . . . .	742	3.3.1	Aufgaben . . . . .	756
2.7	Notifizierung von Stellen . . . . .	743	3.3.2	Struktur . . . . .	757
2.8	Vereinfachte Verfahren . . . . .	743	3.3.2.1	Organisationsform . . . . .	757
2.9	Der Ständige Ausschuss für das Bauwesen . . . . .	744	3.3.2.2	Mitglieder . . . . .	757
2.10	Produktinformationsstellen für das Bauwesen . . . . .	744	3.3.2.3	Kompetenzen im Rahmen der Mitgliedschaft . . . . .	758
2.11	Übergangsregelungen . . . . .	744	3.3.3	Die Gremien der EOTA . . . . .	758
2.12	Andere für Bauprodukte relevante Harmonisierungsrechtsakte . . . . .	744	3.3.3.1	General Assembly . . . . .	758
3	Europäisches Bewertungsdokument und Europäische Technische Bewertung . . . . .	745	3.3.3.2	Executive Board . . . . .	759
3.1	Funktion der Europäischen Technischen Bewertung und Verfahren zu ihrer Erarbeitung . . . . .	745	3.3.3.3	Technical Board . . . . .	759
3.1.1	Die Funktion der Europäischen Technischen Bewertung . . . . .	745	3.3.3.4	Working Groups . . . . .	759
3.1.2	Das Verfahren zur Ausstellung einer Europäischen Technischen Bewertung . . . . .	746	3.3.4	Die Finanzierung der EOTA . . . . .	759
3.1.3	Grundlagen und Bedeutung der Europäischen Technischen Bewertung . . . . .	747	3.3.5	Die Situation zum 1. Juli 2013 . . . . .	760
3.1.3.1	Für welche Bauprodukte kann eine Europäische Technische Bewertung ausgestellt werden? . . . . .	747	4	Vorgehensweise bei der Umsetzung harmonisierter technischer Spezifikationen in Deutschland . . . . .	760
3.1.3.2	Charakter der Europäischen Technischen Bewertung . . . . .	747	4.1	Klage der Kommission gegen die Bundesrepublik Deutschland . . . . .	760
3.2	Funktion der Europäischen Bewertungsdokumente und das Verfahren für ihre Erstellung und Annahme . . . . .	748	4.2	Baurechtliche Instrumente . . . . .	760
3.2.1	Funktion des Europäischen Bewertungsdokuments . . . . .	748	4.3	Anpassung nationaler Vorschriften zur Verwendung von Bauprodukten an harmonisierte europäische technische Spezifikationen . . . . .	760
3.2.2	Zuschnitt und Inhalt eines Europäischen Bewertungsdokuments . . . . .	749	4.3.1	Anwendungsnormen und -zulassungen . . . . .	760
3.2.3	Wesentliche Elemente des Verfahrens nach der Bauproduktenverordnung . . . . .	750	4.3.2	Restnormen und -zulassungen . . . . .	761
			4.3.3	Bauregelliste A . . . . .	762
			4.3.4	Bauregelliste B . . . . .	762
			4.3.5	Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen (Muster-LTB) . . . . .	763
			5	Ausblick . . . . .	763
			6	Verzeichnis relevanter Abkürzungen . . . . .	764
			7	Literatur . . . . .	764

**F Forschung**

**I Übersicht über abgeschlossene und laufende Forschungsvorhaben im Mauerwerksbau . . . . . 767**  
 Anke Eis und Sebastian Ortlepp, Dresden

1	Abgeschlossene Forschungsvorhaben . . . . .	771	1.2.1	Standsicherheit horizontal belasteter Mauerwerkswände unter geringer Auflast . . . . .	771
1.1	Übersicht Forschungsprojekte und Forschungsstellen . . . . .	771	1.2.2	Risssicherheit von nichttragenden Trennwänden aus Porenbeton . . . . .	773
1.2	Kurzberichte . . . . .	771			

1.2.3	DIMEBRA: Digitales Mauerwerk – Erfahrungsbasierte Bewertungskonzepte und Risikoanalysen . . . . .	775	2.2.9	Optimierung des rheologischen Verhaltens von Kalk-Sand-Rohmischungen zur Steigerung der Scherbenrohddichte und der Festigkeit von Kalksandsteinen (AiF-Nr.: 17692-N) . . . . .	791
1.2.4	Kalksandstein-Recycling-Material für den Deponiebau – Methanox II (AiF-Nr.: 16637-N) . . . . .	777	2.2.10	SIM Stoffkreislauf im Mauerwerksbau – Vegetationssubstrate aus rezyklierten Gesteinskörnungen aus Mauerwerk (AiF-Nr.: 17319-N) . . . . .	792
2	Laufende Forschungsvorhaben . . . . .	778	2.2.11	SIM Stoffkreislauf im Mauerwerksbau – Verwertungsoptionen für rezyklierte Gesteinskörnungen aus Mauerwerk in der Steine- und Erden-Industrie (AiF-Nr.: 17251-N) . . . . .	792
2.1	Übersicht Forschungsprojekte und Forschungsstellen . . . . .	778	2.2.12	Optimierung des Mischvorgangs bei der Kalksandsteinproduktion . . . . .	794
2.2	Kurzberichte . . . . .	779	2.2.13	Beschleunigung der Härtereaktionen durch CSH-Phasen – Teil 2 (AiF-Nr.: 16468-N) . . . . .	795
2.2.1	EU-Projekt INSYSME: Innovative Tech- niken für erdbebensichere Ausfachungs- wände aus Ziegelmauerwerk in Stahl- betonrahmentragwerken . . . . .	779	2.2.14	Entwicklung eines Prüfverfahrens für Huminstoffe – Teil 2 (AiF-Nr.: 17339-N)	795
2.2.2	Innovative Dämmtechnik zur Redu- zierung der Transmissionswärmeverluste im Mauerwerksbau mit dem Ziel der Gewährleistung des 0-Energie- Standards – 0-EneMau . . . . .	780	2.2.15	Entwicklung einer Methodik zur ressourcenorientierten Steuerung der Werksprozesse in der Kalksandstein- Industrie (AiF-Nr.: 17544-N) – Numerische Simulation des Produktionsprozesses im Kalksandsteinwerk – Optimierung der Kalksandsteinherstellung . . . . .	796
2.2.3	Energetische und mechanische Opti- mierung des Anschlusses der Decke an monolithische Außenwände aus Mauer- werk mit Passivhausstandard . . . . .	781	2.2.16	Einsatz von natürlichen Schwermineral- sanden zur Steigerung der Rohddichte von Kalksandsteinen für einen hohen bau- lichen Schallschutz (AiF-Nr.: 17798-N) . .	796
2.2.4	Sicherung neugotischer Gewölbe- konstruktionen (SNG) . . . . .	785	2.2.17	Vorwettbewerbliche Untersuchungen und Entwicklungen zur Funktionalisierung natürlicher (Bims) und synthetischer (Blähton) Rohstoffe im Hinblick auf bauphysikalisch verbesserte Leichtbeton- anwendungen . . . . .	797
2.2.5	Entwicklung eines textilen Flächen- gebildes zur Vorbeugung und Sanierung von Setzungsschäden an Bauwerken . . . .	787			
2.2.6	MULTITEXCO – High Performance Smart Multifunctional Technical Textiles for the Construction Sector . . . . .	788			
2.2.7	Experimentell gestützte Tragsicherheits- bewertung von Mauerwerk – Entwicklung eines praxisorientierten Konzepts zur Substanzerhaltung von Brücken und Durchlässen (ExTraM) . . . . .	790			
2.2.8	Mauerwerksbauten an der Hochhaus- grenze – Entwicklung und Anwendung eines neuen Rechenmodells für vertikal exzentrisch belastete Schubwände . . . . .	791			

## Autoren

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

**Alsheimer**, Berthold, Ingenieurbüro Alsheimer GbR, Ungarndeutsche Straße 55, 91567 Herrieden (**B V**, **B VI**).

**Brameshuber**, Wolfgang, Prof. Dr.-Ing., RWTH Aachen University, Institut für Bauforschung (ibac), Schinkelstraße 3, 52062 Aachen. Professor für Baustoffkunde, Leiter des Instituts für Bauforschung; Lehre und Forschung: Bindemittel, Beton, Mauerwerk; Mitglied einschlägiger DIN-Normenausschüsse; Mitglied des DIBt-Sachverständigenausschusses „Wandbauelemente“; RILEM-Beauftragter für Deutschland; Redaktionsbeiratsmitglied der Zeitschrift „Mauerwerk“ (**A I**).

**Brehm**, Eric, Dr.-Ing., Brehm Bauconsult GmbH, Lindberghstraße 12a, 64625 Bensheim. Projektleiter (**C III**).

**D'Ayala**, Dina, Prof., PhD, University College London UCL, Department of Civil Environmental and Geomatic Engineering, Chadwick Building, Gower Street, London WC1E 6BT, United Kingdom (**B III**).

**Eis**, Anke, Dipl.-Ing. (FH), Jäger Ingenieure GmbH, Wichernstraße 12, 01445 Radebeul. Redaktionsassistentz Mauerwerk-Kalender und Zeitschrift Mauerwerk (**F I**).

**Fontana**, Patrick, Dr.-Ing., BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Unter den Eichen 87, 12205 Berlin (**B III**).

**Gigla**, Birger, Prof. Dr.-Ing., Fachhochschule Lübeck, Fachbereich Bauwesen, Direktor des Instituts für Angewandte Bauforschung (IfAB), Mönkhofer Weg 239, 23562 Lübeck. Lehre: Bauwerkserhaltung und -instandsetzung, Mauerwerkbau und FEM, Statik; Forschung: Planen und Bauen im Bestand, Bauwerkserhaltung, Verpressanker, Verblendmauerwerk; Weitere Tätigkeiten: Öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Schallschutz im Hochbau (**B II**).

**Hegner**, Hans-Dieter, Dipl.-Ing., Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 11055 Berlin. Ministerialrat, Leiter des Referats B I 5 „Bauingenieurwesen, Nachhaltiges Bauen, Bauforschung“ (**D 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**).

**Huster**, Ulrich, Dr.-Ing., HAZ Beratende Ingenieure für das Bauwesen GmbH, Johanna-Wäsche-Straße 11, 34131 Kassel.

Geschäftsführender Gesellschafter, Beratender Ingenieur für das Bauwesen, Lehrauftrag Universität Kassel FB Bauingenieurwesen „Bauwerkserhaltung“, Referent Propstei Johannesberg gGmbH, Fortbildungen für Architekten und Ingenieure in der Denkmalpflege, Mitarbeit in der WTA Arbeitsgruppe 4-3 „Instandsetzung von Mauerwerk“ (**B I**).

**Jäger**, Hans-Joachim, Dr.-Ing., Gesellschaft zur Förderung der Frauenkirche Dresden e. V., Georg-Treu-Platz 3, 01067 Dresden. Geschäftsführer (**B IV**).

**Jäger**, Wolfram, Prof. Dr.-Ing., TU Dresden, Fakultät Architektur, Lehrstuhl für Tragwerksplanung, Zellescher Weg 17, 01069 Dresden.

Lehre: Tragwerksplanung, Analyse historischer Tragwerke, Grundlagen Sanierung/Modernisierung; Forschung: Sanierung historischer Bauwerke, Gebäudeaussteifung, Optimierung der Modellbildung, Erdbeneinwirkung, nichtlineare Berechnungsmethoden, Knicken, Wand-Decken-Knoten; 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; Mitglied des DIBt-Sachverständigenausschusses „Wandbauelemente“, Chefredakteur der Zeitschrift „Mauerwerk“ (Herausgeber, **A II**, **B IV**, **C I**, **C II**, **E II**).

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

**Ortlepp**, Sebastian, Dr.-Ing. habil., Technische Universität Dresden, Fakultät Architektur, Lehrstuhl Tragwerksplanung, Zellescher Weg 17, 01069 Dresden. Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Mitglied der Forschungsgruppe „Mauerwerk“ am Lehrstuhl Tragwerksplanung der TU Dresden; Lehre: Tragwerkslehre, Grundlagen Sanierung und Modernisierung historischer Bauwerke; Forschung: Gebäudeaussteifung (Mauerwerk), Optimierung der Modellbildung (**F I**).

**Paganoni**, Sara, M.Eng., Ziegert Roswag Seiler Architekten Ingenieure. Schlesische Straße 26, 10997 Berlin (**B III**).

**Rauh**, Peter, Dipl.-Ing., DIN Deutsches Institut für Normung, Normenausschuss Bauwesen, Burggrafenstr. 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**).

**Schegk**, Ingrid, Prof. Dipl.-Ing., Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Fakultät Landschaftsarchitektur, Baukonstruktion und Entwerfen, Am Hofgarten 6, 85354 Freising (**B VII**).

**Springborn**, Matthias, Dipl.-Ing., Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Kolonnenstraße 30 B, 10829 Berlin. Leiter des Referats P2 Europäische Harmonisierung am Deutschen Institut für Bautechnik (**E III**).

## **A Baustoffe ■ Bauprodukte**

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

Wolfgang Brameshuber, Aachen

### **II Mauerwerksbau mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (abZ) 35**

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 Verfasser würde sich über Hinweise, z. B. über fehlende wesentliche Literaturangaben etc., sehr freuen und diese im folgenden Jahrgang gern aufnehmen.

Im Zuge der Ablösung der nationalen Bemessungsnorm DIN 1053-1 [1] durch den EC 6 [2] 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 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 EC 6 wird derzeit vom ibac eine Umordnung und klarere Struktur bezüglich der Trennung von Bemessung, Konstruktion, Ausführung und Baustoffen vorgenommen. Dabei soll auch eine stärkere Spezifizierung der Haftscherfestigkeiten und Mauersteinzugfestigkeiten vorgeschlagen werden. Über den Stand der Bearbeitung wird an anderer Stelle berichtet werden. Die hier aufgeführten Eigenschaftswerte beziehen sich auf das tatsächliche Verhalten von Mauerstein, Mauer-

mörtel 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 [3]. Wenn Materialkennwerte/Rechenwerte aus dem Eurocode 6 entnommen wurden, wird hierfür auf die Kommentierung zum EC6 [67] 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 [3] ergibt sich nach Auswertung der Literatur [4–6] folgendes Bild: Für Hochlochziegel lässt sich kein Zusammenhang zwischen dem Nennwert der Stein- druckfestigkeit 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 Vollsteine und Kalksandlochsteine ergibt sich nach [3] ein durchaus verwertbarer Zusammenhang. Für Mauerziegel, Kalksand-, Voll- und Lochsteine ist das Verhält-

**Tabelle 1.** Verhältniswerte Steinlängs- $(\beta_{D,st,l})$ /Normdruckfestigkeit  $(\beta_{D,st})$ , aus [3]

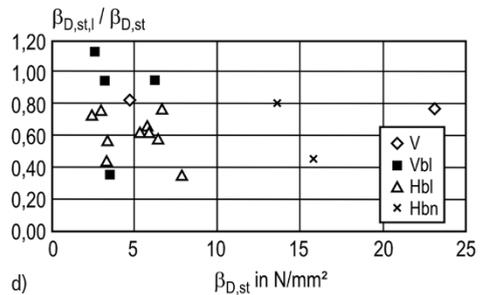
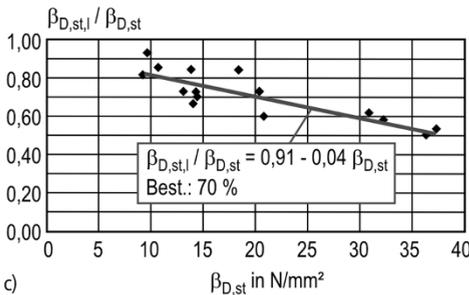
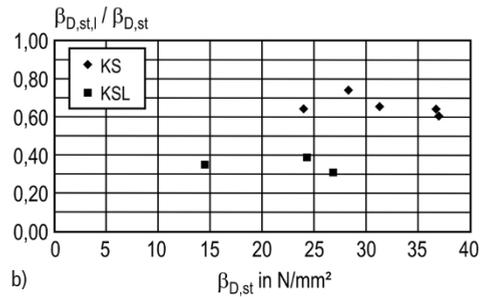
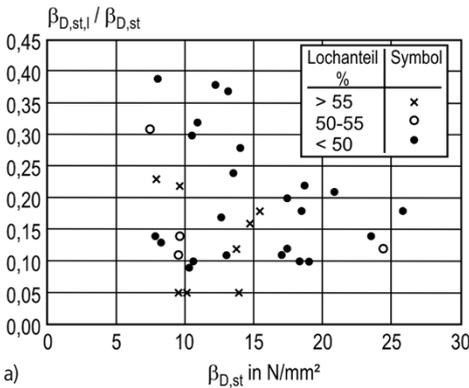
Mauerstein	n	$\beta_{D,st}$ Wertebereich N/mm <sup>2</sup>	$\beta_{D,st,l} / \beta_{D,st}$		
			$\bar{x}$	min x	max x
Mz	2	21,9/22,7	0,67	0,64	0,70
HLz <sup>1)</sup>	5	20...47	0,23	0,12	0,33
HLz <sup>2)</sup>	37	7, 4...26	0,18	0,05	0,39
KS	8	24,1...36,8	0,59	0,32	0,75
KS L	7	8,9...26,9	0,40	0,32	0,56
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) Trockenrohdichte  $\rho_d > 1,0 \text{ kg/dm}^3$   
 2)  $\rho_d \leq 1,0 \text{ kg/dm}^3$

nis 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  $\beta_{D,st,l} / \beta_{D,st} = 0,91 - 0,04 \beta_{D,st}$  [3]. 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 zur Lagerfuge bei bestimmten Verhältnissen Stein-/Mörteldruckfestigkeit wegen des entstehenden mehraxialen Spannungszustandes die Zugfestigkeit der Mauersteine eine für die Druckfestigkeit von Mauer-



**Bild 1.** Steinlängs- $(\beta_{D,st,l})$  / Normdruckfestigkeit  $(\beta_{D,st})$  in Abhängigkeit von der Normdruckfestigkeit [3]; a) Leichthochlochziegel, b) Kalksandvollsteine, Kalksandlochsteine, c) Porenbeton-Blocksteine, Porenbeton-Plansteine, d) Leichtbetonsteine, Betonsteine

Tabelle 2. Verhältniswerte Steinzug-/Steindruckfestigkeit

Steinart	$\delta_i = f_{bt,cal} / f_{st}$	Mauerstein	$\beta_{z,i} / \beta_{D,st,prüf}$ [3]		
	DIN EN 1996-1-1/NA		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 Grifflöchern 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	$0,082 \cdot \frac{1}{1,25} \cdot \left( \frac{f_{st}}{25} \right)^{0,5}$	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  
 $\beta_{z,i}$  Prüfwert der Steinzugfestigkeit  
 $\beta_{D,st,prüf}$  Prüfwert der Steindruckfestigkeit

werk 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 Grifflöchern 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 [8]). 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  $\beta_{z,i}$ -Werte auf die jeweilige Steindruckfestigkeit (nach Norm) ermittelt bezogen als Verhältniswerte  $\beta_{z,i}/\beta_{D,st}$  angegeben.

Tabelle 2 gibt den heutigen Stand der Auswertung [3, 9, 10] 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  $\beta_{sz,i}$  zu Zugfestigkeit  $\beta_{z,i}$  zwischen 1,1 und 1,3 liegt. Für Lochsteine ist nach Auffassung des Verfassers die Ermittlung der Spaltzugfestigkeit [11] 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 [3] 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-Dehnungs-Linien 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 [3] (Best.: Bestimmtheitsmaß):

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

Leichtbetonsteine (V, Vbl, Hbl; Prismen; Prüfung in Steinlängsrichtung; 35 Einzelwerte, große Streuung)  
 $E_Z = 6000 \beta_{z,l}$  (Best.: 77%)

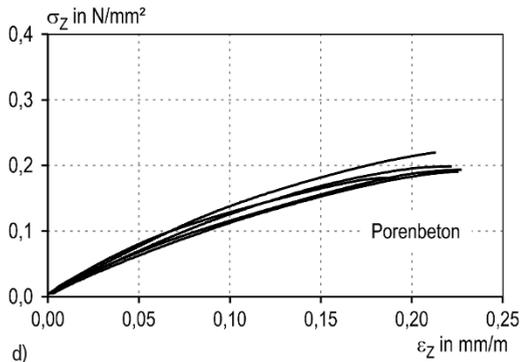
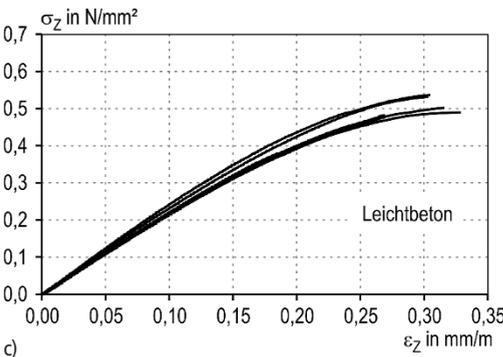
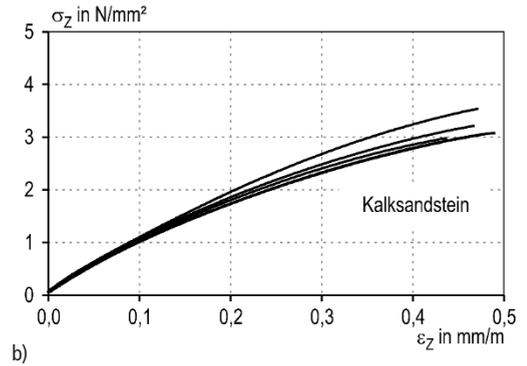
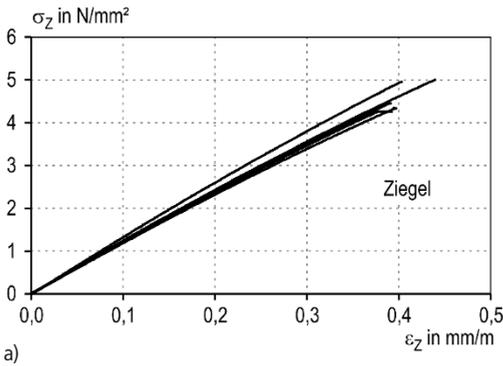


Bild 2. Spannungs-Dehnungs-Linien von Ziegeln (a), Kalksandstein (b), Leichtbeton (c) und Porenbeton (d)

**Tabelle 3.** Mauersteine; Querdehnungsmodul  $E_{q,l}$  in  $10^3$  N/mm<sup>2</sup>, Querdehnungszahl  $\mu$ , Anhaltswerte [12–15], aus [3]

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

### Porenbetonsteine

$E_Z = 3180 \beta_{z,l}$  (Best.: 78%)  
(Zylinder, Prismen; 21 Mittelwerte)

$E_Z = 1,01 E_D$  (Best.: 93%)  
(Zylinder; 11 Mittelwerte)

### 2.2.3 Spannungs-Dehnungs-Linie

In den nachfolgenden vier Diagrammen sind die Spannungs-Dehnungs-Linien 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 [3] 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. [16, 17]. 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 5.5.5 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 [3] 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 18555 bzw. DIN EN 1015 hergestellten Mörtelprismen 160 mm × 40 mm × 40 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 18555-3 [32] oder DIN EN 1015-11 [33] (Bereich für  $\beta_D$ : 4 bis 18 N/mm<sup>2</sup>):

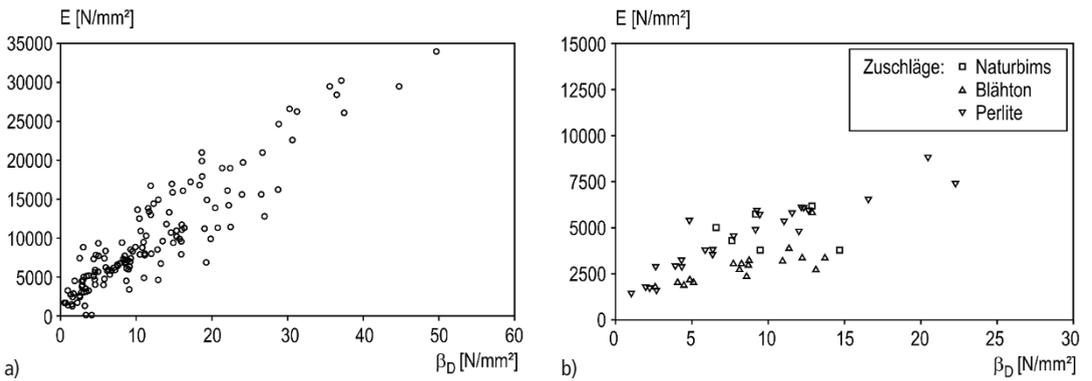
$$\beta_S = 0,55 \beta_D^{0,68} \quad (\text{Best.: } 89\%)$$

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

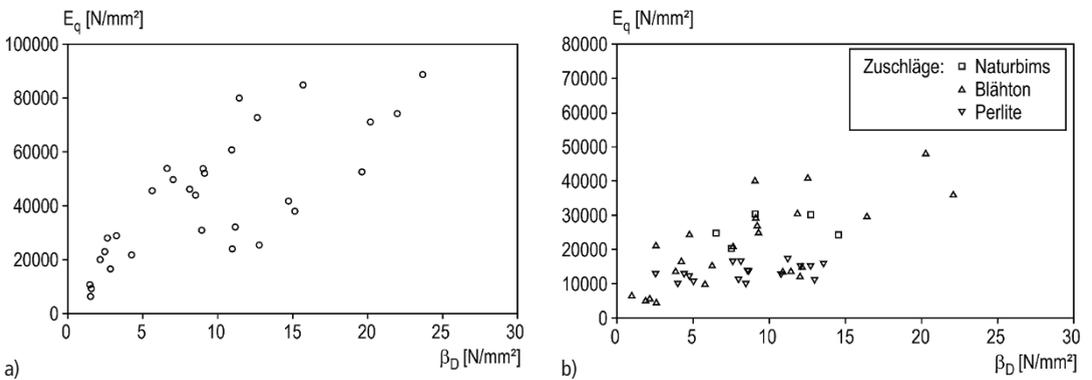
Die Auswertung einer Vielzahl von Festigkeitsprüfungen in [18] ergab

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

$$\beta_S = 2 \beta_Z$$



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



**Bild 4.** Mauermörtel; Querdehnungsmodul  $E_q$  in Abhängigkeit von der Normdruckfestigkeit  $\beta_D$  [3]; a) Normalmörtel, b) Leichtmörtel

**Tabelle 4.** Mauermörtel; Querdehnungsmodul  $E_q$  [21], aus [3]

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  $\epsilon_{s,rot}$  Normalmörtel [22] – Anhaltswerte

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

### 3.3 Verformungseigenschaften

#### 3.3.1 E-Modul (Längsdehnungsmodul) E

Der E-Modul wird in der Regel nach DIN 18555-4 [19] zusammen mit dem Querdehnungsmodul ermittelt. Nach den vorliegenden Versuchsergebnissen lassen sich folgende Beziehungen zwischen E und der Normdruckfestigkeit  $\beta_D$  angeben [20] (s. auch Bild 3):

- a) Normalmörtel  
 $E = 2100 \cdot \beta_D^{0,7}$  bzw.  $E \leq 700 \cdot \beta_D$
- b) Leichtmörtel mit Blähtonzuschlag  
 $E = 1200 \beta_D^{0,6}$
- c) Leichtmörtel mit Perlitezuschlag  
 $E = 1200 \beta_D^{0,4}$

#### 3.3.2 Querdehnungsmodul $E_q$

Ist der Querdehnungsmodul des Mauermörtels deutlich kleiner als der des Steins, so entstehen durch die größere Querverformbarkeit des Lagerfugenmörtels zusätzliche Querkzugspannungen im Stein, wodurch die Mauerwerkdruckfestigkeit verringert werden kann. Dies ist besonders bei leichten Leichtmörteln mit sehr verformbaren Zuschlägen der Fall. Ein Zusammenhang zwischen  $E_q$  und der Normdruckfestigkeit  $\beta_D$  kann jeweils nur für Mörtel mit gleicher Gesteinskörnung (gefügedichter Sand, Blähton, Naturbims, Perlite usw.) erwartet werden (Bild 4).

In Tabelle 4 sind  $E_q$ -Werte angegeben. Für Leichtmörtel wurde der Zusammenhang zwischen Quer- und Längsdehnungsmodul (bei allerdings großer Streuung)

$$E_q = 4,92 \cdot E \quad (\text{Best.: } 67\%)$$

ermittelt.

#### 3.3.3 Feuchtedehnung (Schwinden $\epsilon_s$ )

Das Schwinden des Mauermörtels kann die Rissicherheit von Mauerwerk beeinflussen. Schnelles und starkes Schwinden führt gelegentlich im oberflächennahen Bereich zum Ablösen des Fugenmörtels vom Mauerstein. Das Schwinden kann nach DIN 52450 [23] an gesondert in Stahlschalung hergestellten Mörtelprismen ermittelt werden. Der Mörtel im Mauerwerk schwindet in der Regel weniger, weil der Mauerstein dem Mörtel einen Teil des Anmachwassers entzieht. Quantitative Aussagen dazu liegen bislang nicht vor.

Schwindwerte  $\epsilon_{s,c}$  (rechnerische Endwerte) für Normalmauermörtel sind in der Tabelle 5 in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte des Schwindklimas angegeben. Endschwindwerte von Leichtmörteln können je nach verwendetem Leichtzuschlag bis etwa doppelt so groß sein.

#### 3.3.4 Kriechen (Kriechzahl $\phi$ )

Das Kriechen kann wie das Schwinden die Rissicherheit von Mauerwerk beeinflussen. Es wird in analoger Weise wie bei Beton ermittelt. Für im Alter von 7 d mit

einer Kriechspannung von etwa 1/3 der Prismendruckfestigkeit belastete Mörtelprüfkörper ergaben sich Endkriechzahlen  $\phi_{\infty}$  im Bereich von rd. 5 bis 15, im Mittel von etwa 10 [24]. Auch hier gilt – wie beim Schwinden – dass sich das Kriechen des Mauermörtels im Mauerwerk wesentlich von dem der Mörtelprismen unterscheidet.

## 4 Verbundeigenschaften zwischen Stein und Mörtel

### 4.1 Allgemeines

Nahezu alle Festigkeitseigenschaften von Mauerwerk hängen von dem Verbund zwischen Stein und Mörtel ab. Erst wenn die Verbundfestigkeiten sehr hoch werden, kommt die Steinzugfestigkeit zum Tragen. Geprüft wird die Haftscherfestigkeit entweder nach DIN 18555-5 [25], wenn die Anforderungswerte des Mörtels nach DIN 1053-1 überprüft werden. Für genauere Untersuchungen verschiedener Stein-Mörtel-Kombinationen empfiehlt sich die Prüfung nach DIN EN 1052-3 [26]. Eine sehr detaillierte Zusammenfassung von Prüfmethoden und Kennwerten wurde in [27] veröffentlicht. In [28] wird auf die Beanspruchungsarten spezifisch eingegangen.

### 4.2 Haftscherfestigkeit

Das Institut für Bauforschung der RWTH Aachen hat im Rahmen eines Forschungsprojektes [29] eine sehr umfassende Auswertung von Haftscherfestigkeitsuntersuchungen durchgeführt und damit verdeutlicht, dass eine Differenzierung zwischen unterschiedlichen Stein-/Mörtelkombinationen bez. der tatsächlichen Werte sehr sinnvoll ist (s. Tabellen 6a bis e).

In Tabelle 7 sind Anhaltswerte für die Haftscherfestigkeit angegeben. Dabei wurden die Versuchsergebnisse nach EN-Verfahren mit dem Faktor 2 multipliziert – in etwa ist dies zulässig, um auf den Wert nach dem DIN-Verfahren schließen zu können.

Bei der Biegezugbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen kann zur Abschätzung der Biegezugfestigkeit bei Fugenversagen ersatzweise die Haftscherfestigkeit angesetzt werden (Gln. 4 bis 7 in Abschn. 5.4), obwohl hier die Drehbewegung des Steins einer Torsionsbeanspruchung entspricht. In [27] und [30] wird darauf speziell eingegangen.

### 4.3 Haftzugfestigkeit

Dieser Kennwert ist u.a. für die Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen von Relevanz. Tabelle 8 ist [3] entnommen und stellt die aktuellen Daten dar. Eine deutsche Prüfnorm bzw. richtlinie existiert derzeit nicht. Zwei häufig angewendete Prüfverfahren – die zentrische Beanspruchung und das sogenannte Bondwrench-Prüfverfahren – sind in [8] (s. auch [31]) beschrieben.

**Tabelle 6a.** Kalksandsteine; Haftscherfestigkeit  $\beta_{HS}$ 

Mauerstein	Mauermörtel	PV	n (n <sub>i</sub> )	h <sub>m</sub>	min $\bar{x}$	max $\bar{x}$	$\bar{x}$	
				M.-%				N/mm <sup>2</sup>
KS-Referenz	NM II	DIN	3 (> 15)	3,0...12,1 <sup>1)</sup>	0,10	0,40	0,23	
		EN	2 (9)	3,0...12,1	0,10	0,24	0,17	
	NM IIa	DIN	23 (> 129)	4,0...11,3 <sup>1)</sup>	0,02	0,60	0,19	
		EN	10 (49)	5,5...11,3 <sup>1)</sup>	0,03	0,27	0,10	
	NM IIIa	DIN	6 (30)	2,3...11,5	0,27	0,67	0,42	
		EN	2 (10)	2,3...11,5	0,21	0,60	0,41	
	LM 21	DIN	3 (> 14)	5,1 <sup>1)</sup>	0,37	0,58	0,47	
		EN	–	–	–	–	–	
	LM 36	DIN	3 (30)	5,0 <sup>1)</sup>	0,12	0,82	0,43	
		EN	–	–	–	–	–	
	DM	DIN	21 (170)	3,4...5,0 <sup>1)</sup>	0,37	1,68	0,94	
		EN	–	–	–	–	–	
	KS (ohne Referenz)	NM II	DIN	1 (– <sup>2)</sup> )	1,8	–	–	0,06
			EN	4 (40)	14,4	0,16	0,64	0,37
NM IIa		DIN	21 (> 76)	1,8...3,2 <sup>1)</sup>	0,01	0,51	0,20	
		EN	21 (> 67)	1,8...10,5 <sup>1)</sup>	0,02	0,31	0,13	
NM III		DIN	2 (– <sup>2)</sup> )	1,8...3,2	0,04	0,07	0,06	
		EN	13 (> 27)	1,5...13,2 <sup>1)</sup>	0,03	0,35	0,16	
LM 21		DIN	2 (10)	3,2...12,1	0,36	1,64	1,00	
		EN	2 (10)	3,2...12,1	0,27	1,10	0,69	
DM		DIN	8 (45)	3,9...6,7 <sup>1)</sup>	0,46	1,07	0,78	
		EN	12 (56)	2,7...6,8 <sup>1)</sup>	0,10	0,90	0,43	

PV Prüfverfahren  
n Anzahl der Versuchsserien  
(n<sub>i</sub>) Anzahl der Einzelwerte  
h<sub>m</sub> Feuchtegehalt der Mauersteine  
min  $\bar{x}$  kleinster Mittelwert  
max  $\bar{x}$  größter Mittelwert;  $\bar{x}$ : Mittelwert

- 1) Feuchtegehalte liegen nicht bei allen Versuchsserien vor.  
2) Anzahl der Einzelwerte nicht bekannt.