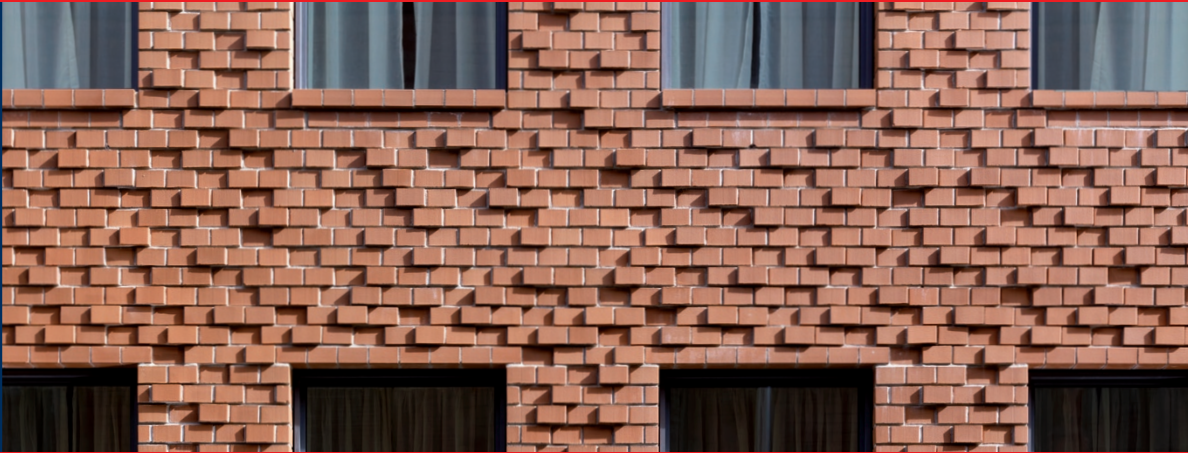




2016

MAUERWERK KALENDER



Baustoffe
Sanierung
Eurocode-Praxis

2016

MAUERWERK KALENDER

**Baustoffe
Sanierung
Eurocode-Praxis**

**Herausgegeben von
Wolfram Jäger, Dresden**

41. Jahrgang

Hinweis des Verlages

Die Recherche zum Mauerwerk-Kalender ab
Jahrgang 1976 steht im Internet zur Verfügung
unter www.ernst-und-sohn.de

Titelbild: Fassadendetail des H10 Hotels, Berlin

Architekt: Jan Kleihues, Kleihues + Kleihues

Fotograf: Stefan Josef Müller

Mit freundlicher Genehmigung von Kleihues + Kleihues Gesellschaft von Architekten mbH

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.

© 2016

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 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.

Umschlaggestaltung: Sonja Frank, Berlin

Herstellung: pp030 – Produktionsbüro Heike Praetor, Berlin

Satz: Dörr + Schiller GmbH, Stuttgart

Druck + Verarbeitung:

Printed in the Federal Republic of Germany.

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

ISSN 0170-4958

Print ISBN 978-3-433-03131-5

ePDF ISBN 978-3-433-60697-1

ePub ISBN 978-3-433-60698-8

eMobi ISBN 978-3-433-60699-5

oBook ISBN 978-3-433-60696-4

Vorwort

Der Mauerwerk-Kalender 2016 widmet sich schwerpunktmäßig den Themen Baustoffe, Eurocode-Praxis und der Sanierung von Mauerwerk, wobei der letzte Punkt besonders breiten Raum einnimmt, was der besonderen Bedeutung der Bestandsbauwerke innerhalb des Fachkomplexes Mauerwerk gerecht wird. Im Einzelnen werden dem Leser in der vorliegenden Ausgabe des Mauerwerk-Kalenders folgende Informationen zur Verfügung gestellt:

- Im Bereich *Baustoffe · Bauprodukte* finden Sie den jährlich aktualisierten Grundlagenbeitrag Eigenschaftswerte von Mauersteinen, Mauermörtel, Mauerwerk und Putzen. Der Beitrag über den Mauerwerksbau mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung behandelt diesmal – nachdem im Vorjahr alle erteilten Zulassungen des Fachgebietes als vollständige Übersicht im Mauerwerk-Kalender enthalten waren – nur die im letzten Jahr neu erteilten Zulassungen. Die Umstellung auf den Eurocode 6 ist in diesem Bereich noch nicht vollständig vollzogen, das heißt, ein Teil der Zulassungen muss demnächst noch vom DIBT angepasst werden. Der Leser wird mit diesem Beitrag auf dem Laufenden gehalten.

- Die Abteilung *Konstruktion · Bauausführung · Bauwerkserhaltung* beginnt mit einer bauordnungsrechtlichen Betrachtung der Problematik Verankerungen diverser Bauteile in Mauerwerk. Die rechtlichen Rahmenbedingungen für den Einsatz von Dübeln in Mauerwerk haben sich in Deutschland und Europa in den letzten Jahren grundlegend verändert. Der Beitrag schildert diese und benennt die Punkte, die bei der praktischen Umsetzung zu beachten sind; insbesondere gehen die Autoren auf die vorgeschriebenen Baustellenversuche ein. Der Beitrag zur Sicherung und Instandsetzung der Frauenkirche Dresden in der Zeit von 1937 bis 1943 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. die fachgerechte Ausführung unterstützt. Der Aufsatz ist eine Fortsetzung des in der Vorjahresausgabe abgedruckten Teils mit den Instandsetzungsarbeiten aus der Zeit von 1918 bis 1932. Die Friedrichswerdersche Kirche von Karl Friedrich Schinkel in Berlin erfuhr während der Bauarbeiten an den „Kronprinzengärten“ in der unmittelbaren Nachbarschaft Risse und weitere Schäden infolge von Setzungen. Der im vorliegenden Mauerwerk-Kalender enthaltene Text geht nach einer kurzen Abhandlung zum geschichtlichen Hintergrund auf die im Zusammenhang mit den Setzungsschäden erstellten Gutachten zur Standsicherheit und die eingeleiteten Schritte zur Sicherung dieses bedeutenden Bauwerks ein. Technologischen und baustofflichen Fragestellungen beim Verpressen von historischem Mauerwerk folgen die Autoren in einem weiteren Beitrag anhand des Beispiels

Schloss Steinort in Ostpolen und stellen so den Stand der Technik auf diesem Gebiet dar. Ertüchtigungsmaßnahmen von historischen Gebäuden zur Integration in Hochwasserschutzanlagen sind Inhalt des nächsten Aufsatzes, der direkt an einen bereits im Mauerwerk-Kalender 2012 veröffentlichten zu diesem Thema anschließt.

- Das Kapitel *Bemessung* stellt verschiedene Modelle und Methoden für die Ermittlung der Schubtragfähigkeit von Mauerwerk vor und vergleicht diese. Ziel ist eine wirklichkeitsnähere und wirtschaftlichere Bemessung auf der Grundlage der vorhandenen Erfahrungen. Ein weiterer Beitrag erklärt die Anwendung der Monte-Carlo-Methode zur Bestimmung der Zuverlässigkeit von Bauteilen und weist nach, dass die Methode auch für Mauerwerksbauteile eingesetzt werden kann. Von besonderer Wichtigkeit für die Akzeptanz der Eurocodes sind Kenntnisse und Hilfsmittel für die praktische Anwendung. Diesem Gedanken trägt der dritte Beitrag dieser Rubrik des Mauerwerk-Kalenders Rechnung. Hier wird mit Beispielen die Praxistauglichkeit des EC 6 Teil 3 belegt, der das vereinfachte Verfahren der Bemessung von Mauerwerk zum Inhalt hat. Die neuen Regelungen werden außerdem im Vergleich mit der langjährig bekannten und akzeptierten Norm DIN 1053-1 bewertet.

- Die Rubrik *Bauphysik · Brandschutz* stellt ein interdisziplinäres Projekt vor – Holzbalkenköpfe bei innendämmtem Mauerwerk. Eigentlich eine Problemstellung aus dem Holzbau, berührt dieser Beitrag jedoch auch die Mauerwerkskonstruktion unmittelbar. Gerade bei denkmalgeschützten Gebäuden ist die Innendämmung des Mauerwerks eine praktikable Lösung, um den gestiegenen bauphysikalischen Anforderungen gerecht zu werden, ohne in das äußere Erscheinungsbild eingreifen zu müssen. Das hier vorgestellte Projekt widmet sich hauptsächlich den wärme- und feuchtetechnischen Aspekten nach einer Innendämmmaßnahme.

- 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 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 „Neuentwicklungen beim Mauerwerksbau mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung“ aus dem Kapitel *Baustoffe · Bauprodukte*.

- Der Komplex *Forschung* bietet wie gewohnt den jährlichen Überblick über die aktuelle Forschungssituation im Mauerwerksbau. Ein zweiter Beitrag stellt erste Ergebnisse des europäischen Verbundprojektes INSYSME

vor, welches sich mit Ausfachungen aus Ziegelmauerwerk beschäftigt und wie diese die Erdbebensicherheit von Gebäuden beeinflussen. Hauptprojektziel ist die Ableitung eines Berechnungs- und Bemessungskonzepts für Ausfachungen aus Ziegelmauerwerk in deutschen Erdbebengebieten. Das Projekt befindet sich zurzeit in der Endphase, die Darstellung ist deshalb noch nicht abschließend, gibt aber einen Ausblick auf die noch ausstehenden Arbeiten. In einer nächsten Ausgabe des

Mauerwerk-Kalenders ist eine komplette Übersicht mit Bewertung geplant.

Ich bedanke mich bei allen Beteiligten für die Mitarbeit an dieser Ausgabe des Mauerwerk-Kalenders und wünsche den Lesern eine gute Lektüre. Mögen die Beiträge hilfreich und nützlich bei der Beschäftigung mit dem schönen und interessanten Thema Mauerwerk in Planung und Ausführung sein.

Dresden,
im Februar 2016

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 Metall-Injektionsanker in Mauerwerk – Bauordnungsrecht, Regelwerk, Baupraxis 59
Thomas Lützwow und Martin Reuter, Kaufering
- II Bautechnische Instandsetzungen der Dresdner Frauenkirche in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Teil 2: 1937–1942 83
Hans-Joachim Jäger und Wolfram Jäger, Dresden
- III Aktuelle statische Probleme und deren Lösung am Beispiel der Friedrichswerderschen Kirche in Berlin 115
Peter Schöps, Radebeul; Toralf Burkert, Weimar
- IV Verpressen von historischem Mauerwerk 163
Wolfram Jäger, Beate Boekhoff, Thomas Köberle, Dresden und Matthias Hohl, Pozezdrze (Polen)
- V Hochwasserschutz an denkmalgeschützten Gebäuden 211
Toralf Burkert, Weimar

C Bemessung

- I Aussteifungsscheiben aus unbewehrtem Mauerwerk – Analyse und Bewertung von Berechnungsmodellen und Bemessungsmethoden 283
Thomas Kranzler, Bonn
- II Die Anwendung der Monte-Carlo-Methode zur Bestimmung der Zuverlässigkeit von Mauerwerksbauteilen 317
Hamidreza Salehi, Wolfram Jäger, Dresden und Mahdi Montazerolghaem, Teheran (Iran)
- III Das vereinfachte Verfahren in Eurocode 6 für die Praxis 333
Detleff Schermer, Regensburg

D Bauphysik • Brandschutz

- I Holzbalkenaufleger in historischem Mauerwerk: Analyse, Bewertung und energetische Sanierung mittels Innendämmung 351
Ulrich Ruisinger, Eric Stöcker und John Grunewald, Dresden
Horst Stopp, Peter Strangfeld und Andrea Staar, Cottbus
Martin Krus, Wolfgang Hofbauer und Theo Großkinsky, Valley
Tommy Odgaard und Søren Peter Bjarløv, Kongens Lyngby, Dänemark

E Normen • Zulassungen • Regelwerk

- I Geltende Technische Regeln für den Mauerwerksbau (Deutsche, Europäische und Internationale Normen) (Stand 30.9.2015) 385
Peter Rauh, Berlin
- II Verzeichnis der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen für den Mauerwerksbau (Stand 31.8.2015) 403
Wolfram Jäger, Dresden und Roland Hirsch, Berlin

F Forschung

- I Übersicht über abgeschlossene und laufende Forschungsvorhaben im Mauerwerksbau 529
Anke Eis und Sebastian Ortlepp, Dresden
- II Ausfachungen aus Ziegelmauerwerk 563
Christoph Butenweg, Herzogenrath; Thomas Kubalski und Marko Marinković, Aachen
sowie Thomas Pfetzing, Mohammed Ismail und Ekkehard Fehling, Kassel

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Autoren	XVII
A Baustoffe · Bauprodukte	
I Eigenschaften von Mauersteinen, Mauermörtel, Mauerwerk und Putzen	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 β_Z	7
3.2.2 Scherfestigkeit β_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 ε_s)	9
3.3.4 Kriechen (Kriechzahl φ)	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 μ_D und Dehnung bei Höchstspannung $\varepsilon_{u,D}$	21
5.6.2.3 Völligkeitsgrad α_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 ε_f , (Schwinden ε_s , irreversibles Quellen ε_q), Kriechen (Kriechzahl φ), Wärmedehnungskoeffizient α_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 β_D	24
8.2.1 Zugfestigkeit β_Z	24
8.3 Verformungseigenschaften	24
8.3.1 Zug-E-Modul E_Z , dynamischer E-Modul dyn E	24
8.3.2 Zugbruchdehnung $\varepsilon_{Z,u}$	24
8.3.3 Zugrelaxation ψ	24
8.3.4 Schwinden ε_s , Quellen ε_q	26
8.4 Eigenschaftszusammenhänge	26
9 Literatur	26

II	Neuentwicklungen beim Mauerwerksbau mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (abZ)	31					
	Wolfram Jäger, Dresden und Roland Hirsch, Berlin						
	Vorbemerkungen	31	3	Mauerwerk mit Mittelbettmörtel		48	
0	Allgemeines	32	4	Vorgefertigte Wandtafeln		48	
0.1	Nachweis der Mindestauflast	32	5	Geschosshohe Wandtafeln		52	
0.1.1	Mauerwerk nach DIN 1053-1	32	6	Schalungsstein-Bauarten		52	
0.1.2	Mauerwerk nach DIN EN 1996 (Eurocode 6)	33	7	Trockenmauerwerk		53	
0.2	Wände mit teilweise aufliegender Decke	33	8	Mauerwerk mit PU-Kleber		53	
0.2.1	Mauerwerk nach DIN 1053-1	33	9	Bewehrtes Mauerwerk		53	
0.2.2	Mauerwerk nach DIN EN 1996 (Eurocode 6)	33	10	Ergänzungsbauteile		53	
0.3	Sonderregelungen zur Knicklänge	33	11	Literatur		54	
0.4	Gesonderte Regelungen zu Schlitzen	34	12	Bildnachweis		56	
1	Mauerwerk mit Normal- oder Leichtmörtel	34					
2	Mauerwerk mit Dünnbettmörtel	37					
B	Konstruktion · Bauausführung · Bauwerkserhaltung						
I	Metall-Injektionsanker in Mauerwerk – Bauordnungsrecht, Regelwerk, Baupraxis	59					
	Thomas Lützwow und Martin Reuter, Kaufering						
1	Einleitung	59	5.2.1	Übersicht Anhang B		65	
2	Bauaufsichtliche Verwendungsnachweise für Dübel in Mauerwerk	59	5.2.2	Auszugsversuche		66	
3	Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ)	60	5.2.3	Probebelastungen		66	
4	ETA	62	5.2.4	Prüfbericht		66	
5	ETAG 029, Leitlinie für die europäische technische Zulassung für Metall-Injektionsdübel zur Verankerung in Mauerwerk	63	5.2.5	Querkraft-Widerstand		67	
5.1	ETAG 029, Hauptteil	64	5.3	ETAG 029, Anhang C: Bemessungsverfahren für Verankerungen		67	
5.2	ETAG 029, Anhang B: Empfehlungen für die Durchführung von Versuchen am Bauwerk	65	6	Herausforderungen der Baupraxis		69	
			7	Praktische Anwendung ETAG 029, Anhang B (Baustellenversuche) und Anhang C (Bemessung)		72	
			8	Zusammenfassung und Ausblick		80	
			9	Literatur		81	
II	Bautechnische Instandsetzungen der Dresdner Frauenkirche in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Teil 2: 1937–1942	83					
	Hans-Joachim Jäger und Wolfram Jäger, Dresden						
1	Einführung	83	2	Abgeleitete Maßnahmen zu konstruktiver Sicherung und bautechnischen Instandsetzungen		93	
1.1	Situation und Frauenkirchgemeinde	83	2.1	Schaffung bautechnologischer und weiterer Voraussetzungen für die Instandsetzung		94	
1.2	Anlässe für neuerliche Untersuchungen und Maßnahmen	84	2.2	Bautechnische Sicherung der Hauptkuppel		95	
1.3	Die besondere fachliche Expertise des Gutachters	86	2.3	Die Fundamentverstärkungen		98	
1.4	Erste Schritte zur Befundaufnahme und Konsequenzen	86	2.4	Instandsetzung und Ertüchtigung des Mauerwerks		104	
1.5	Bauaufmaße, Befundaufnahme und Befundanalyse	88					

2.5	Wiederherstellung der Innenausstattung und Innenraumfarbigkeit	107	3	Zusammenfassende Einschätzung	109
2.6	Dokumentation der ausgeführten Arbeiten	108	4	Literatur	110
III	Aktuelle statische Probleme und deren Lösung am Beispiel der Friedrichswerderschen Kirche in Berlin				115
	Peter Schöps, Radebeul; Toralf Burkert, Weimar				
1	Einführung	115	6	Ergebnisse	133
2	Die Friedrichswerdersche Kirche und ihr Baumeister Karl Friedrich Schinkel	116	6.1	Auflagerkräfte	133
2.1	Neubau der Friedrichswerderschen Kirche	117	6.2	Ausgewählte Ergebnisse Jochbereich	133
2.2	Schäden nach dem 2. Weltkrieg	122	6.3	Parameterstudie Joch	136
2.2.1	Sanierungsphase 1982–1987	123	6.4	Apsis	137
2.2.2	Sanierungsphase 1994–2002	124	6.5	Eingangsbereich und Türme	138
2.2.3	Bauschäden im Zuge der Errichtung der Kronprinzengärten	125	7	Ergebnisse der Temperaturbetrachtung	139
3	Vorgehensweise bei der Erstellung der Gutachten	126	7.1	Numerische Temperatursimulation	139
4	Modellbildung	126	7.2	Ergänzende analytische Betrachtungen zur Temperaturbeanspruchung	140
4.1	Geometrie	126	7.3	Einfluss der Innentemperatur	142
4.2	Material und Verband	126	7.4	Einfluss der Fundamente	142
4.3	Verwendetes Materialmodell	128	7.5	Vergleich mit den Messwerten	142
5	Lastannahmen	130	8	Zusammenfassung zu den statischen Berechnungen	142
5.1	Lastfälle	130	9	Sanierung aller statisch relevanten Risse	145
5.2	Baugrundsetzungen	130	9.1	Aktualisiertes Rissaufmaß 2015	145
5.2.1	Allgemeines	130	9.2	Rissanierung	150
5.2.2	Setzungen im Jochbereich	130	9.2.1	Partielle Rissanierung im Jahr 2013	150
5.2.3	Annahmen zur Setzungsmulde der Apsis	130	9.2.2	Sanierung der statischen Risse im Jahr 2015	150
5.2.4	Setzungsannahmen im Bereich der Türme	132	9.3	Erneuerung der Putzbemalung auf der Gewölbeinnenseite	157
5.3	Temperatur	132	10	Zusammenfassung	159
5.4	Sicherheitsbeiwerte	132	11	Literatur	159
			12	Bildnachweis	162
IV	Verpressen von historischem Mauerwerk				163
	Wolfram Jäger, Beate Boekhoff, Thomas Köberle, Dresden und Matthias Hohl, Pozezdrze (Polen)				
1	Einführung	163	3.3	Planung	169
2	Notwendigkeit und Ziel	163	3.3.1	Nachweisführung	170
2.1	Allgemeines	163	3.3.2	Materialauswahl	171
2.2	Zielstellung	166	3.3.3	Ausführungsplanung	171
2.2.1	Verfüllen von Hohlräumen	166	3.3.4	Vorbereitung der Vergabe und Vergabe	173
2.2.2	Herstellen des Kraftschlusses	166	3.3.4.1	Allgemeine Hinweise	173
2.2.3	Verankern und Herstellen des Verbundes	167	3.3.4.2	Beispielhaftes Leistungsverzeichnis	175
2.2.4	Korrosionsschutz	167	4	Vorbereiten, Verfugen und Setzen von Packern	180
2.2.5	Abdichten	167	4.1	Vorbereiten	180
2.2.6	Imprägnieren	167	4.2	Ausbruchstellen schließen	180
3	Vorbereitung, Planung und Vergabe	167	4.3	Verfugen und Risse schließen	181
3.1	Bestands- und Schadensaufnahme sowie Ursachenermittlung	167	4.3.1	Starke Risse und Fehlstellen	181
3.2	Beurteilung des Mauerwerks	168	4.3.2	In sich stabiles Mauerwerk, feinere Risse	184

4.4	Packer setzen	184	7.1.8	Kosten	194
4.4.1	Einschlagpacker	184	7.2	Bindemittel	194
4.4.2	Schlauchpacker	185	7.2.1	Zemente	194
4.4.3	Rohrpacker	185	7.2.1.1	Portlandzement (CEM I)	194
4.4.4	Verpressen gegen die Bohr- oder Loch- wandung	185	7.2.1.2	Hochofenzement (CEM III)	194
4.5	Entlüftung	186	7.2.1.3	Trasszement (spezieller CEM IV)	194
4.6	Sicherungen	186	7.2.1.4	Sulfatresistenz	194
5	Bohren	187	7.2.1.5	Sonderzemente	195
5.1	Auswahl nach der Spülmethode	187	7.2.2	Kalk	195
5.2	Auswahl nach der Bohrmethode	188	7.2.2.1	Luftkalk	195
6	Technik zum Verpressen	188	7.2.2.2	Hydraulischer Kalk	195
6.1	Mischer	188	7.2.3	Mineralgemenge	196
6.2	Pumpe	189	7.2.4	Gips	196
6.2.1	Kolbenpumpen	189	7.2.5	Einsatzgebiete	196
6.2.2	Schneckenpumpen	189	7.3	Zuschläge	196
6.2.3	Membranpumpe	189	7.4	Zusatzmittel	196
6.3	Schlauch, Manometer, Hahn, Mundstück	190	7.5	Wasser-Feststoff-Verhältnis	196
6.4	Packer	190	7.6	Korngefüge	197
6.4.1	Standardisiert vorgefertigt	190	8	Durchführung	198
6.4.1.1	Schraubpacker	190	8.1	Aufbereiten des Injektionsguts	198
6.4.1.2	Einschlagpacker	191	8.2	Einbringen des Injektionsguts	198
6.4.1.3	Keilpacker	191	8.3	Arbeitsfortschritt	200
6.4.1.4	Klebpacker	191	8.4	Arbeitsschritte unter Verwendung von standardisierten Packern	200
6.4.1.5	Schlauchpacker mit Einfüllstutzen	191	8.5	Verpressen ohne Packer	200
6.4.2	Packer aus PE-Druckluft- oder Wasserrohr	191	8.6	Temperatur	200
6.4.3	Weich-PVC-Druckschlauch	193	8.7	Begleitung	203
7	Injektionsgut	193	9	Qualitätskontrolle und Injektionserfolg	203
7.1	Anforderungen	193	9.1	Injektionsmaterial	203
7.1.1	Mechanische Eigenschaften	193	9.2	Frischmörteleigenschaften	203
7.1.2	Korrosionsschutz beim Einbau von Ankern und Nadeln	193	9.3	Festmörteleigenschaften	203
7.1.3	Verträglichkeit	193	9.4	Prüfung am Bauwerk	203
7.1.4	Injizierbarkeit	194	9.5	Überbohren	204
7.1.5	Verarbeitbarkeit	194	9.6	Kontrollbohrungen und Endoskopierung	204
7.1.6	Anpassung an die speziellen Bedingungen des Anwendungsfalls	194	9.7	Ausbau	204
7.1.7	Dauerhaftigkeit	194	10	Treibmineralbildung und Ausblühungen	204
V	Hochwasserschutz an denkmalgeschützten Gebäuden	211	11	Überwachung und Abrechnung	205
	Toralf Burkert, Weimar		12	Dokumentation und Langzeitkontrolle	206
1	Einführung	211	13	Literatur und Quellen	206
2	Hochwasserschutz für den Bereich der „Brühlschen Terrasse“ in Dresden	211	2.3.2.4	Geotechnisches Untersuchungs- programm	226
2.1	Veranlassung	211	2.4	Numerische Modellierung	227
2.2	Ausgangssituation	212	2.5	Bauliche Realisierung	227
2.3	Bauwerkserkundungen	213	2.6	Schlussbemerkung zum Projekt „Brühlsche Terrasse“	229
2.3.1	Bauhistorische Untersuchungen	213	3	Einbindung von historischen Gebäuden in die Hochwasserschutz- anlage in Grimma	229
2.3.2	Bauwerksuntersuchungen	215	3.1	Die Alte Amtshauptmannschaft in Grimma	229
2.3.2.1	Aufmaß	215	3.1.1	Materialuntersuchungen	230
2.3.2.2	Erkundung der Bauwerksstruktur	215			
2.3.2.3	Wesentliche Ergebnisse der Erkundungen zur Bauwerksstruktur	217			

3.1.2	Planung und Ausführung des Hochwasserschutzes im Bereich Amtshauptmannschaft	230	4.6	Bauphysikalische Simulationsrechnungen zur Analyse und Beurteilung der geplanten Hochwasserschutzmaßnahmen	256
3.1.3	Dichtheitsprobe	232	4.6.1	Untersuchte Varianten	256
3.1.4	Aktuelle Probleme bei der Dichtheit der Dammbalken in den Fensterlaibungen ..	233	4.6.1.1	Überprüfung unterschiedlicher Sanierungsmaßnahmen bei zwei unterschiedlichen Wanddicken	258
3.2	Hochwasserschutz am Schloss Grimma ..	234	4.6.1.2	Evaluierung der Sanierungsmaßnahmen an den unterschiedlichen Gebäudeteilen	263
3.2.1	Voruntersuchungen	234	4.6.2	Diskussion der Versuchsergebnisse mit dem AG und Strategie für die Ertüchtigung der muldenseitigen Außenwände der Mühle	267
3.2.2	Planung der Hochwasserschutzmaßnahme	235	4.7	Sanierungsplanung	267
3.2.3	Bauausführung am Schloss Grimma	235	4.7.1	Probeverpressung	267
3.2.4	Mobiles Hochwasserschutzsystem für Wandöffnungen	237	4.7.1.1	Allgemeines	267
3.3	Schäden infolge des Hochwassers im Jahre 2013	239	4.7.1.2	Beschreibung der Probeverpressung	268
3.4	Schlussbemerkungen zu den Hochwasserschutzprojekten in Grimma	239	4.7.1.3	Nachträglich erforderliche Arbeiten zur Beurteilung des Verpresserfolgs	270
4	Hochwasserertüchtigung der ziegel-sichtigen Fassade der Jonitzer Mühle in Dessau-Waldersee	241	4.7.1.4	Schlussfolgerungen aus der Probeverpressung und Festlegung der Eckpunkte für die Hochwasserschutzertüchtigung	271
4.1	Zur Geschichte der Jonitzer Mühle	241	4.7.2	Ausführungsplanung zur Erlangung der Dichtheit der muldenseitigen Außenwand	273
4.2	Das Jahrhunderthochwasser 2002 und daraus resultierende Aufgaben für die Ertüchtigung der muldenseitigen Außenwand der Jonitzer Mühle	243	4.7.3	Herstellung der stationären Verschlüsse für die Fensteröffnungen im Erdgeschoss der Mühlenruine	274
4.3	Schadensaufnahme und -kartierung der muldenseitigen Außenwand der Mühle ..	244	4.8	Ausführung	274
4.4	Probenahme	246	4.9	Schlussbemerkungen zum Projekt „Jonitzer Mühle“	277
4.4.1	Ziegel, Sandstein und Mörtel aus dem Bestand	246	5	Zusammenfassung	278
4.4.2	Ziegel- und Sandsteinproben vom Materiallager	251	6	Literatur	280
4.4.3	Ausblühungen und Salze	251	7	Bildnachweis	280
4.5	Materialuntersuchungen und Ermittlung von relevanten Materialkennwerten	253			
4.5.1	Kennwertermittlung für die bauphysikalischen Simulationsrechnungen ..	253			
4.5.2	Nachweis bauschädlicher Salze	254			

C Bemessung

I	Aussteifungsscheiben aus unbewehrtem Mauerwerk – Analyse und Bewertung von Berechnungsmodellen und Bemessungsmethoden	283
	Thomas Kranzler, Bonn	

1	Einleitung	283	2.6	Versagen des Ecksteins nach Reibungsversagen in Wandscheibenmitte	287
1.1	Motivation	283	3	Kritische Analyse ausgewählter Schubfestigkeitsmodelle	287
1.2	Einführung und Begriffe	284	3.1	Einführung	287
2	Tragverhalten, Versagensarten und relevante Materialeigenschaften	285	3.2	Schubfestigkeitsmodelle basierend auf <i>Mann</i> und <i>Müller</i>	288
2.1	Allgemeines	285	3.2.1	Allgemeines	288
2.2	Kippen – Zugversagen in der untersten Lagerfuge	285	3.2.2	Schubfestigkeit nach <i>Mann</i> und <i>Müller</i> ..	288
2.3	Biegeversagen	285	3.2.3	Schubfestigkeit nach <i>Graubner</i> und <i>Simon</i>	290
2.4	Horizontales Gleiten entlang der Lagerfugen	286	3.2.4	Schubfestigkeit nach <i>Simon</i>	291
2.5	Schubversagen	286			

3.2.5	Schubfestigkeit nach <i>Jäger</i> und <i>Schöps</i> ..	293	4.2.6	Versagen des Ecksteins nach Reibungs-	
3.3	Gegenüberstellung der Schubfestig-		4.2.7	versagen in Wandscheibenmitte	307
	keitsmodelle	295		Gegenüberstellung der rechnerischen	
3.4	Auswertung vorliegender Messwerte			Tragfähigkeiten	307
	zur Schubfestigkeit	296	4.3	Auswertung vorliegender Messwerte	
3.4.1	Überprüfung der Schubfestigkeitsmodelle			zur Tragfähigkeit geschosshoher Wand-	
	anhand des DIBt-Schubprüfverfahrens ..	296		scheiben	308
3.4.2	Kritische Anmerkung zum vereinheit-		4.3.1	Gegenüberstellung mit Versuchs-	
	lichten DIBt-Schubprüfverfahren	299		ergebnissen anhand des ESECMaSE-	
3.5	Zusammenfassung	299		Verfahrens	308
4	Analytische Berechnung der Tragfähig-		4.3.2	Bewertung und Analyse	310
	keit von Aussteifungsscheiben	300	4.4	Zusammenfassung	312
4.1	Einführung	300	5	Gewonnene Erkenntnisse und	
4.2	Rechnerische Tragfähigkeit nach			Bemessungsvorschlag	312
	<i>Navier</i> 'scher Biegelehre	300	5.1	Erkenntnisse	312
4.2.1	Grundlagen	300	5.2	Bemessungsvorschlag	312
4.2.2	Kippen der Aussteifungsscheibe	301	5.3	Verifikation des Bemessungsvorschlages ..	313
4.2.3	Biegeversagen	301	6	Zusammenfassung	313
4.2.4	Horizontales Gleiten entlang der Lager-			Literatur	314
	fugen	302			
4.2.5	Schubversagen	303			
II	Die Anwendung der Monte-Carlo-Methode zur Bestimmung der Zuverlässigkeit von Mauerwerksbauteilen	317			
	Hamidreza Salehi, Wolfram Jäger, Dresden und Mahdi Montazerolghaem, Teheran (Iran)				
1	Sicherheitsphilosophie und		3.4.5	Importance-Sampling-Methode	
	Bemessungsnormen	317		(Varianzreduktion)	324
2	Definitionen probabilistischer Methoden	318	4	Fallstudie 1: Generisches Modell	
2.1	Die Zufallsvariable	318		nach Gulvanessian	326
2.2	Grenzzustand	318	4.1	Stochastische Parameter	326
2.3	Methode nach <i>Ravindra</i>	320	4.2	Zuverlässigkeitsanalyse	326
3	Methoden der Zuverlässigkeitsanalyse ..	320	5	Fallstudie 2: Zuverlässigkeit einer	
3.1	First-Order Second-Moment Method ..	320		unbewehrten Wand unter Biege-	
3.2	Zuverlässigkeitsmethode 1. Ordnung			belastung	327
	(FORM – First-Order Reliability		5.1	Biegebelastung und zugehöriger	
	Method)	320		Grenzzustand	327
3.3	Berücksichtigung der Verteilungsarten ..	321	5.2	Wandgeometrie und stochastische	
3.4	Die Monte-Carlo-Methode	322		Parameter	328
3.4.1	Allgemeines	322	6	Schlussfolgerungen	330
3.4.2	Der Zufallszahlengenerator	323	7	Zusammenfassung	330
3.4.3	Das Erzeugen der Zufallsvariablen	323	8	Literatur	330
3.4.4	Erweiterte Monte-Carlo-Simulation				
	(Crude-Monte-Carlo-Simulation)	323			
III	Das vereinfachte Verfahren in Eurocode 6 für die Praxis	333			
	Detleff Schermer, Regensburg				
1	Einleitung	333	3.2.1	Wände mit überwiegender Druck-	
2	Vorschriftenlage	333		beanspruchung	334
3	Grenzen des vereinfachten Verfahrens ..	334	3.2.2	Mindestauflast von windbeanspruchten,	
3.1	Anwendungsgrenzen	334		tragenden Außenwänden	335
3.2	Nachweisumfang im vereinfachten		3.2.3	Erddruckbeanspruchte Kelleraußen-	
	Verfahren	334		wände	335
			3.2.4	Nichttragende Ausfachungswände	336

3.2.5	Vertikal nicht beanspruchte Innenwände	336	5.2	Deckenstützweite	339
3.3	Stark vereinfachtes Verfahren	336	5.3	Lastkombinationen – Einwirkungen	339
3.4	Ausgegliederte Nachweise	337	5.4	Tragwiderstand – Baustoffseite	344
4	Baustoffe	337	5.5	Innenwand – Beispiele zur Bemessung	345
5	Eingangsparameter	337	5.6	Außenwand monolithisch	346
5.1	Knicken und Knicklänge	337	6	Fazit	347
5.1.1	Zweiseitig knickgehaltene Wände	337	7	Literatur	347
5.1.2	Drei- und vierseitig knickgehaltene Wände	337			

D Bauphysik • Brandschutz

I Holzbalkenaufleger in historischem Mauerwerk: Analyse, Bewertung und energetische Sanierung mittels Innendämmung		351			
Ulrich Ruisinger, Eric Stöcker und John Grunewald, Dresden					
Horst Stopp, Peter Strangfeld und Andrea Staar, Cottbus					
Martin Krus, Wolfgang Hofbauer und Theo Großkinsky, Valley					
Tommy Odgaard und Søren Peter Bjarløv, Kongens Lyngby, Dänemark					
1	Einleitung	351	3.3	Erweiterung und Validierung der hygrothermischen Software	369
1.1	Ziele	351	3.4	Messungen am Holzbalkenkopfprüfstand unter Laborbedingungen	371
1.2	Stand der Wissenschaft und Technik	351	4	Prognosewerkzeuge für holzzerstörende Pilze	373
1.2.1	Holzbalkenköpfe im Außenmauerwerk	351	4.1	Modellhafte Beschreibung der Pilzresistenz von Hölzern	373
1.2.2	Kategorisierung der holzzerstörenden Pilze	353	4.2	Messungen zu Wachstumsvoraussetzungen und Wachstumsbeginn von holzabbauenden Pilzen	374
1.2.3	Pilzprognosewerkzeuge	353	4.3	Prognosewerkzeug zu holzabbauenden Pilzen	376
1.2.4	Hygrothermische Simulationsmodelle	354	4.4	Weiterentwicklung eines hygrothermischen Simulationswerkzeugs	376
2	Bestandsanalyse und Objektuntersuchungen	354	5	Ein Blick ins Ausland: Messungen von Kooperationspartnern	377
2.1	Konstruktionsdetails und Bauschäden	354	5.1.1	Beschreibung der Prüfaufbauten und Versuche	377
2.2	Datenerhebung zu Holzbalkendecken im Bestand	355	5.1.2	Geprüfte Konstruktionen	378
2.3	Messtechnische Untersuchungen an Objekten mit Holzbalkenköpfen	356	6	Zusammenfassung	378
2.3.1	Bahnmeistergasse in Senftenberg	356	7	Danksagung	379
2.3.2	Herrenschießhaus Nürnberg	357	8	Literatur	379
2.3.3	Schule Drebkau	358			
2.3.4	Schloss Drebkau	360			
2.3.5	Alte Schäferei Benediktbeuern	360			
3	Laboruntersuchungen	367			
3.1	Methodenvergleich zur Messung von Materialfeuchten	367			
3.2	Bestimmung anisotroper Materialeigenschaften von Hölzern	369			

E Normen • Zulassungen • Regelwerk

I Geltende Technische Regeln für den Mauerwerksbau (Deutsche, Europäische und Internationale Normen) (Stand 30.9.2015)		385			
Peter Rauh, Berlin					
1	Vorbemerkung	385			
2	Bauaufsichtliche Einführung des Eurocode 6 ab 01. Januar 2015 mit Übergangsregelung bis zum 31. Dezember 2015	386			
3	Regelwerk	386			

II	Verzeichnis der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen für den Mauerwerksbau (Stand 31.8.2015)	403		
	Wolfram Jäger, Dresden und Roland Hirsch, Berlin			
1	Mauerwerk mit Normal- oder Leichtmörtel	405	2.3	Wandbauart aus Planelementen in drittel- oder halbgeschosshoher Ausführung
1.1	Mauersteine üblichen Formates	405	2.4	Weitere Dünnbettmörtel
1.1.1	Mauerziegel	405	3	Mauerwerk mit Mittelbettmörtel
1.1.2	Verfüllziegel	414	4	Vorgefertigte Wandtafeln
1.1.3	Kalksandsteine	415	4.1	Geschosshohe Mauertafeln
1.1.4	Betonsteine	417	4.2	drittel- oder halbgeschosshohe Mauertafeln
1.1.4.1	Vollsteine und Vollblöcke	417	4.3	Verguss- und Verbundtafeln
1.1.4.2	Hohlblocksteine	420	5	Geschosshohe Wandtafeln
1.1.4.3	Hohlblocksteine mit integrierter Wärmedämmung	421	6	Schalungsstein-Bauarten
1.1.5	Sonstige Mauersteine	421	7	Trockenmauerwerk
2	Mauerwerk mit Dünnbettmörtel	422	8	Mauerwerk mit PU-Kleber
2.1	Plansteine üblichen Formates und dafür zugelassene Dünnbettmörtel	422	9	Bewehrtes Mauerwerk
2.1.1	Planziegel	422	9.1	Bewehrung für bewehrtes Mauerwerk
2.1.2	Planziegel mit integrierter Wärmedämmung	440	9.2	Hochlochziegel für bewehrtes Mauerwerk
2.1.3	Planverfüllziegel	451	9.3	Stürze
2.1.4	Kalksand-Plansteine	454	10	Ergänzungsbauteile
2.1.5	Porenbeton-Plansteine	458	10.1	Mauerfuß-Dämmelemente
2.1.6	Beton-Plansteine	460	10.2	Anker zur Verbindung der Mauerwerksschalen von zweischaligen Außenwänden
2.1.6.1	Planvollsteine und Planvollblöcke	460	10.3	Sonstige Ergänzungs-elemente
2.1.6.2	Planhohlblocksteine	468	Anhang	509
2.1.6.3	Plansteine aus Leichtbeton mit integrierter Wärmedämmung	473	Zulassungsübersicht	509
2.2	Planelemente und dafür zugelassene Dünnbettmörtel	480		
2.2.1	Planziegel-Elemente	480		
2.2.2	Kalksand-Planelemente	481		
2.2.3	Porenbeton-Planelemente	487		
2.2.4	Beton-Planelemente	488		
F	Forschung			
I	Übersicht über abgeschlossene und laufende Forschungsvorhaben im Mauerwerksbau	529		
	Anke Eis und Sebastian Ortlepp, Dresden			
Vorbemerkung	529	2	Laufende Forschungsvorhaben	536
Forschungsstellen (F)	529	2.1	Übersicht Forschungsprojekte und Forschungsstellen	536
1	Abgeschlossene Forschungsvorhaben	533	2.2	Kurzberichte
1.1	Übersicht Forschungsprojekte und Forschungsstellen	533	2.2.1	Innovative Dämmtechnik zur Reduzierung der Transmissionswärmeverluste im Mauerwerksbau mit dem Ziel der Gewährleistung des 0-Energie-Standards – 0-EneMau
1.2	Kurzberichte	533	2.2.2	Energetische und mechanische Optimierung des Anschlusses der Decke an monolithische Außenwände aus Mauerwerk mit Passivhausstandard
1.2.1	Überarbeitung des DGfM-Lehrportals Mauerwerksbau	533		
1.2.2	Nutzung solarer Wärmeenergie in Klinkerfassaden	534		
1.2.3	NIKER – New integrated knowledge based approaches to the protection of cultural heritage from earthquake-induced risk	534		

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).

Bjarløv, Søren Peter, Prof., Section for Building Design, Technical University of Denmark, Brovej 118, DK 2800 Kongens Lyngby, Denmark. (D I).

Boekhoff, Beate, Dipl.-Ing., Technische Universität Dresden, Fakultät Architektur, Lehrstuhl für Tragwerksplanung, Zellescher Weg 17, 01069 Dresden. Wissenschaftliche Mitarbeiterin (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; Mitglied einschlägiger DIN-Normenausschüsse; Mitglied des DIBt-Sachverständigenausschusses „Wandbauelemente“; RILEM-Beauftragter für Deutschland; Redaktionsbeiratsmitglied der Zeitschrift „Mauerwerk“ (A I).

Burkert, Toralf, Dr.-Ing., Jäger Ingenieure GmbH, Büro Weimar, Paul-Schneider-Straße 17, 99423 Weimar.

Tragwerksplaner mit Schwerpunkt Sanierung historischer Bauwerke; Fachplaner für vorbeugenden baulichen Brandschutz; Lehrauftrag „Statisch-konstruktive Sanierung historischer Bauwerke“ an der Technischen Universität Dresden; Mitarbeit in der WTA-Arbeitsgruppe 4-3 „Instandsetzung von Mauerwerk“ (B III, B V).

Butenweg, Christoph, Prof. Dr.-Ing., SDA-engineering GmbH, Kaiserstraße 100, 52134 Herzogenrath; sowie: FH Aachen, Heinrich-Mußmann-Straße 1, 52428 Jülich. Lehrgebiet Technische Mechanik und Konstruktiver Ingenieurbau (F II).

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

Fehling, Ekkehard, Prof. Dr.-Ing., Universität Kassel, FB 14 – Fachgebiet Massivbau, Kurt-Wolters-Straße 3, 34109 Kassel. Beratender Ingenieur, Prüflingenieur für Baustatik (F II).

Großkinsky, Theo, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Standort Holzkirchen, Fraunhoferstraße 10, 83626 Valley. Mitarbeiter Hygrothermik (D I).

Grunewald, John, Prof. Dr.-Ing., Technische Universität Dresden, Institut für Bauklimatik, Zellescher Weg 17, 01069 Dresden. Leiter des Instituts für Bauklimatik und Inhaber der Professur für Bauphysik (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 Mauer Mörtel und der DIN-Arbeitsausschüsse „Mauerwerk“, Geschäftsführer des DIBt-Sachverständigenausschusses „Wandbauelemente“ (A II, E II).

Hofbauer, Wolfgang Karl, Dr. rer. nat., Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP, Arbeitsgruppe Biologie am Bau, Abteilung Bauchemie, Biologie und Hygiene, Fraunhoferstraße 10, 83626 Valley. Leiter der Arbeitsgruppe Biologie (D I).

Hohl, Matthias, Dipl.-Ing. (FH), „Budowlana Hohlbud“ Matthias Hohl, ul. Krzywińskie 31, 11-610 Pozezdrze, Polen (B VI).

Ismail, Mohammed, Dr.-Ing., Universität Kassel, Abt. Bauingenieur- und Umweltingenieurwesen, Kurt-Wolters-Straße 3, 34109 Kassel. Wissenschaftlicher Mitarbeiter (F II).

Jäger, Hans-Joachim, Dr.-Ing., Gesellschaft zur Förderung der Frauenkirche Dresden e. V., Georg-Treu-Platz 3, 01067 Dresden. Geschäftsführer (B 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; Mitglied des DIBt-Sachverständigenausschusses „Wandbauelemente“, Chefredakteur der Zeitschrift „Mauerwerk“ (Herausgeber, A II, B II, B VI, C II, E II).

Köberle, Thomas, Dipl.-Geol., Technische Universität Dresden, Fakultät Architektur, Lehrstuhl für Tragwerksplanung, Zellescher Weg 17, 01069 Dresden. Wissenschaftlicher Mitarbeiter (B VI).

Kranzler, Thomas, Dr.-Ing., Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V., Schaumburg-Lippe-Straße 4, 53113 Bonn. Abteilungsleiter Normung und Anwendungstechnik (C I).

Krus, Martin, Prof. Dr.-Ing., Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Standort Holzkirchen, Fraunhoferstr. 10, 83626 Valley.
Gruppenleiter Feuchtemanagement Abteilung Hygrothermik (D I).

Kubalski, Thomas, M. Sc., Lehrstuhl für Baustatik und Baudynamik, RWTH Aachen University, Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen.
Wissenschaftlicher Mitarbeiter (F II).

Lützw, Thomas, Dipl.-Ing., Hilti Deutschland AG, Hiltistraße 2, 86916 Kaufering.
Leiter Fachbereich Ingenieurbau (B I).

Marinković, Marko, M. Sc., Universität Belgrad, Fakultät Bauingenieurwesen, Bulevar Krala Aleksandra 73, 11000 Belgrad.
Stipendiat (F II).

Montazerolghaem, Mahdi, M. Sc., Technische Universität Dresden, Fakultät Architektur, Lehrstuhl Tragwerksplanung, Zellescher Weg 17, 01069 Dresden (bis Mitte 2015).
Promovend (C II).

Odgaard, Tommy, M.Sc., Section for Building Design, Technical University of Denmark, Brovej 118, DK 2800 Kongens Lyngby, Denmark.
Wissenschaftlicher Mitarbeiter (D I).

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 (F I).

Pfetzing, Thomas, M. Sc. / Dipl.-Ing., Universität Kassel, Fachgebiet Massivbau, Kurt-Wolters-Straße 3, 34109 Kassel.
Wissenschaftlicher Mitarbeiter (F II).

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

Reuter, Martin, Dipl.-Ing. SFI, Hilti Deutschland AG, Hiltistraße 2, 86916 Kaufering.
Abt. MEA (B I).

Ruisinger, Ulrich, Dipl.-Ing., Technische Universität Dresden, Institut für Bauklimatik, Zellescher Weg 17, 01069 Dresden.
Wissenschaftlicher Mitarbeiter (D I).

Salehi, Hamidreza, M. Sc., Technische Universität Dresden, Fakultät Architektur, Lehrstuhl für Tragwerksplanung, Zellescher Weg 17, 01069 Dresden.
Wissenschaftlicher Mitarbeiter (C II).

Schermer, Detleff, Prof. Dr.-Ing., Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Fakultät Bauingenieurwesen, Prüfeningstraße 58, 93049 Regensburg.
Prüfingenieur und Prüfsachverständiger für Standsicherheit, Mitarbeit in einschlägigen DIN-Normenausschüssen (C III).

Schöps, Peter, Dipl.-Ing., Jäger Ingenieure GmbH, Wichernstraße 12, 01445 Radebeul.
Tragwerksplaner (B III).

Staar, Andrea, Dipl.-Ing. (FH) / M. Eng., Fakultät 6, BTU Cottbus-Senftenberg, Lipezker Straße 47, 03048 Cottbus.
Wissenschaftliche Mitarbeiterin (D I).

Stöcker, Eric, Dipl.-Ing., Technische Universität Dresden, Institut für Bauklimatik, Zellescher Weg 17, 01069 Dresden.
Wissenschaftlicher Mitarbeiter (D I).

Stopp, Horst, Prof. Dr. sc. techn., Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, LG Bauphysik, Platz d. Deutschen Einheit 1, 03046 Cottbus
Bauphysik, Versorgungstechnik (D I).

Strangfeld, Peter, Dr.-Ing., Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, Fakultät 6: Architektur, Bauingenieurwesen, Stadtplanung, Lipezker Straße 47, 03048 Cottbus
Versorgungstechnik (D I).

A Baustoffe ■ Bauprodukte

I Eigenschaften von Mauersteinen, Mauermörtel, Mauerwerk und Putzen 3

Wolfgang Brameshuber, Aachen

II 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 Verfasser würde sich über Hinweise, z. B. über fehlende wesentliche Literaturangaben etc., sehr freuen und diese im folgenden Jahrgang gern aufnehmen. 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 teilweisen Neugestaltung 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 berücksichtigt 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-/Stegan-

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

Mauerstein	n	$\beta_{D,st}$ Wertebereich N/mm ²	$\beta_{D,st,l} / \beta_{D,st}$		
			\bar{x}	min x	max x
Mz	2	21,9/22,7	0,67	0,64	0,70
HLz ¹⁾	5	20...47	0,23	0,12	0,33
HLz ²⁾	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) $\rho_d \leq 1,0 \text{ kg/dm}^3$

ordnung als Ursache. Im Einzelfall wird empfohlen, den Nachweis experimentell zu führen. Für 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

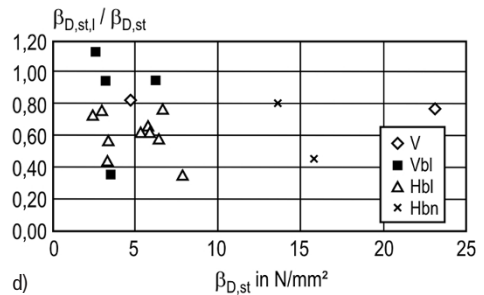
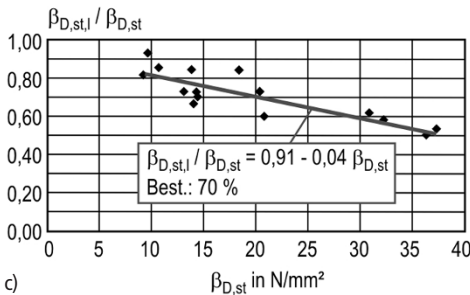
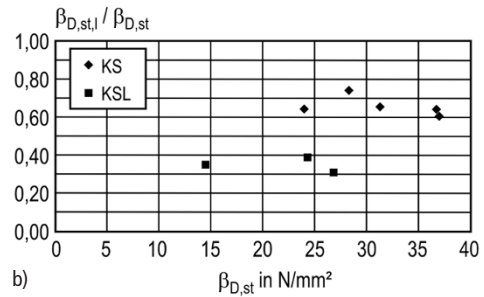
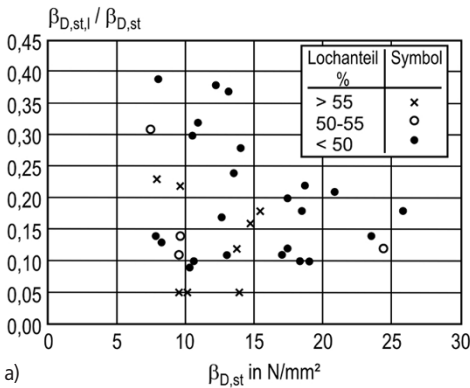


Bild 1. Steinlängs- $(\beta_{D,st,l})$ / Normdruckfestigkeit $(\beta_{D,st})$ in Abhängigkeit von der Normdruckfestigkeit [10]; a) Leichthochlochziegel, b) Kalksandvollsteine, Kalksandlochsteine, c) Porenbeton-Blocksteine, Porenbeton-Plansteine, d) Leichtbetonsteine, Betonsteine

Tabelle 2. Verhältniswerte Steinzug-/Steindruckfestigkeit

Steinart	$\delta_i = f_{bt,cal} / f_{st}$ 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 ≥ 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 ≥ 4	0,07	0,05...0,09	7
Porenbeton	$0,082 \cdot \frac{1}{1,25} \cdot \frac{1}{0,7 + \left(\frac{f_{st}}{25}\right)^{0,5}}$	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
 $\beta_{z,l}$ 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 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 [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:

$$E_D = \frac{\max \sigma_D}{3 \cdot \epsilon_1}$$

mit

ϵ_1 Längsdehnung bei 1/3 max σ_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%)

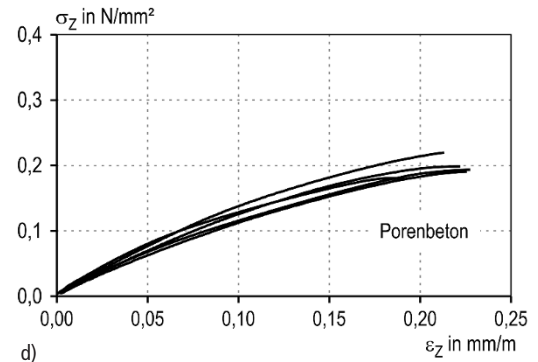
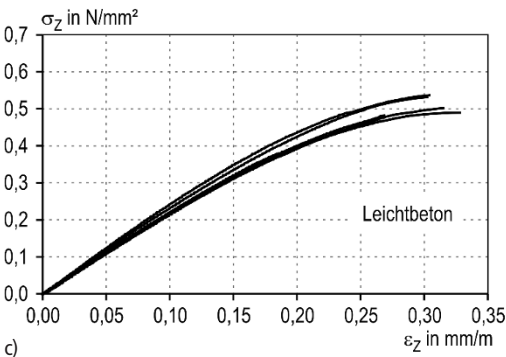
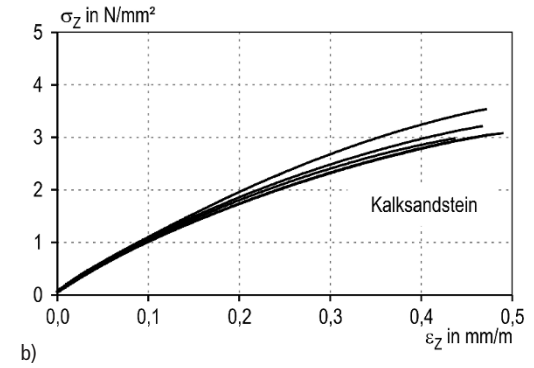
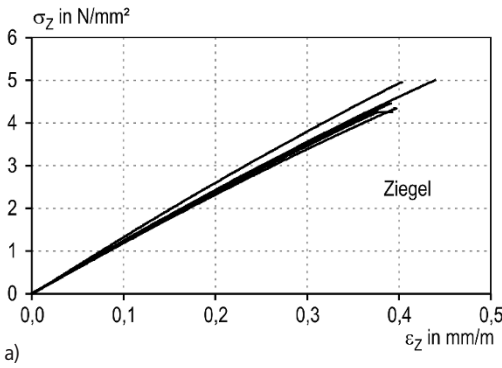


Bild 2. Spannungs-Dehnungslinien von Ziegeln (a), Kalksandstein (b), Leichtbeton (c) und Porenbeton (d)

Tabelle 3. Mauersteine; Querdehnungsmodul $E_{q,l}$ in 10^3 N/mm², Querdehnungszahl μ , Anhaltswerte [19–22], aus [10]

Mauerstein	Festigkeitsklasse	$E_{q,l}$		μ
		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 β_Z

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

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

3.2.2 Scherfestigkeit β_S

Die Scherfestigkeit von Mauermörtel ist definiert als maximale Spannung bei einschnittiger Scherbeanspruchung. Ein genormtes Prüfverfahren existiert nicht. Üblicherweise wird die Scherfestigkeit an nach 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 β_S und der Normmörteldruckfestigkeit β_D , ermittelt nach DIN EN 1015-11 [33] (Bereich für β_D : 4 bis 18 N/mm²):

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

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

Die Auswertung einer Vielzahl von Festigkeitsprüfungen in [26] ergab

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

$$\beta_S = 2 \beta_Z$$

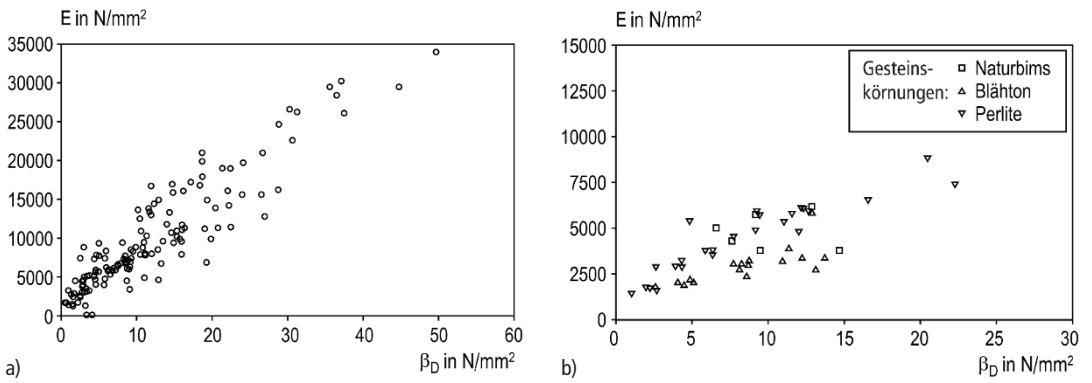


Bild 3. Mauermörtel; Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Normdruckfestigkeit β_D [10]; a) Normalmörtel, b) Leichtmörtel

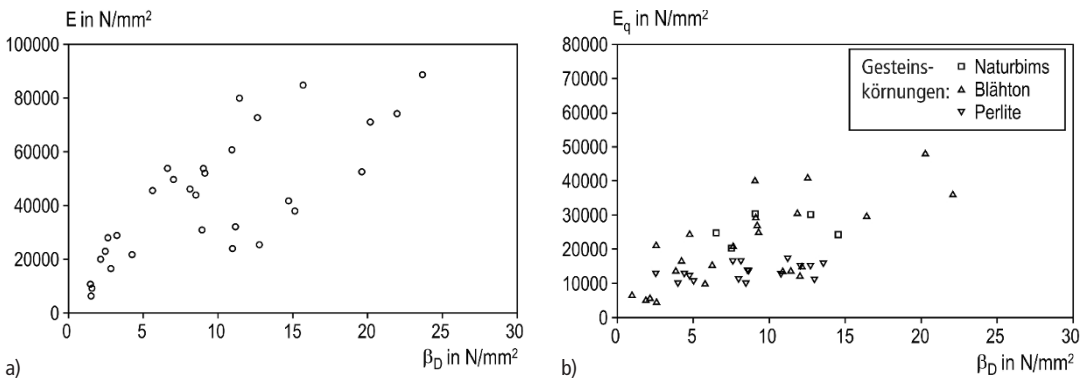


Bild 4. Mauermörtel; Querdehnungsmodul E_q in Abhängigkeit von der Normdruckfestigkeit β_D [10]; a) Normalmörtel, b) Leichtmörtel

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

Mörtelart	n	ρ_d	β_D	E_q
		kg/dm ³	N/mm ²	10 ³ N/mm ²
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
 ρ_d Trockenrohddichte
 β_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

3.3 Verformungseigenschaften

3.3.1 E-Modul (Längsdehnungsmodul) E

Der E-Modul wird in der Regel nach DIN 18555-4 [29] zusammen mit dem Querdehnungsmodul ermittelt. Nach den vorliegenden Versuchsergebnissen lassen sich folgende Beziehungen zwischen E und der Normdruckfestigkeit β_D angeben [30] (s. auch Bild 3):

a) Normalmauermörtel

$$E = 2100 \cdot \beta_D^{0,7} \text{ bzw. } E \leq 700 \cdot \beta_D$$

b) Leichtmauermörtel mit Gesteinskörnungen aus Blähton

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

c) Leichtmauermörtel mit Gesteinskörnungen aus Perlite

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

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 Querspannungen im Stein, wodurch die Mauerwerkdruckfestigkeit verringert werden kann. Dies ist besonders bei leichten Leichtmauermörteln mit sehr verformbaren Gesteinskörnungen der Fall. Ein Zusammenhang zwischen E_q und der Normdruckfestigkeit β_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 Leichtmauermörtel 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 ϵ_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 [31] 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 $\epsilon_{s,e}$ (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 ϕ)

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 ϕ_{∞} im Bereich von rd. 5 bis 15, im Mittel von etwa 10 [32]. 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. In Abhängigkeit der Mörtelart und der Mörtelgruppe sind in DIN V 18580 [33] Mindestanforderungen an die Verbundfestigkeit im Alter von 28 Tagen angegeben. Geprüft wird die Haftscherfestigkeit entweder nach DIN 18555-5 [34] oder nach dem europäischen Verfahren in DIN EN 1052-3 [35]. Eine sehr detaillierte Zusammenfassung von Prüfmethode und Kennwerten wurde in [36] veröffentlicht. In [37] wird auf die Beanspruchungsarten spezifisch eingegangen.

4.2 Haftscherfestigkeit

Das Institut für Bauforschung der RWTH Aachen hat im Rahmen eines Forschungsprojektes [38] eine sehr umfassende Auswertung von Haftscherfestigkeitsuntersuchungen durchgeführt und damit verdeutlicht, dass eine Differenzierung zwischen unterschiedlichen Stein-/Mörtelkombinationen bezüglich 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 (s. Abschn. 5.5), obwohl hier die Drehbewegung des Steins einer Torsionsbeanspruchung entspricht. In [36] und [39] wird darauf speziell eingegangen.

4.3 Haftzugfestigkeit

Dieser Kennwert ist u. a. für die Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen von Relevanz. Tabelle 8 ist [10] 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 [15] (s. auch [40]) beschrieben.

Tabelle 6a. Kalksandsteine; Haftscherfestigkeit β_{HS}

Mauerstein	Mauermörtel	PV	n (n_i)	h_m	min \bar{x}	max \bar{x}	\bar{x}
				M.-%			
KS-Referenz	NM II	DIN	3 (> 15)	3,0...12,1 ¹⁾	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 ¹⁾	0,02	0,60	0,19
		EN	10 (49)	5,5...11,3 ¹⁾	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 ¹⁾	0,37	0,58	0,47
		EN	–	–	–	–	–
	LM 36	DIN	3 (30)	5,0 ¹⁾	0,12	0,82	0,43
		EN	–	–	–	–	–
DM	DIN	21 (170)	3,4...5,0 ¹⁾	0,37	1,68	0,94	
	EN	–	–	–	–	–	
KS (ohne Referenz)	NM II	DIN	1 (– ²⁾)	1,8	–	–	0,06
		EN	4 (40)	14,4	0,16	0,64	0,37
	NM IIa	DIN	21 (> 76)	1,8...3,2 ¹⁾	0,01	0,51	0,20
		EN	21 (> 67)	1,8...10,5 ¹⁾	0,02	0,31	0,13
	NM III	DIN	2 (– ²⁾)	1,8...3,2	0,04	0,07	0,06
		EN	13 (> 27)	1,5...13,2 ¹⁾	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 ¹⁾	0,46	1,07	0,78
		EN	12 (56)	2,7...6,8 ¹⁾	0,10	0,90	0,43

PV Prüfverfahren
n Anzahl der Versuchsserien
(n_i) Anzahl der Einzelwerte
 h_m 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.