

2018

MAUERWERK KALENDER



Brücken
Bauen im Bestand

2018

MAUERWERK KALENDER

Brücken
Bauen im Bestand

Herausgegeben von
Wolfram Jäger, Dresden

43. Jahrgang

Hinweis des Verlages

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

Titelbild: Europäisches Hansemuseum Lübeck
Foto: Werner Huthmacher, Berlin

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.

© 2018 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 Datenverarbeitungsanlagen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden.

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

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

Umschlaggestaltung: Sonja Frank, Berlin
Herstellung: pp030 – Produktionsbüro Heike Praetor, Berlin
Satz: le-tex publishing services GmbH, Leipzig
Printed in the Federal Republic of Germany.
Gedruckt auf säurefreiem Papier.

ISSN 0170-4958

Print ISBN 978-3-433-03181-0

ePDF ISBN 978-3-433-60806-7

ePub ISBN 978-3-433-60807-4

eMobi ISBN 978-3-433-60808-1

oBook ISBN 978-3-433-60805-0

Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

der Mauerwerk-Kalender 2018 beinhaltet neben weiteren Themen die Schwerpunkte „Brücken“ sowie „Bauen im Bestand“, wobei sich beide in unserem Fall für eine ganze Reihe Beiträge ergänzen. Durch seinen Umfang insgesamt und damit auch die inhaltliche Breite der einzelnen Beiträge, die das Format der Publikation einzuräumen in der Lage ist, konnte die Geschichte einer Brücke von Anfang bis Ende erzählt werden: Die geschichtliche Entwicklung der Brücke über die Aller bei Verden beginnt mit der Eröffnung der Eisenbahnstrecke am 12. Dezember 1847, wobei die Allerbrücke mit 393 m Länge damals die längste im Königreich Hannover war. Sie bestand aus einer ein-gleisigen Holzkonstruktion mit massiven Pfeilern; der hölzerne Überbau jedoch musste aufgrund des stark zugenommenen Eisenbahnverkehrs bereits nach wenigen Jahren durch einen dauerhafteren Gewölbeüberbau ersetzt werden. In den letzten Tagen des Zweiten Weltkriegs wurden die Brückenbögen des mittleren Abschnitts gesprengt, um die Benutzung durch englische Truppen zu verhindern. Die eilige Reparatur erfolgte mit Stahlträgern und Stützen aus Holz und Stahl, später ersetzten betonierete Pfeiler und Stahlträger den Behelf. Leider verschlechterte sich der Zustand der Brücke mit den Jahren immer mehr, sodass sie nur noch die Zeit bis zur Fertigstellung des Neubaus im Herbst 2015 überbrücken helfen konnte. Monitoring-Systeme sicherten inzwischen den Verkehr und die Standsicherheit ab, während in unmittelbarer Nähe der Ersatzneubau entstand. Allerdings ergab sich mit dem vorgesehenen Abbruch der alten Brücke die große Chance, das Bauwerk experimentell untersuchen zu können ohne Rücksicht auf etwaige dabei auftretende Beeinträchtigungen bei einer Weiternutzung – der Abbruch war ohnehin beschlossen und geplant. Die Versuchslasten konnten deshalb weit über dem Gebrauchslastniveau liegen. Außerdem wurden parallele Berechnungen nach dem modernsten Stand der Technik durchgeführt und diese dann mit dem tatsächlichen Verhalten des Bauwerks während der Belastungsversuche verglichen und somit die Berechnungsmethoden validiert. Insgesamt 8 Beiträge in diesem Mauerwerk-Kalender beschäftigen sich mit den einzelnen Stadien der Untersuchungen. Das Ergebnis ist ein wertvoller Beitrag zur Erweiterung der Kenntnisse zum realen Tragverhalten von Gewölbebrücken.

– Im Bereich *Baustoffe · Bauprodukte* finden Sie den leicht aktualisierten Beitrag über die Eigenschaftswerte von Mauersteinen, Mauermörtel, Mauerwerk und Putzen mit Angabe der zugrunde liegenden Quellen. Der zweite Aufsatz beschäftigt sich mit der Druckfestigkeit von Leichtbeton-Mauerwerk und stellt deren Ermittlung bzw. Festlegung bei der Übertragung der bisherigen Werte in den EC 6 dar. Der Beitrag über den

Mauerwerksbau mit abZ stellt die im letzten Jahr neu erteilten Zulassungen des Fachgebietes vor.

– Die Abteilung *Konstruktion · Bauausführung · Bauwerkserhaltung* beschäftigt sich in der Hauptsache mit den einzelnen Beiträgen zur bereits erwähnten Brücke über die Aller bei Verden. Weiterhin gibt die Ausarbeitung „Zukunftsfähiges Mauerwerk“ Einblick in konstruktive Einflussmöglichkeiten auf Kosten und Nachhaltigkeit der Bauwerke. Das neue WTA-Merkblatt „Erhaltung und Instandsetzung von Mauerwerk“ wird von den Mitautoren vorgestellt. Zuletzt werden anhand des Umbaus eines denkmalgeschützten Gebäudeensembles in München Möglichkeiten und Grenzen der Modellbildung in der Tragwerksplanung bei einem Umbau gezeigt. Die historische Bausubstanz kann dort auch nach dem Umbau einen wesentlichen Lastanteil übernehmen.

– Das Kapitel *Bemessung* zeigt die Anwendung des Teilsicherheitskonzepts im Mauerwerksbau bei nicht-linearen Problemen und berichtet von aktuellen Forschungsergebnissen aus der deutschen und europäischen Normungsarbeit. Infolge der großen Fortschritte der Computertechnik sowie der Berechnungssoftware ist die nichtlineare Berechnung eines Tragwerks heute auch für den praktizierenden Ingenieur möglich.

– Die Rubrik *Bauphysik · Brandschutz* geht auf die aktuelle Problematik des Brandschutzes bei WDVS ein und gibt einen Leitfaden für die Brandschutzbemessung nach EC 6, wobei das Augenmerk auf den gesetzlichen Grundlagen sowie den prüftechnischen Randbedingungen liegt, ergänzt durch Bemessungsbeispiele.

– Im Bereich *Normen · Zulassungen · Regelwerk* steht ein Überblick über die aktuell geltenden Technischen Regeln sowie der Zugriff auf sämtliche zulassungsbedürftige Neuentwicklungen des Fachgebietes in tabellarischen Übersichten, gegliedert nach dem Einsatzgebiet der jeweiligen Produkte, zur Verfügung. Dem Verzeichnis folgt eine Liste, geordnet nach Zulassungsnummern und mit Verweisen auf die entsprechenden Seiten dieses Beitrags sowie auf die des Beitrags A II aus dem Kapitel *Baustoffe · Bauprodukte*.

– Der Bereich *Forschung* schließt mit dem jährlichen Überblick über die aktuelle Forschungssituation im Mauerwerksbau den Kalender ab.

Ich bedanke mich bei allen Mitwirkenden für ihre Unterstützung und wünsche Ihnen, verehrte Leserinnen und Leser, eine gute Lektüre zu spannenden Themen. Mögen die Erkenntnisse des vorliegenden 43. Jahrgangs Sie in der täglichen Arbeit mit Mauerwerk in Theorie und Praxis motivieren und unterstützen.

Dresden,
im Januar 2018

Wolfram Jäger
ji@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
- III Charakteristische Druckfestigkeitswerte für Leichtbeton-Mauerwerk 55
Markus Graubohm, Aachen, und Horst Glitza, Kisselbach

B Konstruktion • Bauausführung • Bauwerkserhaltung

- I Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Bauwerksgeschichte, Zustandsentwicklung und Monitoring 77
Gregor Schacht, Steffen Marx, Ludolf Krontal, Hannover; Erich Schwinge, Kirchlinteln und Oliver Hahn, Weimar
- II Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Planung und Vorbereitung der experimentellen Untersuchungen 93
Gregor Schacht, Lukas Müller, Jens Piehler, Steffen Marx, Hannover und Erik Meichsner, Weimar
- III Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Durchführung und Auswertung 113
Jens Piehler, Gregor Schacht und Steffen Marx, Hannover; Gunter Hahn und Volker Slowik, Leipzig
- IV Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Nachrechnung der Belastungsversuche mittels nichtlinearer Finite-Elemente-Simulationen 139
Nick Bretschneider, Stephanie Franck, Volker Slowik, Leipzig und Steffen Marx, Hannover
- V Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Lasteinleitung im Bogenpfeiler 169
Viktor Bartolomei, Heidi Hastedt, Heinrich Wigger, Thomas Luhmann, Oldenburg und Jens-Uwe Schulz, Detmold
- VI Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Lasertracking und GBSAR zur Verformungsmessung 205
Jens-André Paffenholz, Ulrich Stenz, Ingo Neumann, Hannover; Isabelle Dikhoff und Björn Riedel, Braunschweig
- VII Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Terrestrisches Laserscanning zur Verformungsmessung 221
Daniel Wujanz, Mathias Burger, Frank Neitzel, Berlin; Ralf Lichtenberger, Krefeld; Florian Schill, Andreas Eichhorn, Darmstadt; Ulrich Stenz, Ingo Neumann und Jens-André Paffenholz, Hannover
- VIII Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Optische korrelationsbasierte Messtechnik zur lastinduzierten Verformungsmessung 241
Mathias Burger, Daniel Wujanz, Frank Neitzel, Berlin und Ralf Lichtenberger, Krefeld
- IX Zukunftsfähiges Mauerwerk 251
Dietmar Walberg, Kiel
- X Erhaltung und Instandsetzung von Mauerwerk – Konstruktion und Tragfähigkeit 267
Heinrich Wigger, Oldenburg und Heiko Twelmeier, Braunschweig
- XI Umbau und Erweiterung des denkmalgeschützten Gebäudeensembles auf der Maximilianstraße 6–8 in München 281
Bernhard Brummer, München und Toralf Burkert, Weimar

C Bemessung

- I Anwendung des Teilsicherheitskonzepts im Mauerwerksbau bei nichtlinearen Problemen 313
Tammam Bakeer, Hamidreza Salehi, Dresden

D Bauphysik • Brandschutz

- I Brandschutz bei Wärmedämm-Verbundsystemen 333
Thomas Merkwitsch, Nabil A. Fouad, Hannover
- II Brandschutzbemessung von Mauerwerkskonstruktionen nach Eurocode 6 357
Thorsten Mittmann, Braunschweig

E Normen ▪ Zulassungen ▪ Regelwerk

- I Geltende Technische Regeln für den Mauerwerksbau (Deutsche, Europäische und Internationale Normen)
(Stand 31.07.2017) 373
Peter Rauh, Berlin und Carola Hauschild, Radebeul
- II Verzeichnis der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen für den Mauerwerksbau (Stand 31.7.2017) 391
Wolfram Jäger, Dresden und Roland Hirsch, Berlin

F Forschung

- I Übersicht über abgeschlossene und laufende Forschungsvorhaben im Mauerwerksbau 529
Anke Eis, Radebeul

Stichwortverzeichnis 561

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 3

 2.1 Festigkeitseigenschaften 3

 2.1.1 Längsdruckfestigkeit 3

 2.1.2 Zugfestigkeiten 3

 2.2 Verformungseigenschaften 5

 2.2.1 Elastizitätsmodul senkrecht zur Lagerfuge unter Druckbeanspruchung .. 5

 2.2.2 Elastizitätsmodul in Steinlängsrichtung unter Zugbeanspruchung 6

 2.2.3 Spannungs-Dehnungslinie 6

 2.2.4 Querdehnungsmodul 6

 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 7

 3.3.1 E-Modul (Längsdehnungsmodul) E 7

 3.3.2 Querdehnungsmodul E_q 7

 3.3.3 Feuchtedehnung (Schwinden ϵ_s) 8

 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 9

5 Eigenschaftswerte von Mauerwerk 9

 5.1 Allgemeines 9

 5.2 Druckfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen 9

 5.2.1 Experimentelle Bestimmung 9

 5.2.2 Rechnerische Bestimmung 10

 5.3 Druckfestigkeit parallel zu den Lagerfugen 14

 5.4 Zugfestigkeit und -tragfähigkeit 14

 5.5 Biegezugfestigkeit und -tragfähigkeit ... 15

 5.6 Verformungseigenschaften 18

 5.6.1 Allgemeines 18

 5.6.2 Druckbeanspruchung senkrecht zu den Lagerfugen 18

 5.6.2.1 Druck-E-Modul E_D 18

 5.6.2.2 Querdehnungszahl μ_D und Dehnung bei Höchstspannung $\epsilon_{u,D}$ 18

 5.6.2.3 Völligkeitsgrad α_0 20

 5.6.3 Druckbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen 20

 5.6.3.1 Druck-E-Modul $E_{D,p}$ 20

 5.6.3.2 Dehnung bei Höchstspannung $\epsilon_{u,D,p}$... 20

 5.6.4 Zug-E-Modul E_Z (Zugbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen) 20

 5.6.5 Feuchtedehnung ϵ_f , (Schwinden ϵ_s , irreversibles Quellen ϵ_q), Kriechen (Kriechzahl ϕ), Wärmedehnungskoeffizient α_T 21

6 Feuchtigkeitechnische Kennwerte von Mauersteinen, Mauermörtel und Mauerwerk 22

 6.1 Kapillare Wasseraufnahme 22

 6.2 Wasserdampfdurchlässigkeit 23

7 Natursteine, Natursteinmauerwerk 23

8 Eigenschaftswerte von Putzen (Außenputz) 24

 8.1 Allgemeines 24

 8.2 Festigkeitseigenschaften 25

 8.2.1 Druckfestigkeit β_D 25

 8.2.2 Zugfestigkeit β_Z 25

 8.3 Verformungseigenschaften 25

 8.3.1 Zug-E-Modul E_Z , dynamischer E-Modul dyn E 25

 8.3.2 Zugbruchdehnung $\epsilon_{Z,u}$ 25

 8.3.3 Zugrelaxation ψ 25

 8.3.4 Schwinden ϵ_s , Quellen ϵ_q 25

 8.4 Eigenschaftszusammenhänge 26

9 Literatur 26

II	Neuentwicklungen beim Mauerwerksbau mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (abZ)	31			
	Wolfram Jäger, Dresden und Roland Hirsch, Berlin				
0	Allgemeines	33	4	Vorgefertigte Wandtafeln	47
0.1	Nachweis der Mindestauflast – Mauerwerk nach DIN 1053-1	33	5	Geschosshohe Wandtafeln	48
0.2	Wände mit teilweise aufliegender Decke – Mauerwerk nach DIN 1053-1	33	6	Schalungsstein-Bauarten	48
0.3	Sonderregelungen zur Knicklänge	34	7	Trockenmauerwerk	48
0.4	Gesonderte Regelungen zu Schlitzen	34	8	Mauerwerk mit PU-Kleber	48
1	Mauerwerk mit Normal- oder Leichtmörtel	34	9	Bewehrtes Mauerwerk	49
2	Mauerwerk mit Dünnbettmörtel	36	10	Ergänzungsbauteile	51
3	Mauerwerk mit Mittelbettmörtel	47	11	Literatur	53
			12	Bildnachweis	54
III	Charakteristische Druckfestigkeitswerte für Leichtbeton-Mauerwerk	55			
	Markus Graubohm, Aachen, und Horst Glitza, Kisselbach				
1	Einleitung	55	6	Regelungen für Mauerwerk aus Leichtbeton- und Betonsteinen in DIN EN 1996-1-1/NA [9] und DIN EN 1996-3/NA [10]	67
2	Regelungen in DIN 1053-100:2007-09	55			
3	Kurzer Abriss zur Entwicklung der Potenzformel	55	7	Gegenüberstellung der Angaben in DIN 1053-100 [2], Entwurf DIN 1053-11 [3] und DIN EN 1996-3/NA [10]	68
4	Vorgehensweise bei der Festlegung der charakteristischen Druckfestigkeits- werte für Leichtbeton-Mauerwerk	57	8	Behandlung der f_k -Werte in allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen und Vergleich mit DIN EN 1996-3/NA [10] bzw. Entwurf DIN 1053-11 [3]	69
4.1	Allgemeines	57			
4.2	Erfasste Daten	57			
4.3	Rechnerisch ermittelte Kennwerte	57			
4.4	Regressionsrechnungen und 5%-Quantil	58			
4.5	Auswahlkriterien bei der Auswertung	58			
4.6	Ergebnisse der Auswertung in [18]	58			
4.7	Auswertung in [27]	59	9	Hinweise für eine zukünftige Überarbeitung von [9] und [10]	71
4.8	Anmerkungen zur Datenbasis in [18] und [27]	65	10	Schlussbemerkung	72
4.9	Ergebnisse der bilateralen Gespräche zwischen Industrie und Bauaufsicht	65	11	Literatur	72
5	Regelungen für Mauerwerk aus Leichtbeton- und Betonsteinen in E DIN 1053-13 [4]	67			
B	Konstruktion • Bauausführung • Bauwerkserhaltung				
I	Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Bauwerksgeschichte, Zustandsentwicklung und Monitoring	77			77
	Gregor Schacht, Steffen Marx, Ludolf Krontal, Hannover; Erich Schwinge, Kirchlinteln und Oliver Hahn, Weimar				
1	Geschichtliche Entwicklung	77	3	Die neue Allerbrücke in Verden	83
1.1	Anfänge der niedersächsischen Eisenbahn	77	4	Messtechnische Überwachung während der Bauzeit	84
1.2	Die Gewölbebrücke	78	4.1	Einführung	84
1.3	Die Stahlbrücke	79	4.2	Monitoringkonzept für die Erneuerung der EÜ Aller und EÜ Wätern	85
2	Zustandsentwicklung in den letzten Jahrzehnten	80	4.3	Installation und Messdurchführung	86

4.4	Erfahrungen aus dem Projekt	89	5	Belastungsversuche an der historischen Gewölbebrücke in Verden	91
4.4.1	Probetrieb der Monitoringanlage	89			
4.4.2	Festlegung Grenzwerte	89	6	Literatur	92
4.4.3	Auswertung verschiedener Bauphasen	90			
II	Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Planung und Vorbereitung der experimentellen Untersuchungen				93
	Gregor Schacht, Lukas Müller, Jens Piehler, Steffen Marx, Hannover und Erik Meichsner, Weimar				
1	Einleitung	93	3.4.2	Variante GEWI-Pfähle	102
2	Aufgaben- und Zielstellung	93	3.5	Genehmigungsverfahren	104
2.1	Probleme der rechnerischen Bewertung von Gewölbebrücken	93	4	Belastungsregime	104
2.2	Ziele der Belastungsversuche	94	5	Messkonzept	106
3	Planung	95	6	Bauseitige Umsetzung	108
3.1	Ablauf und Randbedingungen	95	6.1	Herstellung Rückverankerung	108
3.2	Vorüberlegungen und Vorberechnungen	97	6.2	Herstellung Lasteinleitung	109
3.3	Lasteinleitung in den Bogen	100	6.3	Installation Messtechnik	109
3.4	Rückverankerung unter der Brücke	102	7	Literatur	110
3.4.1	Variante Verpressanker	102			
III	Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Durchführung und Auswertung				113
	Jens Piehler, Gregor Schacht und Steffen Marx, Hannover; Gunter Hahn und Volker Slowik, Leipzig				
1	Zielstellung	113	3.3	Mittragende Wirkung des Parallelgewölbes	127
2	Versuchsdurchführung	113	3.4	Erfassung von Rissbildungen mithilfe der 2-D-Fotogrammetrie	128
3	Versuchsauswertung	115	4	Vergleich der Messergebnisse mit den numerischen Voruntersuchungen	134
3.1	Trag- und Verformungsverhalten	115	5	Vergleich mit den geodätischen Messverfahren	136
3.1.1	Versuch 1	115	6	Literatur	137
3.1.2	Versuch 2	116			
3.1.3	Vergleich zwischen erstem und zweitem Belastungsversuch	117			
3.2	Dehnungs- und Spannungszustände im Gewölbemauerwerk	123			
IV	Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Nachrechnung der Belastungsversuche mittels nichtlinearer Finite-Elemente-Simulationen				139
	Nick Bretschneider, Stephanie Franck, Volker Slowik, Leipzig und Steffen Marx, Hannover				
1	Zielstellung	139	3.6	Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen der Vorberechnungen	148
2	Berechnungskonzept	139	4	Nachrechnung der Belastungsversuche	150
2.1	Zur geometrischen Modellierung	140	4.1	Geometrisches und Finite-Elemente-Modell	150
2.2	Bodenmodell	141	4.2	Materialparameter	152
2.3	Nichtlineares Materialverhalten	142	4.3	Parameterstudien zum Einfluss der Materialparameter	153
2.4	Berücksichtigung von Vorschädigungen und von verschiedenen Bauzuständen	143	4.3.1	Einfluss der Bodeneigenschaften	153
2.5	Versagenskriterien und Sicherheitskonzept	144	4.3.2	Einfluss der Längsfuge	154
3	Vorberechnungen im Rahmen der Versuchsplanung	145	4.3.3	Einfluss der Mauerwerkssteifigkeit und Mauerwerkszugfestigkeit	156
3.1	Ziele und Vorgehensweise	145	4.3.4	Einfluss der Eigenschaften der unteren Gewölbeschale	157
3.2	Geometrisches und Finite-Elemente-Modell	146	4.3.5	Einfluss der Stirnmauern	159
3.3	Einwirkungen	146	4.4	Fazit aus den 3-D-Finite-Elemente-Simulationen	160
3.4	Materialparameter	146			
3.5	Berechnungsergebnisse	148			

5	Vergleichsrechnungen mit anderen Berechnungsverfahren	161	5.4	Diskussion der mit anderen Verfahren erhaltenen Rechenergebnisse	165
5.1	MEXE-Methode	161	6	Schlussfolgerungen	166
5.2	Stützlinienverfahren	162	7	Literatur	167
5.3	Traglastverfahren	164			
V	Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Lasteinleitung im Bogenpfeiler	169			
	Viktor Bartolomei, Heidi Hastedt, Heinrich Wigger, Thomas Luhmann, Oldenburg und Jens-Uwe Schulz, Detmold				
1	Einleitung	169	3.4	Übertragung der Ergebnisse auf bekannte Tragmodelle von dreischaligen Mauerwerkswänden	191
2	Kraftübertragung vom Bogen in den Pfeiler	169	3.5	Photogrammetrische Bilderfassung	191
3	Messtechnik und Verfahren	170	3.5.1	Verfahrensbeschreibung	191
3.1	Überblick	170	3.5.2	Messanordnung Belastungsversuch 1	193
3.2	Messung mit induktiven Wegaufnehmern	171	3.5.3	Auswertung und Ergebnisse Belastungsversuch 1	194
3.2.1	Verfahrensbeschreibung	171	3.5.4	Messanordnung Belastungsversuch 2	197
3.2.2	Messanordnung Belastungsversuch 1	171	3.5.5	Auswertung und Ergebnisse Belastungsversuch 2	198
3.2.3	Auswertung und Ergebnisse Belastungsversuch 1	174	3.6	Gegenüberstellung der Ergebnisse der induktiven Wegaufnehmer und der photogrammetrischen Bilderfassung	200
3.2.4	Messanordnung Belastungsversuch 2	177	4	Zusammenfassung und Ausblick	201
3.2.5	Auswertung und Ergebnisse Belastungsversuch 2	182	5	Literatur	203
3.3	Gegenüberstellung der Ergebnisse der induktiven Wegaufnehmer	189			
VI	Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Lasertracking und GBSAR zur Verformungsmessung	205			
	Jens-André Paffenholz, Ulrich Stenz, Ingo Neumann, Hannover; Isabelle Dikhoff und Björn Riedel, Braunschweig				
1	Motivation und Zielsetzung	205	3.4	Tragwerkskoordinatensystem und Verteilung der CCRs am Tragwerk	210
2	Das Tragwerk: die historische Allerbrücke bei Verden	205	4	Datenerfassung und Datenauswertung	210
3	Versuchsdurchführung und Rahmenbedingungen	206	4.1	Datenerfassung mit dem Lasertracker und Ableitung von 3-D-Verformungen	210
3.1	Eingesetzte Sensorik: Der Lasertracker Leica AT960-LR	207	4.1.1	Belastungsversuch V1 im März 2016	211
3.2	Eingesetzte Sensorik: Das GBSAR-System IBIS-S der Firma IDS	208	4.1.2	Belastungsversuch V2 im Juni 2016	212
3.3	Überprüfung der Stabilität der Sensorstandpunkte während der Versuchsdurchführung	209	4.2	Analyse der mit dem GBSAR-System erfassten Daten	213
			5	Diskussion der erzielten Ergebnisse	216
			6	Literatur	218
VII	Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Terrestrisches Laserscanning zur Verformungsmessung	221			
	Daniel Wujanz, Mathias Burger, Frank Neitzel, Berlin; Ralf Lichtenberger, Krefeld; Florian Schill, Andreas Eichhorn, Darmstadt; Ulrich Stenz, Ingo Neumann und Jens-André Paffenholz, Hannover				
1	Einleitung	221	3	Datenerfassung und Auswertung	224
1.1	Grundkonzept des terrestrischen Laserscannings	221	3.1	Eingesetzte Sensorik	225
1.2	Terrestrisches Laserscanning im Bauwesen	222	3.2	Statisches Laserscanning in Belastungsversuch V1	227
1.3	Referenzierung und Deformationsmessung basierend auf 3-D-Punktwolken	222	3.2.1	Surphaser-Messungen und deren Auswertung	227
2	Untersuchungsobjekt Gewölbebrücke	223	3.2.2	Z+F Imager 5006 Messungen und deren Auswertung	227

3.3	Statisches Laserscanning in Belastungsversuch V2	228	3.4.3	Prozessierung der Messdaten	232
3.3.1	Z+F Imager 5006h und ebenenbasierte Auswertung	228	3.4.4	Zeitliche Auswertung eines Klassenbereichs	234
3.3.2	Z+F Imager 5006 und hochgenaue 3-D-punktbasierte Auswertung	229	3.4.5	Räumliche Auswertung einer Epoche	234
3.4	Dynamisches Laserscanning während des Belastungsversuchs V2	232	3.5	Interpretation und Bewertung der Ergebnisse	236
3.4.1	Messsystem	232	4	Zusammenfassung und Ausblick	237
3.4.2	Messkonfiguration	232	5	Literatur	237
VIII	Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Optische korrelationsbasierte Messtechnik zur lastinduzierten Verformungsmessung				241
	Mathias Burger, Daniel Wujanz, Frank Neitzel, Berlin und Ralf Lichtenberger, Krefeld				
1	Einleitung	241	3.2.1	Zeitkontinuierliche Auswertung eines Einzelpunktes	245
2	Digitale Bildkorrelation	241	3.2.2	Flächenhafte Auswertung	245
2.1	Grundlagen	241	3.3	Interpretation der Ergebnisse	247
2.2	Genauigkeitsuntersuchung	243	3.4	Unabhängige Validierung durch TLS-Daten	247
2.3	Kamerabasiertes digitales Bildkorrelationssystem	243	4	Schlussbetrachtung und Ausblick	248
3	Lastinduzierte Verformungsmessungen	244	5	Literatur	249
3.1	Belastungsversuch Gewölbebrücke	244			
3.2	Datenerfassung und Auswertung	244			
IX	Zukunftsfähiges Mauerwerk				251
	Dietmar Walberg, Kiel				
1	Mauerwerk im Rastermaß und Rationalisierungspotenzial	251	7	Zweischaliges Mauerwerk mit Verblendfassade	260
2	Mauerwerk und Maßordnung	251	7.1	Ausführung der Außenschale (Verblendschale)	261
3	Mauerwerk und Feuchtigkeit	255	7.2	Abdichtung, Lüftungs- und Entwässerungsöffnungen	262
4	Laibungsbereiche im Mauerwerksbau	255	8	Mauerwerk – sauber verfugt	263
5	Bauen im System	258	9	Literatur	264
6	Mauerwerk – geputzt/geschlämmt – luftdicht ausgeführt	259			
X	Erhaltung und Instandsetzung von Mauerwerk – Konstruktion und Tragfähigkeit				267
	Heinrich Wigger, Oldenburg und Heiko Twelmeier, Braunschweig				
1	Zielsetzung, Geltungsbereich, Begriffsbestimmung und Vorgehensweise	267	2.2	Bewertung der Voruntersuchungsergebnisse	270
1.1	Zielsetzung	267	2.3	Ermittlung der Dauerhaftigkeit	270
1.2	Geltungsbereich	267	2.3.1	Zielsetzung	270
1.3	Begriffsbestimmung	268	2.3.2	Vorgehensweise	270
1.4	Vorgehensweise	268	2.3.3	Einflussfaktoren	270
2	Ermittlung des Ist-Zustands	268	2.4	Ermittlung der Tragfähigkeit	271
2.1	Bestandsaufnahme und Voruntersuchung	268	2.4.1	Zielsetzung	271
2.1.1	Allgemeines	268	2.4.2	Vorgehensweise	271
2.1.2	Geometrie	268	2.4.3	Möglichkeiten von Tragmodellen	271
2.1.3	Konstruktion	268	2.4.4	Einbeziehung von In-situ-Belastungsversuchen	271
2.1.4	Material	268	3	Bewertung des Ist-Zustands	271
2.1.5	Zustand	270	3.1	Dauerhaftigkeit	271
			3.2	Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit	272

4	Konzeptentwicklung und Ableitung des Handlungsbedarfs	272	6.2.2	Mauerwerksaustausch und Steinersatz ..	274
5	Rechnerischer Nachweis und Ausführungsplanung	273	6.2.3	Tragfähigkeitserhöhung der Gründung .	275
5.1	Zielstellung	273	6.2.4	Gefügeverbesserung durch Verfüllen und Injektion	275
5.2	Vorgehensweise	273	6.2.5	Vernadelung und Verankerung	276
5.3	Berechnungsverfahren	273	6.2.6	Erdberührte Bauwerksabdichtung und Feuchteschutz	276
5.4	Nachweis- und Sicherheitskonzept	273	6.2.7	Sonstige Verfahren	276
5.5	Ausführungsplanung	273	6.3	Qualitätssicherung der Maßnahme	277
5.6	Empfehlungen für die weitere Nutzung .	273	6.3.1	Dokumentation	277
6	Maßnahmen und Instandsetzungsverfahren	273	6.3.2	Eignungsprüfung	278
6.1	Allgemeines	273	6.3.3	Bauteilversuche	278
6.2	Verfahren	274	7	Bauunterhaltung und Wartung	278
6.2.1	Verfugung	274	8	Literatur	278
XI	Umbau und Erweiterung des denkmalgeschützten Gebäudeensembles auf der Maximilianstraße 6–8 in München	281			
	Bernhard Brummer, München und Toralf Burkert, Weimar				
1	Einführung	281	3.5	Spezialtiefbaumaßnahmen	292
2	Projektvorbereitung und Grundlagenermittlung	281	4	Bauausführung	292
2.1	Aus der Historie und zur Bedeutung des Gebäudes	281	4.1	Entkernung	292
2.2	Denkmalpflegerische Vorgaben und architektonisches Konzept	283	4.2	Einbau der Abfangkonstruktion und Umlastung	295
2.3	Materialuntersuchungen am Bestand ..	284	4.3	Errichtung der neuen Untergeschosse und Rücklastung	297
2.4	Gebäudemodell	285	4.4	Einbau der neuen Decken	297
2.5	Tragwerkskonzept für den Neubau	286	4.5	Ergänzende Mauerwerksbegutachtung/Mauerwerksanierung	297
3	Umsetzung in der Planung	286	4.5.1	Baubegleitende Mauerwerksbegutachtung	297
3.1	Aussteifung Endzustand und Mauerwerksnachweise	286	4.5.2	Rissbildungen im Bereich der Arkaden .	302
3.2	Leitdetails für das Mauerwerk	286	5	Fazit	308
3.3	Sicherung der Bestandsgebäude	286	6	Literatur	309
3.4	Abfangkonstruktion	286			
C	Bemessung				
I	Anwendung des Teilsicherheitskonzepts im Mauerwerksbau bei nichtlinearen Problemen	313			
	Tammam Bakeer, Hamidreza Salehi, Dresden				
1	Einführung	313		beiwerts	318
2	Sicherheitsformate	313	3.2.3	Format der Teilsicherheitsbeiwerte	320
2.1	Format der Teilsicherheitsbeiwerte	313	3.3	Empfehlungen für die nichtlineare Berechnung	322
2.2	Format des globalen Tragfähigkeitsbeiwerts	314	4	Biegeversagen in unbewehrten Schubwänden aus Mauerwerk	322
2.3	Vollständig probabilistische Methoden .	315	4.1	Grenzzustandsfunktion des Biegeversagens	322
3	Vertikal beanspruchte Mauerwerkswände	315	4.2	Verwendung der Teilsicherheitsbeiwerte beim Biegeversagen	324
3.1	Grenzzustandsfunktion	315	4.2.1	Nichtlinear	324
3.2	Modellbildung für die Tragfähigkeit	317	4.2.2	Linear-Nichtlinear	325
3.2.1	Tragfähigkeit von Mauerwerk unter vertikaler Belastung	317	4.2.3	Linear	325
3.2.2	Format des globalen Tragfähigkeits-				

4.2.4	Vergleich des Ergebnisses der drei Methoden	326	4.3	Vergleich auf Basis der Zuverlässigkeitsanalyse	328
4.2.4.1	Allgemeiner Vergleich	326	5	Schlussbemerkungen	328
4.2.4.2	Nichtlinear und linear-nichtlinear	327	6	Literatur	329
4.2.4.3	Linear und linear-nichtlinear	327			
4.2.4.4	Linear und nichtlinear	327			

D Bauphysik • Brandschutz

I Brandschutz bei Wärmedämm-Verbundsystemen 333
 Thomas Merkwitsch, Nabil A. Fouad, Hannover

1	Grundlagen	333	3.1.3	Brand in einem Gebäude (Raumbrand)	341
2	Baurechtliche Anforderungen	333	3.1.4	Brandstatistiken zu Fassadenbränden	341
2.1	Anforderungen nach MBO und den Sonderbauverordnungen	333	3.2	Verhalten im Brandfall	341
2.2	Brandschutztechnische Nachweisverfahren und Klassifizierungen	336	4	Brandschutzausführung von WDVS	344
2.3	Nachweis der Verwendbarkeit in Deutschland	336	4.1	Allgemeines	344
2.3.1	Großbrandversuch für den Raumbrand nach DIN 4102-20	337	4.2	Bauphase	344
2.3.2	Großbrandversuch für den Sockelbrand nach MVV TB	337	4.3	Nutzungsphase	345
2.3.3	Ausblick	339	4.4	Ausführungsgrundsätze bei WDVS mit EPS	345
3	Thermische Beanspruchungen von WDVS	340	4.4.1	Ausführung nach neuen Zulassungsgrundsätzen	345
3.1	Brandszenarien	340	4.4.2	Ausführung ab dem 3. OG nach bisherigen Zulassungsgrundsätzen	352
3.1.1	Brand in einem Nachbargebäude	340	4.4.3	Ausbildung im Bereich von Brandwänden	354
3.1.2	Brand von außen, angrenzend zur Fassade (Sockelbrand)	340	4.4.4	Ausbildung in Rettungswegen und Sonderbereichen	355
			5	Zusammenfassung	355
			6	Literatur	356

II Brandschutzbemessung von Mauerwerkskonstruktionen nach Eurocode 6 357
 Thorsten Mittmann, Braunschweig

1	Gesetzliche Grundlagen	357	5.1	Änderungen durch Entwurf Musterbauordnung Oktober 2015	362
2	Brandschutztechnische Anforderungen an die Bauteile	357	5.2	Änderungen bei den prüftechnischen Nachweisen	362
2.1	Feuerwiderstand von Bauteilen	357	5.2.1	Ausnutzungsfaktor α_2	364
2.1.1	Europäische Klassifizierung	357	5.2.2	Ausnutzungsfaktor α_{fi}	364
2.1.2	Nationale Klassifizierung	358	5.2.3	Ausnutzungsfaktor $\alpha_{6,fi}$	364
2.1.3	Anwendung der Klassen im bauaufsichtlichen Verfahren	359	5.2.4	Zusammenfassung der Änderungen der Prüfnormen	364
2.2	Brandverhalten der Baustoffe	359	5.3	Extrapolationsnormen	365
3	Erläuterungen der Begriffe	360	6	Brandschutztechnische Bemessung von Mauerwerk	366
3.1	Nichttragende Wände	360	6.1	Bemessung nach DIN EN 1996-1-2/NA	366
3.2	Tragende Wände	360	6.1.1	Nichttragende Wände	366
3.3	Raumabschließende Wände	360	6.1.2	Bemessungsbeispiel: Nichttragende Wand	366
3.4	Nichtraumabschließende Wände	360	6.1.3	Tragende Wände	366
4	Nachweise im bauaufsichtlichen Verfahren	361	6.1.4	Bemessungsbeispiel: Tragende Wand aus Hochlochziegeln HLz12, 1,2, Normalmauermörtel NM IIa	367
5	Maßgebende Nachweise bei Mauerwerkskonstruktionen	361			

6.1.5	Putze	368	7	Zusammenfassung	368
6.1.6	Details	368	8	Literatur	369

E Normen - Zulassungen - Regelwerk

I	Geltende Technische Regeln für den Mauerwerksbau (Deutsche, Europäische und Internationale Normen) (Stand 31.07.2017)				373
	Peter Rauh, Berlin und Carola Hauschild, Radebeul				

1	Vorbemerkung	373	3	Regelwerk	375
2	EuGH-Urteil vom 16. Oktober 2014 (Rs. C-100/13)	374			

II	Verzeichnis der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen für den Mauerwerksbau (Stand 31.7.2017)				391
	Wolfram Jäger, Dresden und Roland Hirsch, Berlin				

1	Mauerwerk mit Normal- oder Leichtmörtel	393	2.3	Wandbauart aus Planelementen in drittel- oder halbgoschosshoher Ausführung	491
1.1	Mauersteine üblichen Formates	393	2.4	Weitere Dünnbettmörtel	492
1.1.1	Mauerziegel	393	3	Mauerwerk mit Mittelbettmörtel	493
1.1.2	Verfüllziegel	406	4	Vorgefertigte Wandtafeln	494
1.1.3	Kalksandsteine	407	4.1	Geschosshohe Mauertafeln	494
1.1.4	Betonsteine	409	4.2	Drittel- oder halbgoschosshohe Mauertafeln	497
1.1.4.1	Vollsteine und Vollblöcke	409	5	Geschosshohe Wandtafeln	498
1.1.4.2	Hohlblocksteine	412	6	Schalungsstein-Bauarten	498
1.1.4.3	Hohlblocksteine mit integrierter Wärmedämmung	413	7	Trockenmauerwerk	500
1.1.5	Sonstige Mauersteine	413	8	Mauerwerk mit PU-Kleber	501
2	Mauerwerk mit Dünnbettmörtel	413	8.1	Planziegel	501
2.1	Plansteine üblichen Formates und dafür zugelassene Dünnbettmörtel	413	8.2	Planverfüllziegel	503
2.1.1	Planziegel	413	8.3	Porenbeton-Plansteine	504
2.1.2	Planziegel mit integrierter Wärmedämmung	439	8.4	Vorgefertigte Wandtafeln	505
2.1.3	Planverfüllziegel	450	9	Bewehrtes Mauerwerk	506
2.1.4	Kalksand-Plansteine	454	9.1	Bewehrung für bewehrtes Mauerwerk ..	506
2.1.5	Porenbeton-Plansteine	457	9.2	Hochlochziegel für bewehrtes Mauerwerk	506
2.1.6	Beton-Plansteine	460	9.3	Stürze	506
2.1.6.1	Planvollsteine und Planvollblöcke	460	10	Ergänzungsbauteile	508
2.1.6.2	Planhohlblocksteine	468	10.1	Mauerfuß-Dämmelemente	508
2.1.6.3	Plansteine aus Leichtbeton mit integrierter Wärmedämmung	473	10.2	Anker zur Verbindung der Mauerwerksschalen von zweischaligen Außenwänden	509
2.2	Planelemente und dafür zugelassene Dünnbettmörtel	481	10.3	Sonstige Ergänzungselemente	510
2.2.1	Planziegel-Elemente	481	11	Anhang	510
2.2.2	Kalksand-Planelemente	482	11.1	Zulassungsübersicht	510
2.2.3	Porenbeton-Planelemente	488			
2.2.4	Beton-Planelemente	489			

F Forschung

I	Übersicht über abgeschlossene und laufende Forschungsvorhaben im Mauerwerksbau	529			
	Anke Eis, Radebeul				
1	Abgeschlossene Forschungsvorhaben . . .	533	2.2.4	Sicherung des Westiwans des Takht-e Soleyman im Iran 549	
1.1	Übersicht Forschungsprojekte und Forschungsstellen	533	2.2.5	Eine Methode zur effizienten Simulation großer Mauerwerksscheiben unter exzentrischer und/oder zyklisch biaxialer Beanspruchung auf der Grundlage wirklichkeitsnaher Kleinkörperversuche 551	
1.2	Kurzberichte	533	2.2.6	Teilweise aufstehende Mauerwerksscheiben 553	
1.2.1	Analyse der Regelungen zur Querkrafttragfähigkeit bewehrter Mauerwerks-wände mit und ohne Schubbewehrung nach DIN EN 1996-1-1, Abschnitt 6.7 . .	533	2.2.7	i_city – Schallschutz von energetisch optimierten Fassaden 555	
1.2.2	Tragfähigkeit ausfachender Mauerwerks-wände unter Berücksichtigung der verformungsbasierten Membranwirkung	534	2.2.8	Einsatz von natürlichen Schwermineral-sanden zur Steigerung der Rohdichte von Kalksandsteinen für einen hohen baulichen Schallschutz sowie zur Strahlungsabschirmung (AiF: 17798-N)	558
1.2.3	Tragfähigkeit unbewehrter Mauerwerks- und Betondruckglieder bei schiefer Biegebeanspruchung	536	2.2.9	Optimierung von Kalk-Sand-Mischungen und Entwicklung eines Praxis-Prüfverfahrens zur Bewertung der Mischungsqualität (AiF: 18187-N)	558
1.2.4	Innovative Dämmtechnik zur Reduzierung der Transmissionswärmeverluste im Mauerwerksbau mit dem Ziel der Gewährleistung des 0-Energie-Standards – 0-EneMau	538	2.2.10	Steigerung der Beschussicherheit von Kalksandstein-Mauerwerk durch Optimierung der Gefügebrauchung (AiF: 18429-N) 558	
1.2.5	Erweiterung der Anwendungsgrenzen der vereinfachten Berechnungsmethoden nach DIN EN 1996-3/NA . . .	542	2.2.11	Einsatz von CSH-Phasen als Reaktionsbeschleunigern bei der Herstellung von Kalksandsteinen zur Reduzierung des Energieverbrauchs und der Umweltemissionen – Teil 2 (AiF: 18413-N) 559	
2	Laufende Forschungsvorhaben	546	2.2.12	Steigerung der Produktqualität und Reduktion der Produktionskosten bei der Kalksandsteinfertigung durch Einsatz unsteiger Gesteinskörnungen (Ausfallkörnungen) (AiF: 18896-N) 559	
2.1	Übersicht Forschungsprojekte und Forschungsstellen	546	2.2.13	Optimierung des Autoklavierungsprozesses zur Reduzierung der Produktionskosten und Qualitätssteigerung von Kalksandsteinen mittels statistischer Versuchsplanung (AiF: 18570-N) 559	
2.2	Kurzberichte	547			
2.2.1	Umsetzung einer optimierten Prüfung der Haftscherfestigkeit im Mauerwerksbau in Anlehnung an das bisherige europäische Verfahren nach DIN EN 1052-3 – OptiHaP	547			
2.2.2	Textile Bewehrung in der Lagerfuge von gemauerten Kellerwänden zur Erhöhung der Tragfähigkeit gegen Erddruck (Faserbewehrtes Kellermauerwerk – FBKM)	547			
2.2.3	ReDeMaM – Rezyklierbarer, Demontierbarer, Energiehocheffizienter und Massiver Musterbau	549			
	Stichwortverzeichnis			561	

Autoren

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

Bakeer, Tammam, Dr.-Ing. habil., Technische Universität Dresden, Fakultät Architektur, Lehrstuhl Tragwerksplanung, Zellescher Weg 17, 01069 Dresden (C I).

Bartolomei, Viktor, M. Eng., Jade Hochschule, Institut für Materialprüfung (IfM) an der Jade Hochschule, Ofener Straße 16/19, 26121 Oldenburg (B V).

Brameshuber, Wolfgang, Prof. Dr.-Ing. († 2016), RWTH Aachen University, ibac-Institut für Bauforschung, Schinkelstraße 3, 52062 Aachen (A I).

Bretschneider, Nick, Dr.-Ing., Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur HTWK Leipzig, Fakultät Bauwesen, PF 301166, 04251 Leipzig (B IV).

Brummer, Bernhard, Dipl.-Ing., Berk + Partner Bauingenieure GmbH, Rosenheimer Straße 145 b–c, 81671 München (B XI).

Burger, Mathias, M. Sc., Technische Universität Berlin, Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin (B VII, B VIII).

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

Dikhoff, Isabelle, B. Sc., Technische Universität Braunschweig, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Pockelsstraße 3, 38106 Braunschweig (B VI).

Eichhorn, Andreas, Prof. Dr.-Ing., Technische Universität Darmstadt, Institut für Geodäsie, FG Geodätische Messsysteme und Sensorik, Franziska-Braunstraße 7, 64287 Darmstadt (B VII).

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

Fouad, Nabil A., Univ.-Prof. Dr.-Ing., Leibniz Universität Hannover, Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie, Institut für Bauphysik, Appelstraße 9A, 30167 Hannover (D I).

Franck, Stephanie, Dr.-Ing., Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur HTWK Leipzig, Fakultät Bauwesen, PF 301166, 04251 Leipzig (B IV).

Glitza, Horst, Dipl.-Ing., Ingenieur- und Gutachterbüro Glitza, Am Römerberg 11, 56291 Kisselbach (A III).

Graubohm, Markus, Dipl.-Ing., RWTH Aachen University, ibac – Institut für Bauforschung, Schinkelstraße 3, 52062 Aachen (bis 12/2017) (A III).

Hahn, Gunter, Dipl.-Ing. (FH), Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur HTWK Leipzig, Fakultät Bauwesen, PF 301166, 04251 Leipzig (B III).

Hahn, Oliver, Dipl.-Ing., IBW Ingenieurbüro für Bauwerkserhaltung Weimar GmbH, Zum Hospitalgraben 2, 99425 Weimar (B I).

Hastedt, Heidi, M. Eng., Jade Hochschule, Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik (IAPG), Ofener Straße 16/19, 26121 Oldenburg (B V).

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

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

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

Krontal, Ludolf, Dipl.-Ing., Marx Krontal GmbH, Uhlemeyerstraße 9+11, 30175 Hannover (B I).

Lichtenberger, Ralf, Dipl.-Phys., LIMESS Messtechnik und Software GmbH, Gripswaldstraße 37, 47804 Krefeld (B VII, B VIII).

Luhmann, Thomas, Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c., Jade Hochschule, Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik (IAPG), Ofener Straße 16/19, 26121 Oldenburg (B V).

Marx, Steffen, Univ.-Prof. Dr.-Ing., Leibniz Universität Hannover, Institut für Massivbau (IFMA), Appelstraße 9A, 30167 Hannover (B I, B II, B III, B IV).

Meichsner, Erik, Dipl.-Ing. (FH), IBW Ingenieurbüro für Bauwerkserhaltung Weimar GmbH, Zum Hospitalgraben 2, 99425 Weimar (B II).

Merkewitsch, Thomas, Dipl.-Ing., Leibniz Universität Hannover, Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie, Institut für Bauphysik, Appelstraße 9A, 30167 Hannover (D I).

Mittmann, Thorsten, Dipl.-Ing., Materialprüfanstalt für das Bauwesen (MPA BS), Beethovenstraße 52, 38106 Braunschweig (D II).

Müller, Lukas, Dipl.-Ing., Marx Krontal GmbH, Uhlemeyerstraße 9+11, 30175 Hannover (B II).

Neitzel, Frank, Prof. Dr.-Ing., Technische Universität Berlin, Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin (B VII, B VIII).

Neumann, Ingo, Prof. Dr.-Ing., Leibniz Universität Hannover, Geodätisches Institut, Nienburger Straße 1, 30167 Hannover (**B VI**, **B VII**).

Paffenholz, Jens-André, Dr.-Ing., Leibniz Universität Hannover, Geodätisches Institut, Nienburger Straße 1, 30167 Hannover (**B VI**, **B VII**).

Piehler, Jens, M. Sc. Dipl.-Ing.(BA), Leibniz Universität Hannover, Institut für Massivbau (IFMA), Appelstraße 9A, 30167 Hannover (**B II**, **B III**).

Rauh, Peter, Dipl.-Ing., DIN Deutsches Institut für Normung, Normenausschuss Bauwesen, Burggrafensstraße 6, Am DIN-Platz, 10787 Berlin (**E I**).

Riedel, Björn, Dr.-Ing., Technische Universität Braunschweig, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Pockelsstraße 3, 38106 Braunschweig (**B VI**).

Salehi, Hamidreza, M. Sc., Technische Universität Dresden, Fakultät Architektur, Lehrstuhl Tragwerksplanung, Zellescher Weg 17, 01069 Dresden (**C I**).

Schacht, Gregor, Dr.-Ing., Marx Krontal GmbH, Uhlemeyerstraße 9+11, 30175 Hannover (**B I**, **B II**, **B III**).

Schill, Florian, Dipl.-Ing., Technische Universität Darmstadt, Institut für Geodäsie, FG Geodätische Messsysteme und Sensorik, Franziska-Braunstraße 7, 64287 Darmstadt (**B VII**).

Schulz, Jens-Uwe, Prof. Dipl.-Ing., Hochschule Ostwestfalen-Lippe, FB1/Tragwerkslehre und Entwerfen, Emilienstraße 45, 32756 Detmold (**B V**).

Schwinge, Erich, Kirchlinteln (**B I**).

Slowik, Volker, Prof. Dr.-Ing., Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur HTWK Leipzig, Fakultät Bauwesen, PF 301166, 04251 Leipzig (**B III**, **B IV**).

Stenz, Ulrich, Dipl.-Ing., Leibniz Universität Hannover, Geodätisches Institut, Nienburger Straße 1, 30167 Hannover (**B VI**, **B VII**).

Twelmeier, Heiko, Dr.-Ing., BTN Bausachverständige GmbH, Glogaustraße 4, 38124 Braunschweig (**B X**).

Walberg, Dietmar, Dipl.-Ing. Architekt, Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e. V., Walkerdamm 17, 24103 Kiel (**B IX**).

Wigger, Heinrich, Prof. Dr.-Ing., Jade Hochschule, Institut für Materialprüfung (IfM) an der Jade Hochschule, Ofener Straße 16/19, 26121 Oldenburg (**B V**, **B X**).

Wujanz, Daniel, Dr.-Ing., Technische Universität Berlin, Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin (**B VII**, **B VIII**).

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
- III Charakteristische Druckfestigkeitswerte für Leichtbeton-Mauerwerk 55
Markus Graubohm, Aachen, und Horst Glitza, Kasselbach

I Eigenschaften von Mauersteinen, Mauermörtel, Mauerwerk und Putzen

Wolfgang Brameshuber[†], Aachen

1 Allgemeines

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, als 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 jährlich aktualisierten Beitrag zusammengestellt, der somit die direkte Möglichkeit eines Vergleichs mit Materialien anderer Länder gibt.

Die in den nachfolgenden Abschnitten aufgeführten Eigenschaftswerte beziehen sich auf das tatsächliche Verhalten von Mauerstein, Mauermörtel, Mauerwerk und Putzen, 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, genauso wenig für Leichtbeton. Dies hat im Wesentlichen den Einfluss der Loch-/Steganordnung 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 $\beta_{D,st,l}/\beta_{D,st} = 0,91 - 0,04 \cdot \beta_{D,st}$ [10]. Auch hier ist ein Teil auf die Umrechnung mit Formfaktoren zurückzuführen, aber auch auf eine leichte Anisotropie durch den Herstellprozess. In den Bildern 1a–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 Spannungszustands die Zugfestigkeit der Mauersteine eine für die Druckfestigkeit von Mauerwerk

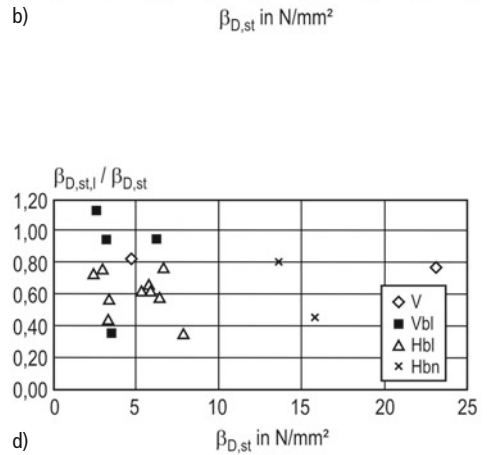
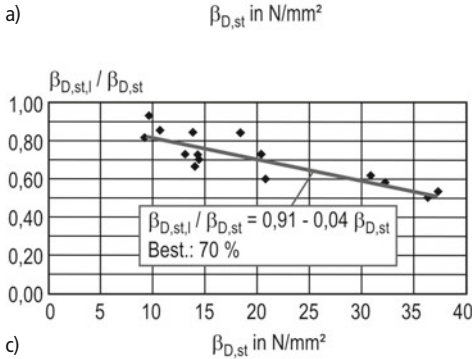
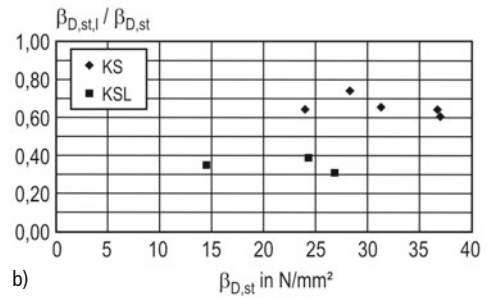
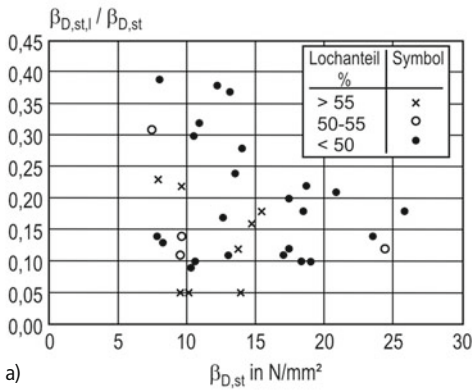


Bild 1. Steinlängs- $(\beta_{D,st,l})$ /Normdruckfestigkeit $(\beta_{D,st})$ in Abhängigkeit von der Normdruckfestigkeit [10]; a) Leichthochlochziegel, b) Kalksandvollsteine, Kalksandlochsteine, c) Porenbeton-Blocksteine, Porenbeton-Plansteine, d) Leichtbetonsteine, Betonsteine

Tabelle 1. Verhältniswerte 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

1) Trockenrohddichte $\rho_d > 1,0 \text{ kg/dm}^3$
 2) $\rho_d \leq 1,0 \text{ kg/dm}^3$

n Anzahl der Versuchsserien
 \bar{x} Mittelwert
 min x Kleinstwert
 max x Größtwert

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, Steinernen 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 $\beta_{z,b}/\beta_{D,st} = 0,003 \dots 0,026$, 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.

Tabelle 2. Verhältniswerte Steinzug-/Steindruckfestigkeit

Steinart	$\delta_i = f_{bt,cal}/f_{st}$	Mauerstein	$\beta_{z,l}/\beta_{D,st,prüf}$ [10]		
	DIN EN 1996-1-1/NA [7]		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 Grifföchern und Griffaschen	0,026	KS(GL)	0,045	0,027 ... 0,065	24
Vollsteine ohne Griff- löcher 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	$\frac{0,082}{1,25} \cdot \frac{1}{0,7 + \left(\frac{f_{st}}{25}\right)^{0,5}}$	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

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

Für Vollsteine besteht wegen der versuchstechnisch sehr aufwendigen Bestimmung der einaxialen Längszugfestigkeit noch die Möglichkeit der Messung der Spaltzugfestigkeit. Allerdings gibt es für Mauersteine noch keinen einheitlichen Wert zur Umrechnung von der Spaltzugfestigkeit auf die Zugfestigkeit. Dieser Wert hängt erfahrungsgemäß von der Festigkeit ab. Näherungsweise gilt, dass das Verhältnis Spaltzugfestigkeit $\beta_{sz,l}$ zu Zugfestigkeit $\beta_{z,l}$ zwischen 1,1 und 1,3 liegt. Für Lochsteine ist nach Auffassung des Verfassers die Ermittlung der Spaltzugfestigkeit [18] aus Gründen des Spannungszustands nicht sinnvoll anzuwenden.

2.2 Verformungseigenschaften

2.2.1 Elastizitätsmodul senkrecht zur Lagerfuge unter Druckbeanspruchung

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

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

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

mit
 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: $E_D = 700 \cdot \beta_{D,St}^{0,74}$

Es empfiehlt sich, 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)
 $E_Z = 5800 \cdot \beta_{z,l}^{0,73}$ (Best.: 95 %)

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

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

$E_Z = 1,01 \cdot E_D$ (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

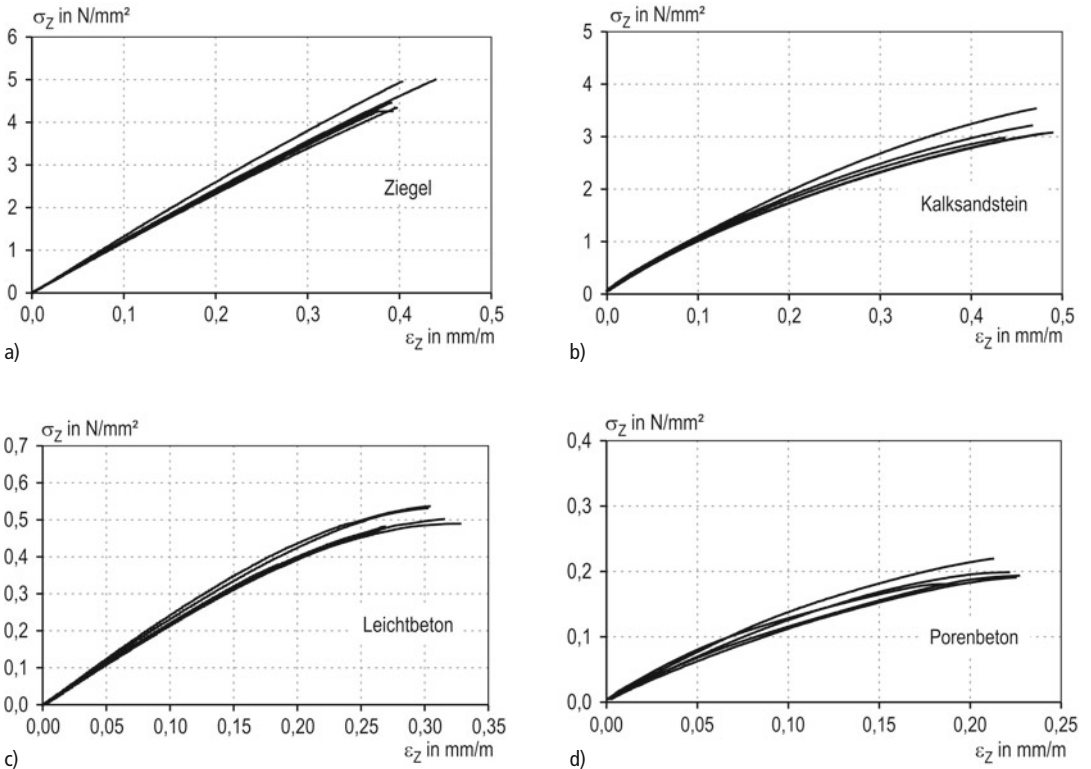


Bild 2. Spannungs-Dehnungslinien von a) Ziegel, b) Kalksandstein, c) Leichtbeton und d) Porenbeton

Tabelle 3. Mauersteine; Querdehnungsmodul $E_{q,I}$ in 10^3 N/mm^2 , Querdehnungszahl μ , Anhaltswerte [19–22], aus [10]

Mauerstein	Festigkeitsklasse	$E_{q,I}$		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

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 Wasserzementwerts – 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 :

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

3.2.2 Scherfestigkeit β_S

Die Scherfestigkeit von Mauermörtel ist definiert als maximale Spannung bei einschrittiger Scherbeanspruchung. Ein genormtes Prüfverfahren existiert nicht. Üblicherweise wird die Scherfestigkeit an nach DIN EN 1015 hergestellten Mörtelprismen $160 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ geprüft. Dabei wird das Prisma senkrecht zur Prismenlängsachse auf Scheren beansprucht. Die Scherfestigkeit von Mauermörtel ist z. B. von Interesse bei der rechnerischen Berücksichtigung von mit Mauermörtel verfüllten Mauersteinkanälen (Verfüllziegel-Mauerwerk) und beim rechnerischen Nachweis von Verankerungen mit Haken, z. B. bei zweischaligem Mauerwerk.

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

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

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

Die Auswertung einer Vielzahl von Festigkeitsprüfungen in [26] ergab

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

$$\beta_S = 2 \cdot \beta_Z$$

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

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

c) Leichtmauermörtel mit Gesteinskörnungen aus Perliten

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

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.

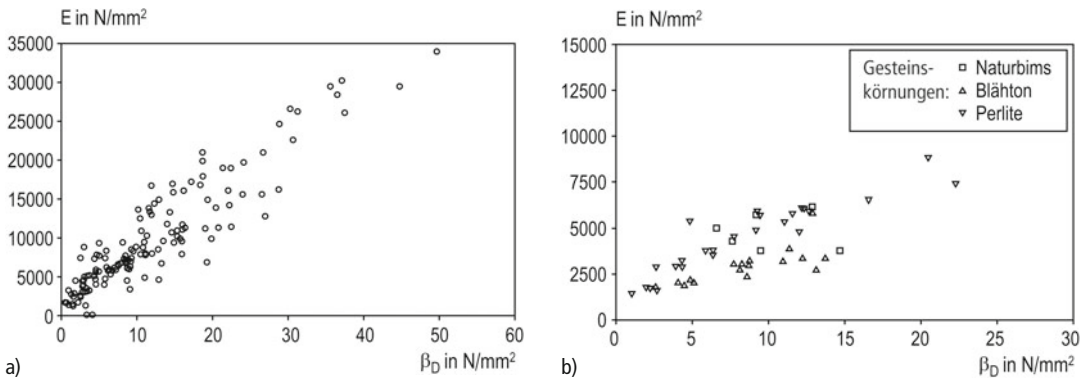


Bild 3. Mauermörtel; Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Normdruckfestigkeit β_D [10]; a) Normalmörtel, b) Leichtmörtel

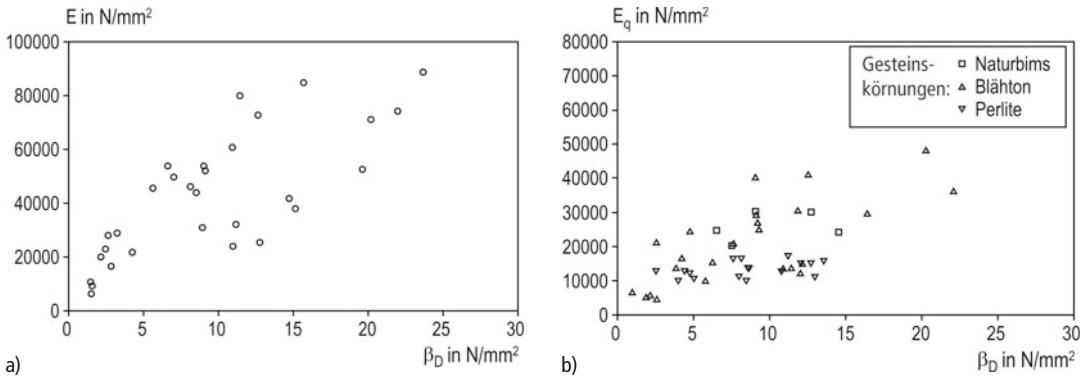


Bild 4. Mauermörtel; Querdehnungsmodul E_q in Abhängigkeit von der Normdruckfestigkeit β_D [10]; a) Normalmörtel, b) Leichtmörtel

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.

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: Blähton, Naturbims, Blähschiefer)	36	0,8 ... 1,2	4,0 ... 21	16 ... 48

n Anzahl Versuchswerte
 ρ_d Trockenrohdichte
 β_D Normdruckfestigkeit

Tabelle 5. Mauermörtel; Endschwindwerte ϵ_{∞} , 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

Schwindwerte ϵ_{∞} (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 Prüfmethoden und Kennwerten wurde in [17] veröffentlicht. In [37] wird auf die Beanspruchungsarten spezifisch eingegangen.

4.2 Haftscherfestigkeit

Das Institut für Bauforschung der RWTH Aachen hat im Rahmen eines Forschungsprojekts [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–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 [17] 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.

5 Eigenschaftswerte von Mauerwerk

5.1 Allgemeines

Die Eigenschaftswerte von Mauerwerk können aufgrund seiner ausgeprägten Anisotropie und Heterogenität in Abhängigkeit der zahlreichen in der Praxis vorkommenden Stein-Mörtel-Kombinationen sehr unterschiedlich sein und weichen zudem teilweise deutlich von denen anderer Baustoffe ab. Ähnlich wie Beton ist auch Mauerwerk ein Baustoff, der sich in erster Linie für druckbeanspruchte Bauteile eignet. Die Beanspruchbarkeit auf Zug, Biegezug und Schub ist wesentlich geringer als die auf Druck. Mauerwerk wird daher in erster Linie zum Abtrag von vertikalen Lasten herangezogen. Die nachfolgenden Abschnitte enthalten eine Übersicht über die für die unterschiedlichen Beanspruchungen maßgebenden Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Mauerwerk.

5.2 Druckfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen

5.2.1 Experimentelle Bestimmung

Die Druckfestigkeit von Mauerwerk senkrecht zu den Lagerfugen kann sowohl experimentell als auch rechnerisch ermittelt werden.

Bei der experimentellen Bestimmung der Mauerwerkdruckfestigkeit werden kleine (sogenannte RILEM-) Mauerwerkwände durch vertikale Lasten senkrecht zu den Lagerfugen gleichmäßig bis zum Bruch belas-

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

1) Feuchtegehalte liegen nicht bei allen Versuchsserien vor.

2) Anzahl der Einzelwerte nicht bekannt.

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

tet. Alternativ kann die vertikale Beanspruchbarkeit auch aus der Druckprüfung von geschosshohen Wandprüfkörpern hergeleitet werden. Die Mauerwerkdruckfestigkeit errechnet sich dabei in beiden Fällen aus der im Versuch ermittelten Höchstlast und der belasteten Mauerwerkquerschnittsfläche. Bei der Prüfung können durch kontinuierliche Verformungsmessungen (z. B. mit induktiven Wegaufnehmern) auch die Spannungs-Dehnungslinien und der Druck-E-Modul (siehe Abschnitt 5.6.2.1) mit bestimmt werden. Die Prüfung ist in der europäischen Norm DIN EN 1052-1 [41] beschrieben.

5.2.2 Rechnerische Bestimmung

Es ist inzwischen hinlänglich bekannt, dass die Druckfestigkeit von Mauerwerk nicht nur von den Festigkeitseigenschaften seiner Ausgangsstoffe abhängt, sondern von einer Vielzahl weiterer Parameter, u. a. den horizontalen Formänderungsunterschieden von Mauerstein und Mauermörtel sowie der hygrischen Wechselwirkung zwischen dem Wasserabsaugverhalten des Steins und dem Wasserrückhaltevermögen des Mörtels, beeinflusst wird. Ein theoretisch begründetes und abgesichertes Ingenieurmodell zur rechnerischen