

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](http://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 eingleisigen 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 Merkewitsch, 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  $\beta_Z$  ..... 7

        3.2.2 Scherfestigkeit  $\beta_S$  ..... 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  $\epsilon_s$ ) ..... 8

        3.3.4 Kriechen (Kriechzahl  $\phi$ ) ..... 9

4 Verbundeigenschaften zwischen Stein und Mörtel ..... 9

    4.1 Allgemeines ..... 9

    4.2 Haftscherfestigkeit ..... 9

    4.3 Haftzugfestigkeit ..... 9

5 Eigenschaftswerte von Mauerwerk ..... 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  $\mu_D$  und Dehnung bei Höchstspannung  $\epsilon_{u,D}$  ..... 18

            5.6.2.3 Völligkeitsgrad  $\alpha_0$  ..... 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  $\epsilon_f$ , (Schwinden  $\epsilon_s$ , irreversibles Quellen  $\epsilon_q$ ), Kriechen (Kriechzahl  $\phi$ ), Wärmedehnungskoeffizient  $\alpha_T$  ..... 21

6 Feuchtigkeits technische 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  $\beta_D$  ..... 25

        8.2.2 Zugfestigkeit  $\beta_Z$  ..... 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  $\psi$  ..... 25

        8.3.4 Schwinden  $\epsilon_s$ , Quellen  $\epsilon_q$  ..... 25

    8.4 Eigenschaftszusammenhänge ..... 26

9 Literatur ..... 26

<b>II</b>	<b>Neuentwicklungen beim Mauerwerksbau mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (abZ)</b> . . . . .	31			
	Wolfram Jäger, Dresden und Roland Hirsch, Berlin				
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
<b>III</b>	<b>Charakteristische Druckfestigkeitswerte für Leichtbeton-Mauerwerk</b> . . . . .	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>B</b>	<b>Konstruktion • Bauausführung • Bauwerkserhaltung</b>				
<b>I</b>	<b>Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Bauwerksgeschichte, Zustandsentwicklung und Monitoring</b> . . . . .	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			
<b>II</b>	<b>Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Planung und Vorbereitung der experimentellen Untersuchungen</b> . . . . .				<b>93</b>
	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			
<b>III</b>	<b>Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Durchführung und Auswertung</b> . . . . .				<b>113</b>
	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			
<b>IV</b>	<b>Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Nachrechnung der Belastungsversuche mittels nichtlinearer Finite-Elemente-Simulationen</b> . . . . .				<b>139</b>
	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			
<b>V</b>	<b>Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Lasteinleitung im Bogenpfeiler</b> .....	<b>169</b>			
	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			
<b>VI</b>	<b>Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Lasertracking und GBSAR zur Verformungsmessung</b> .....	<b>205</b>			
	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
<b>VII</b>	<b>Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Terrestrisches Laserscanning zur Verformungsmessung</b> .....	<b>221</b>			
	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
<b>VIII</b>	<b>Belastungsversuche an einer Mauerwerksbrücke: Optische korrelationsbasierte Messtechnik zur lastinduzierten Verformungsmessung</b>				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			
<b>IX</b>	<b>Zukunftsfähiges Mauerwerk</b>				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			
<b>X</b>	<b>Erhaltung und Instandsetzung von Mauerwerk – Konstruktion und Tragfähigkeit</b>				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		biwerts .....	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 $\alpha_2$ . . . . .	364
2.1.1	Europäische Klassifizierung . . . . .	357	5.2.2	Ausnutzungsfaktor $\alpha_{fi}$ . . . . .	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**

<b>I</b>	<b>Geltende Technische Regeln für den Mauerwerksbau (Deutsche, Europäische und Internationale Normen) (Stand 31.07.2017)</b> .....				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			

<b>II</b>	<b>Verzeichnis der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen für den Mauerwerksbau (Stand 31.7.2017)</b> .....				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**

<b>I</b>	<b>Übersicht über abgeschlossene und laufende Forschungsvorhaben im Mauerwerksbau</b> . . . . .	<b>529</b>			
	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 Berechnungs-methoden 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 Autoklavierungs-prozesses zur Reduzierung der Produktionskosten und Qualitäts-steigerung 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			
	<b>Stichwortverzeichnis</b> . . . . .			<b>561</b>	



## 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 Kesselbach (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 Bau-technik 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<sup>†</sup>, 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<sup>†</sup>, 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

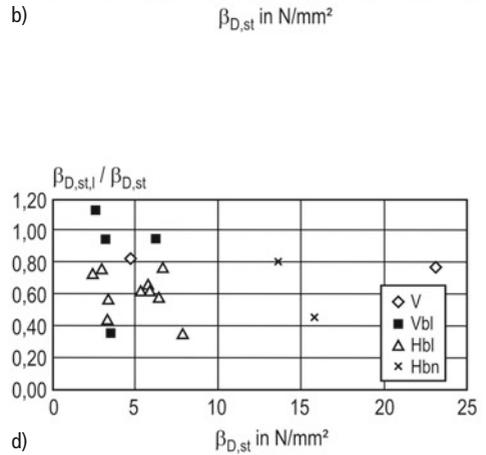
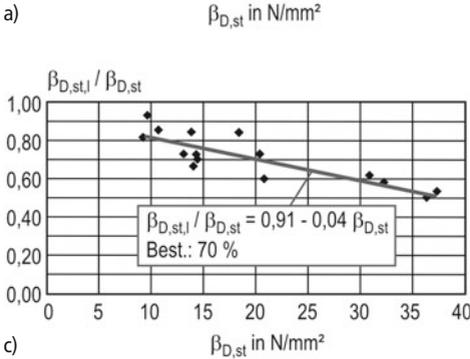
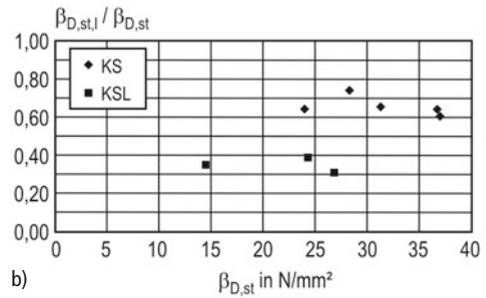
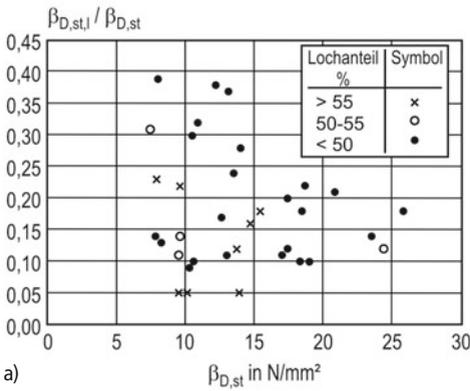
### 2.1 Festigkeitseigenschaften

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

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 $\geq 4$	0,07	0,06 ... 0,10	3
		Hbn	0,08	0,06 ... 0,09	2
Hochlochsteine	0,026	HLz	0,03	0,13 ... 0,41	20
		LHLz	0,01	0,002 ... 0,019	54
		KS L	0,035	0,026 ... 0,055	19
Steine mit Grifflöchern und Griffaschen	0,026	KS(GL)	0,045	0,027 ... 0,065	24
Vollsteine ohne 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 $\geq 4$	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  
 $\varepsilon_1$  Längsdehnung bei 1/3 max  $\sigma_D$

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

Kalksandstein:  $E_D = 230 \cdot \beta_{D,st}$   
 Porenbeton:  $E_D = 700 \cdot \beta_{D,St}^{0,74}$

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):

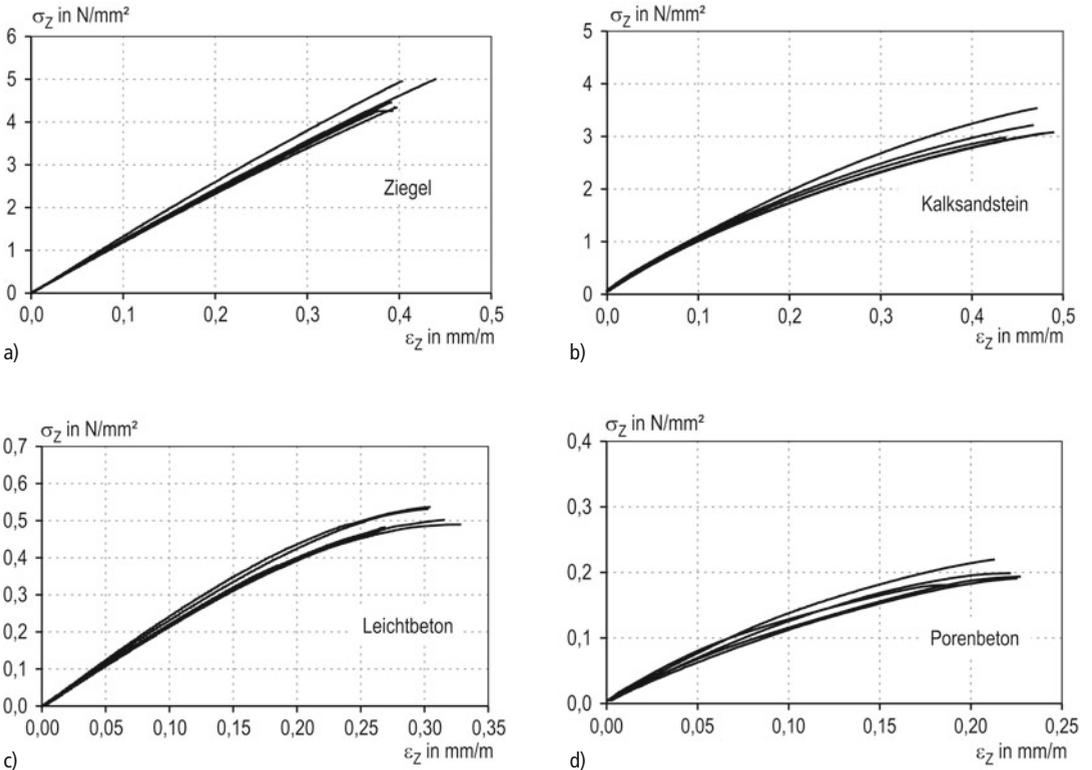
Kalksandsteine (Prismen; 13 Mittelwerte)  
 $E_Z = 5800 \cdot \beta_{z,l}^{0,73}$  (Best.: 95 %)  
 Leichtbetonsteine (V, Vbl, Hbl; Prismen; Prüfung in Steinlängsrichtung; 35 Einzelwerte, große Streuung)  
 $E_Z = 6000 \cdot \beta_{z,l}$  (Best.: 77 %)  
 Porenbetonsteine  
 $E_Z = 3180 \cdot \beta_{z,l}$  (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  $10^3 \text{ N/mm}^2$ , Querdehnungszahl  $\mu$ , Anhaltswerte [19–22], aus [10]

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

n Anzahl der Versuchswerte

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 $\beta_Z$

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

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

#### 3.2.2 Scherfestigkeit $\beta_S$

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

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

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

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

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  $\beta_D$  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

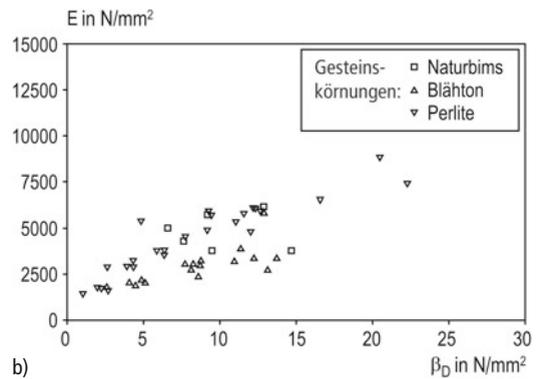
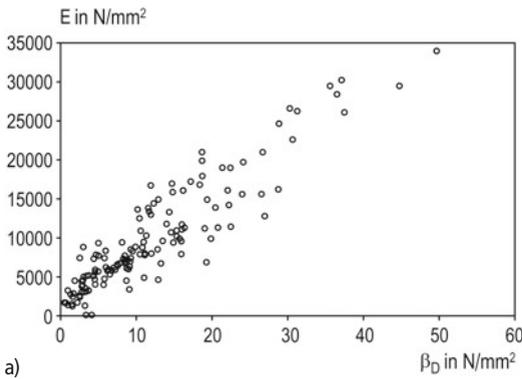
$$E = 1200 \cdot \beta_D^{0,6}$$

c) Leichtmauermörtel mit Gesteinskörnungen aus Perliten

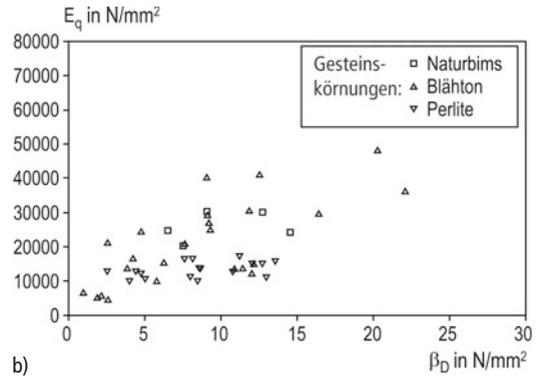
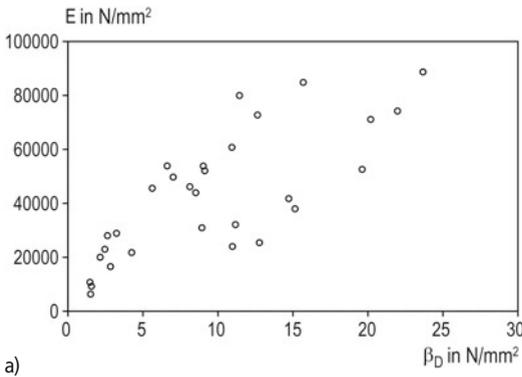
$$E = 1200 \cdot \beta_D^{0,4}$$

#### 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  $\beta_D$  [10]; a) Normalmörtel, b) Leichtmörtel



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

Ein Zusammenhang zwischen  $E_q$  und der Normdruckfestigkeit  $\beta_D$  kann jeweils nur für Mörtel mit gleicher Gesteinskörnung (gefügedichter Sand, Blähton, Naturbims, Perlite usw.) erwartet werden (Bild 4).

In Tabelle 4 sind  $E_q$ -Werte angegeben. Für 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 $\epsilon_s$ )

Das Schwinden des Mauermörtels kann die Rissicherheit von Mauerwerk beeinflussen. Schnelles und starkes Schwinden führt gelegentlich im oberflächennahen Bereich zum Ablösen des Fugenmörtels vom Mauerstein. Das Schwinden kann nach DIN 52450 [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	$\rho_d$	$\beta_D$	$E_q$
		kg/dm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup>
Normalmörtel	49	1,1 ... 1,9	1,5 ... 24	1,2 ... 116
Dünnbettmörtel	5	1,4 ... 1,6	14 ... 21	36 ... 49
Leichtmörtel LM 21 (Zuschlag: Polystyrol, Perlite, Naturbims)	23	0,6 ... 0,8	8,4 ... 11,6	6,7 ... 15
Leichtmörtel LM 36 (Zuschlag: Blähton, Naturbims, Blähschiefer)	36	0,8 ... 1,2	4,0 ... 21	16 ... 48

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

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

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

Das Kriechen kann wie das Schwinden die Rissicherheit von Mauerwerk beeinflussen. Es wird in analoger Weise wie bei Beton ermittelt. Für im Alter von 7 d mit einer Kriechspannung von etwa 1/3 der Prismendruckfestigkeit belastete Mörtelprüfkörper ergaben sich Endkriechzahlen  $\phi_{\infty}$  im Bereich von rd. 5 bis 15, im Mittel von etwa 10 [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  $\beta_{HS}$ 

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 <sup>1)</sup>	0,10	0,40	0,23
		EN	2 (9)	3,0 ... 12,1	0,10	0,24	0,17
	NM IIa	DIN	23 (> 129)	4,0 ... 11,3 <sup>1)</sup>	0,02	0,60	0,19
		EN	10 (49)	5,5 ... 11,3 <sup>1)</sup>	0,03	0,27	0,10
	NM IIIa	DIN	6 (30)	2,3 ... 11,5	0,27	0,67	0,42
		EN	2 (10)	2,3 ... 11,5	0,21	0,60	0,41
	LM 21	DIN	3 (> 14)	5,1 <sup>1)</sup>	0,37	0,58	0,47
		EN	–	–	–	–	–
	LM 36	DIN	3 (30)	5,0 <sup>1)</sup>	0,12	0,82	0,43
		EN	–	–	–	–	–
DM	DIN	21 (170)	3,4 ... 5,0 <sup>1)</sup>	0,37	1,68	0,94	
	EN	–	–	–	–	–	
KS (ohne Referenz)	NM II	DIN	1 (– <sup>2)</sup> )	1,8	–	–	0,06
		EN	4 (40)	14,4	0,16	0,64	0,37
	NM IIa	DIN	21 (> 76)	1,8 ... 3,2 <sup>1)</sup>	0,01	0,51	0,20
		EN	21 (> 67)	1,8 ... 10,5 <sup>1)</sup>	0,02	0,31	0,13
	NM III	DIN	2 (– <sup>2)</sup> )	1,8 ... 3,2	0,04	0,07	0,06
		EN	13 (> 27)	1,5 ... 13,2 <sup>1)</sup>	0,03	0,35	0,16
	LM 21	DIN	2 (10)	3,2 ... 12,1	0,36	1,64	1,00
		EN	2 (10)	3,2 ... 12,1	0,27	1,10	0,69
	DM	DIN	8 (45)	3,9 ... 6,7 <sup>1)</sup>	0,46	1,07	0,78
		EN	12 (56)	2,7 ... 6,8 <sup>1)</sup>	0,10	0,90	0,43

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 rechneri-