

2023

 **MAUERWERK** KALENDER



Instandsetzung
Erdbeben
Lehmbau

2023

MAUERWERK KALENDER

Instandsetzung

Erdbeben

Lehmbau

Herausgegeben von

Detleff Schermer, Regensburg

Eric Brehm, Karlsruhe

48. Jahrgang

Hinweis des Verlages

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

Titelbild: Herstellung formgeschlagener Lehmsteine in Uruk/Irak aus Schwemmlehm des Euphrats,
Strohhäcksels und Sand
Foto: ZRS Ingenieure GmbH, Christof Ziegert

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.

© 2023 Ernst & Sohn GmbH, Rotherstraße 21, 10245 Berlin, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikrofilm oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden.

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

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

Umschlaggestaltung: Sonja Frank, Berlin
Herstellung: pp030 – Produktionsbüro Heike Praetor, Berlin
Satz: le-tex publishing services GmbH, Leipzig
Druck und Bindung:

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

Print ISBN 978-3-433-03373-9
ePDF ISBN 978-3-433-61116-6
ePub ISBN 978-3-433-61115-9
oBook ISBN 978-3-433-61114-2

Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,
wir freuen uns sehr, Ihnen die neueste Ausgabe des Mauerwerk-Kalenders vorlegen zu dürfen, welcher sich mit den Schwerpunkten „Instandsetzung – Erdbeben – Lehmbau“ auseinandersetzt.

Die Bauwirtschaft steht vor epochalen Umbrüchen. Das Erfordernis nach einer nachhaltigen – aktuell vor allem mit „klimaeffizient“ übersetzt – Bauweise wird in sehr naher Zukunft zum wahrscheinlich größten Wandel der Nachkriegszeit führen, welcher alle Bau-beteiligten gleichermaßen erfassen wird. In Kombination mit der Vielzahl zeitgleicher Herausforderungen, vor allem der Energiekrise und dem Fachkräftemangel, werden die vor uns stehenden Aufgaben einschneidend werden. Eine solche Situation schien bis vor Kurzem noch kaum vorstellbar.

Die Reaktion auf die anstehenden Aufgaben wird das bestimmende Thema auch dieser Publikation in den nächsten Jahren werden. Daraus ergeben sich die Schwerpunkte „Instandsetzung“ und „Lehmbau“ dieses Bandes. Hier freuen wir uns durch die Beiträge von Brinkmann et al. sowie Ziegert und Röhlen die Grundlagen für eine erfolgreiche Verbreitung der Bauweise in der Praxis zur Verfügung stellen zu dürfen.

Aber auch aktuelle normative Entwicklungen, die nicht im direkten Zusammenhang mit dem oben beschriebenen Bauwandel stehen, werden weiterhin aufgegriffen und behandelt. Daraus ergibt sich der dritte Schwerpunkt „Erdbeben“, der durch den Beitrag von Butenweg et al. einen hervorragenden Überblick über

den rechnerischen Nachweis nach DIN EN 1998-1 liefert.

Eine Möglichkeit, auf die anstehenden Herausforderungen durch den Fachkräftemangel zu reagieren, stellt der verstärkte Einsatz von künstlicher Intelligenz dar. Die Möglichkeiten und deren Anwendung im Wohnungsbau beschreibt der Beitrag von Kraus und Obergrießer.

Des Weiteren dokumentiert auch dieser Mauerwerk-Kalender als Jahrbuch wieder den aktuellen Stand der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen und Bauartgenehmigungen sowie laufende Forschungsprojekte.

Wir sind überzeugt, ein spannendes und interessantes Jahrbuch gestaltet zu haben, welches sowohl den Praktikern als auch den mehr forschungsaffinen Leserinnen und Lesern eine spannende Lektüre bietet.

Unser herzlicher Dank gilt allen Mitwirkenden an diesem Band, insbesondere wieder Dr.-Ing. Dirk Jesse von Ernst & Sohn, für die große Unterstützung. Wir wünschen Ihnen, liebe Leserinnen und Leser, eine ansprechende Lektüre und hoffen, dass die Ausgabe Ihnen neue Impulse für Ihre Herangehensweise an die Lösung der kommenden Fragestellungen liefert. Packen wir's an.

Herzliche Grüße

Bensheim und München, Prof. Dr.-Ing. Eric Brehm
im Oktober 2022, Prof. Dr.-Ing. Detleff Schermer

Inhaltsübersicht

A Normen und Baustoffe

- A 1 Eigenschaften und Eigenschaftswerte von Mauersteinen, Mauer Mörtel und Mauerwerk [1](#)
Michael Raupach, Dorothea Saenger, Bernd Winkels
- A 2 Neuentwicklungen im Mauerwerksbau mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (abZ) bzw. mit allgemeiner Bauartgenehmigung (aBG) [17](#)
Jennifer Gebhardt, Simon Gille
- A 3 Geltende Technische Regeln für den Mauerwerksbau (Deutsche, Europäische und Internationale Normen) (Stand 25.03.2022) [59](#)
Benjamin Purkert

B Gestaltung und Konstruktion (Neubau)

- B 1 Grundlagen zur Bemessung druckbeanspruchten Lehm mauerwerks [79](#)
Maximilian Brinkmann, Philipp Wiehle, Marc Thiele, Carl-Alexander Graubner
- B 2 Normen im Lehm bau [111](#)
Christof Ziegert, Ulrich Röhlen
- B 3 Konservierung von mesopotamischen Lehm steinbauten in Uruk (Südirak), der ersten Metropole der Menschheit [127](#)
Jasmine Alia Blaschek, Christof Ziegert

C Konstruktive Details (Bauphysik)

- C 1 Erdbebennachweis von Mauerwerksbauten nach DIN EN 1998-1 [153](#)
Christoph Butenweg, Thomas Kubalski, Christoph Gellert, Khaled El-Deib
- C 2 Technische Erweiterung und kulturelle Bedeutung von Eisenbahngewölbebrücken [191](#)
Conrad Pelka, Johanna Monka, Gregor Schacht, Steffen Marx
- C 3 Brandschutzbemessung von Mauerwerkskonstruktionen nach Eurocode 6 [243](#)
Thorsten Mittmann

D Mauerwerk im Bestand

- D 1 Natur und Denkmal: Mauerwerksinstandsetzung im Spannungsfeld zwischen zwei Erhaltungszielen [257](#)
Christian Kayser

E Innovationen im Mauerwerksbau

- E 1 Digitale Transformation im Bauwesen – Grundlagen zur künstlichen Intelligenz und deren Anwendung im Wohnungsbau [275](#)
Michael A. Kraus, Mathias Obergrießer

F Forschung

- F 1 Übersicht über laufende Forschungsvorhaben im Mauerwerksbau [309](#)
Jonathan Schmalz, Simon Gille, Jennifer Gebhardt

Inhaltsverzeichnis

Vorwort III

Autor:innenverzeichnis XIII

A Normen und Baustoffe

A1 Eigenschaften und Eigenschaftswerte von Mauersteinen, Mauermörtel und Mauerwerk 1 Michael Raupach, Dorothea Saenger, Bernd Winkels

1	Einleitung	3	5.1	Allgemeines	8
2	Mauersteine	3	5.2	Haftscherfestigkeit	8
2.1	Festigkeitseigenschaften	3	5.3	Haftzug- und Biegehaftzugfestigkeit	9
2.1.1	Druckfestigkeit in Steinhöhe	3	6	Mauerwerk	10
2.1.2	Druckfestigkeit in Steinlänge und -breite	3	6.1	Allgemeines	10
2.1.3	Zug- und Spaltzugfestigkeit	3	6.2	Festigkeitseigenschaften	10
2.2	Verformungseigenschaften	4	6.2.1	Druckfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen	10
2.2.1	Elastizitätsmoduln	4	6.2.2	Druckfestigkeit parallel zu den Lagerfugen	11
2.2.2	Querdehnungsmodul, Querdehnzahl	4	6.2.3	Zugfestigkeit	11
2.3	Kapillare Wasseraufnahme	5	6.2.4	Biegezugfestigkeit	13
3	Mauermörtel	6	6.2.5	Schubfestigkeit	13
3.1	Festigkeitseigenschaften	6	6.3	Verformungseigenschaften	14
3.1.1	Druckfestigkeit	6	6.3.1	Elastizitätsmoduln	14
3.1.2	Zugfestigkeit	6	6.3.2	Feuchtedehnung, Kriechen, Wärmedehnung	14
3.2	Längs- und Querdehnungsmoduln	6		Literatur	16
4	Mauermörtel im Mauerwerk	6			
5	Verbund zwischen Mauerstein und Mauermörtel	8			

A2 Neuentwicklungen im Mauerwerksbau mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (abZ) bzw. mit allgemeiner Bauartgenehmigung (aBG) 17 Jennifer Gebhardt, Simon Gille

0	Allgemeines	19	5	Schalungsstein-Bauarten	50
0.1	Gesonderte Regelungen zu Schlitzen	20	6	Trockenmauerwerk	50
0.1.1	Vertikalschlitze	20	7	Mauerwerk mit PU-Kleber	50
0.1.2	Horizontalschlitze	20	8	Bewehrtes Mauerwerk	56
0.2	Weitere allgemeine Bestimmungen und Anforderungen	20	9	Ergänzungsbauteile	56
1	Mauerwerk mit Normal- oder Leichtmauermörtel	20	10	Fertigbauteile	56
2	Mauerwerk mit Dünnbettmörtel	20	11	Betonelemente	57
3	Mauerwerk mit Mittelbettmörtel	46		Literatur	57
4	Vorgefertigte Wandtafeln	47			

A3 Geltende Technische Regeln für den Mauerwerksbau (Deutsche, Europäische und Internationale Normen) (Stand 25.03.2022) 59 Benjamin Purkert

1	Vorbemerkung	61		Literatur	77
2	Regelwerk	62			

B Gestaltung und Konstruktion (Neubau)**B 1 Grundlagen zur Bemessung druckbeanspruchten Lehm-mauerwerks 79**

Maximilian Brinkmann, Philipp Wiehle, Marc Thiele, Carl-Alexander Graubner

- | | | | | | |
|---------|---|----|-------|---|-----|
| 1 | Einleitung | 81 | 3.2 | Materialmodellierung | 96 |
| 2 | Experimentelle Untersuchungen an Lehm-mauerwerk | 82 | 3.3 | Numerische Berechnung der Traglast | 97 |
| 2.1 | Einfluss des Feuchtegehalts | 82 | 3.3.1 | Modellierungsstrategie | 97 |
| 2.2 | Steine und Mörtel | 82 | 3.3.2 | Geometrie | 98 |
| 2.2.1 | Allgemeines | 82 | 3.3.3 | Lagerungsbedingungen und Belastung | 98 |
| 2.2.2 | Probekörpervorbereitung und Versuchsdurchführung | 83 | 3.3.4 | Diskretisierung | 99 |
| 2.2.3 | Ergebnisse und Auswertung | 84 | 3.4 | Analytische Berechnung der Traglast | 99 |
| 2.3 | Lehm-mauerwerk | 86 | 3.5 | Validierung der Traglastmodelle | 100 |
| 2.3.1 | Allgemeines | 86 | 3.6 | Fazit | 101 |
| 2.3.2 | RILEM-Probekörper | 86 | 4 | Bemessung druckbeanspruchten Lehm-mauerwerks auf Basis von DIN EN 1996/NA | 102 |
| 2.3.2.1 | Probekörpervorbereitung und Versuchsdurchführung | 86 | 4.1 | Allgemeines | 102 |
| 2.3.2.2 | Ergebnisse und Auswertung der zentrischen Druckversuche | 88 | 4.2 | Semiprobabilistisches Sicherheitskonzept | 103 |
| 2.3.2.3 | Ergebnisse und Auswertung der exzentrischen Druckversuche | 90 | 4.3 | Ermittlung der charakteristischen Lehm-mauerwerksdruckfestigkeit | 104 |
| 2.3.2.4 | Ergebnisse und Auswertung der Kriechversuche | 90 | 4.4 | Berücksichtigung der bemessungsrelevanten Materialfeuchte | 105 |
| 2.3.3 | Geschosshohe Wände | 92 | 4.5 | Vereinfachte Traglastfaktoren auf Basis von DIN EN 1996-3/NA | 106 |
| 2.3.3.1 | Probekörpervorbereitung und Versuchsdurchführung | 92 | 4.6 | Fazit | 108 |
| 2.3.3.2 | Ergebnisse und Auswertung | 93 | 5 | Zusammenfassung und Ausblick | 108 |
| 2.4 | Zusammenfassung | 94 | 6 | Danksagung | 109 |
| 3 | Tragfähigkeit von Lehm-mauerwerk | 95 | | Literatur | 109 |
| 3.1 | Allgemeines | 95 | | | |

B 2 Normen im Lehm-bau 111

Christof Ziegert, Ulrich Röhlen

- | | | | | | |
|-----|--|-----|-----|---|-----|
| 1 | Einleitung | 113 | 3.4 | DIN 18946:2018-12 Lehm-mauer-mörtel – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung | 120 |
| 2 | Struktur und bauaufsichtliche Einordnung der Regelwerke im Lehm-bau | 116 | 3.5 | DIN 18947:2018-12 Lehm-putzmörtel – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung | 120 |
| 3 | Ausgewählte Inhalte der Normen zum Lehm-bau | 117 | 3.6 | DIN 18948:2018-12 Lehm-platten – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung | 122 |
| 3.1 | DIN 18942-1:2018-12 Lehm-baustoffe und Lehm-bauprodukte – Teil 1: Begriffe | 117 | 3.7 | Entwurf DIN 18940 Tragendes Lehm-stein-mauerwerk – Konstruktion, Bemessung und Ausführung | 123 |
| 3.2 | DIN 18942-100:2018-12 Lehm-baustoffe und Lehm-bauprodukte – Teil 100: Konformitätsnachweis | 118 | | Literatur | 125 |
| 3.3 | DIN 18945:2018-12 Lehm-Steine – Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung | 118 | | | |

B 3 Konservierung von mesopotamischen Lehmsteinbauten in Uruk (Südirak), der ersten Metropole der Menschheit 127 Jasmine Alia Blaschek, Christof Ziegert

- | | | | |
|-----|--|-------|---|
| 1 | Einleitung 129 | 5.2 | Eanna-Zikkurat, Westecke 133 |
| 2 | Kulturhistorischer Hintergrund der Architekturreste in Uruk 129 | 5.2.1 | Untersuchungen, Konservierungsmaterialien 135 |
| 3 | Archäologischer Hintergrund 132 | 5.2.2 | Umsetzung der Notsicherung 138 |
| 4 | Entwicklung und Umsetzung einer Erhaltungs- und Ausbildungsstrategie 132 | 5.3 | Anu-Zikkurat, Weißer Tempel 139 |
| 5 | Bereits durchgeführte Erhaltungsmaßnahmen 133 | 5.3.1 | Untersuchungen, Konservierungsmaterialien 142 |
| 5.1 | Infrastrukturelle Maßnahmen: Wege für Besuchende und die Lorenbahn 133 | 5.3.2 | Notkonservierungskonzept 144 |
| | | 5.3.3 | Umsetzung der Notsicherung 147 |
| | | 6 | Ausblick 150 |
| | | 7 | Danksagung 150 |
| | | | Literatur 151 |

C Konstruktive Details (Bauphysik)

C 1 Erdbebennachweis von Mauerwerksbauten nach DIN EN 1998-1 153 Christoph Butenweg, Thomas Kubalski, Christoph Gellert, Khaled El-Deib

- | | | | |
|---------|---|---------|---|
| 1 | Einleitung 155 | 5.2.1 | Grundlagen und Berechnungsablauf 172 |
| 2 | Erdbebeneinwirkung: DIN EN 1998-1/NA 155 | 5.2.2 | Ermittlung der Kapazitätskurven für Mauerwerksgebäude 173 |
| 3 | Seismisches Verhalten von Mauerwerksbauten 158 | 5.3 | Berücksichtigung von Torsionseffekten 175 |
| 3.1 | Versagensformen von tragenden Mauerwerkswänden 158 | 5.4 | Ansatz von Verhaltensbeiwerten für Mauerwerk 175 |
| 3.2 | Erdbebenschäden und neue Nachweisansätze 159 | 5.4.1 | Pauschaler Ansatz 175 |
| 3.3 | Wand-Decken-Interaktion und Normalkraftumlagerungen 160 | 5.4.2 | Ansatz erhöhter Verhaltensbeiwerte mit Pushover-Analysen 175 |
| 3.4 | Berücksichtigung der Wand-Decken-Interaktion 163 | 5.4.2.1 | Verhaltensbeiwert für Verformungsfähigkeit und Energiedissipation 176 |
| 3.5 | Ansatz zur Ermittlung der Momentenverteilungsfaktoren 163 | 5.4.2.2 | Verhaltensbeiwerte für Lastumverteilung und Überfestigkeiten 176 |
| 3.6 | Bemessung der Stahlbetondecken 167 | 6 | Berechnungsbeispiele 176 |
| 3.7 | Verhalten von nichttragenden Trennwänden 167 | 6.1 | Reihenhaus: Nachweis mit konstruktiven Regeln 176 |
| 3.8 | Verhalten von Vormauerschalen 169 | 6.2 | Mehrfamilienhaus: Linearer kraftbasierter Ansatz 180 |
| 4 | Auslegung mit konstruktiven Regeln 170 | 6.2.1 | Bauwerksbeschreibung und Erdbebeneinwirkung 180 |
| 5 | Rechenverfahren 171 | 6.2.2 | Statisches Ersatzsystem 181 |
| 5.1 | Lineare kraftbasierte Berechnungen 171 | 6.2.3 | Statische Ersatzlasten 181 |
| 5.1.1 | Vereinfachtes Antwortspektrenverfahren 171 | 6.2.4 | Verteilung der statischen Ersatzlasten auf die Schubwände 182 |
| 5.1.2 | Multimodales Antwortspektrenverfahren 172 | 6.2.5 | Stand sicherheitsnachweise nach DIN EN 1998-1/NA 182 |
| 5.1.2.1 | Berechnung der erforderlichen Schwingformen 172 | 6.2.5.1 | Nachweis mit einem Verhaltensbeiwert von $q = 1,7$ 182 |
| 5.1.2.2 | Kombination der Schwingformen und Richtungsüberlagerung 172 | 6.2.5.2 | Nachweis mit erhöhten Verhaltensbeiwerten 182 |
| 5.2 | Nichtlineare statische Berechnungen 172 | | |

6.3	Mehrfamilienhaus: Linearer und nichtlinearer Nachweis 182	6.3.5	Nichtlinearer statischer Nachweis 186
6.3.1	Bauwerksbeschreibung und Erdbeben- einwirkung 182	6.3.6	Nachweis der Trennwände im 3. Obergeschoss 188
6.3.2	Modellierung des Gebäudes 183	6.3.7	Nachweis der Vormauerschale 188
6.3.3	Ansatz von Rahmentragwirkung durch Mitwirkung der Geschossdecken 184	7	Zusammenfassung 188
6.3.4	Nachweis der Schubwände 186		Literatur 188
C2	Technische Erweiterung und kulturelle Bedeutung von Eisenbahngewölbebrücken 191		
	Conrad Pelka, Johanna Monka, Gregor Schacht, Steffen Marx		
1	Erhalt von Gewölbebrücken – eine Verpflichtung 193	5.2.3	Halbfertigteiltbauweise 214
2	Eisenbahn(gewölbe)brücken 194	5.2.4	Fertigteiltbauweise 214
2.1	Zustand und Entwicklung 194	5.3	Anwendungsgrenzen für Fahrbahn- plattensysteme 215
2.2	Gewölbebrücken in Sachsen 195	5.4	Gestaltung von Fahrbahn- plattensystemen 215
2.2.1	Entwicklung der Eisenbahn in Sachsen 195	6	Eine nachhaltige Zukunft mit Gewölbebrücken 216
2.2.2	Entwicklung der Gewölbebrücken 196	6.1	CO ₂ -Bilanzierung 216
2.3	Eisenbahntwicklung im Stadtgebiet Leipzig 196	6.2	Finanzierungswürdigkeit von historischen Eisenbahngewölbebrücken 217
3	Konstruktion von Eisenbahn- gewölbebrücken 199	7	Beispielbauwerke 218
3.1	Bogenformen 199	7.1	Kornhain B6 (Strecke 6363, km 29,25) 218
3.2	Material der Gewölbebrücken 202	7.2	EÜ Pleißbrücke (Strecke 6362, km 4,563) 221
3.3	Entwicklung der Belastungsmodelle für Eisenbahnbrücken 203	7.3	Viadukt Luppe (Strecke 6380, km 1,525) 225
3.4	Statische Wirksamkeit 205	7.4	Karl-Heine-Kanal (Strecke 6383, km 10,504) 227
4	Typische Schäden bei Gewölbebrücken 206	7.5	An der Parthe (Strecke 6360, km 3,844) 231
4.1	Klassifizierung und Bewertung 206	7.6	Parthe, Flussbrücke (Strecke 6360, km 4,015) 234
4.2	Zustandserfassung bei Eisenbahn- gewölbebrücken 207	8	Analyse zur erhöhten Lebenserwartung ausgewählter Gewölbebrücken in und um Leipzig 236
4.2.1	Visuelle Begutachtung 209	9	Zusammenfassung 236
4.2.2	Strukturelle Analyse 209	10	Potenzial 237
4.2.3	Beurteilung der Tragsicherheit 210		Literatur 239
5	Generalsanierung 211		
5.1	Sanierungsmöglichkeiten bei Gewölbebrücken 211		
5.2	Fahrbahnwannensysteme 213		
5.2.1	Historische Entwicklung 213		
5.2.2	Ortbetonbauweise 213		
C3	Brandschutzbemessung von Mauerwerkskonstruktionen nach Eurocode 6 243		
	Thorsten Mittmann		
1	Gesetzliche Grundlagen 245	2.2	Brandverhalten der Baustoffe 247
2	Brandschutztechnische Anforderungen an die Bauteile 245	3	Erläuterungen der Begriffe 248
2.1	Feuerwiderstand von Bauteilen 245	3.1	Nichttragende Wände 248
2.1.1	Europäische Klassifizierung 245	3.2	Tragende Wände 248
2.1.2	Nationale Klassifizierung 246	3.3	Raumabschließende Wände 248
2.1.3	Anwendung der Klassen im bau- aufsichtlichen Verfahren 246	3.4	Nichttraumabschließende Wände 249

4	Nachweise im bauaufsichtlichen Verfahren 249	6.1	Bemessung nach DIN EN 1996-1-2/NA 253
5	Maßgebende Nachweise bei Mauerwerkskonstruktionen 249	6.1.1	Nichttragende Wände 253
5.1	Änderungen durch die Musterbauordnung seit 2016 250	6.1.2	Bemessungsbeispiel: Nichttragende Wand 254
5.2	Änderungen bei den prüftechnischen Nachweisen 250	6.1.3	Tragende Wände 254
5.2.1	Ausnutzungsfaktor α_{fi} 251	6.1.4	Bemessungsbeispiel: Tragende Wand aus Hochlochziegel HLz12, 1,2, Normalmauermörtel NM IIa 254
5.2.2	Ausnutzungsfaktor $\alpha_{6,fi}$ 252	6.1.5	Putze 255
5.2.3	Zusammenfassung der Änderungen der Prüfnormen 252	6.1.6	Details 255
5.3	Extrapolationsnormen 252	7	Zusammenfassung 255
6	Brandschutztechnische Bemessung von Mauerwerk 253		Literatur 256

D Mauerwerk im Bestand

D 1 Natur und Denkmal: Mauerwerksinstandsetzung im Spannungsfeld zwischen zwei Erhaltungszielen [257](#)

Christian Kayser

1	Allgemeines 259	1.3.1	Ortsfester Besatz 265
1.1	Denkmalgerechte Instandsetzung von historischem Natursteinmauerwerk 259	1.3.1.1	Gehölze: Bäume und Sträucher 265
1.2	Natursteinmauern als Lebensraum 261	1.3.1.2	Rankpflanzen (Efeu) 265
1.2.1	Tiere 261	1.3.1.3	Kleinpflanzen, Moose 266
1.2.1.1	Fledermäuse 261	1.4	Empfehlungen für die Praxis 266
1.2.1.2	Vögel 262	1.4.1	Tiere 267
1.2.1.3	Sonstige Wirbeltiere 262	1.4.1.1	Fledermäuse 267
1.2.1.4	Wirbellose 262	1.4.1.2	Vögel 267
1.2.2	Ortsfester Besatz 263	1.4.1.3	Sonstige Wirbeltiere und Wirbellose 267
1.2.2.1	Gehölze: Bäume und Sträucher auf und an den Mauern 263	1.4.2	Ortsfester Besatz 268
1.2.2.2	Rankpflanzen (Efeu) 263	1.5	Monitoring und Pflege 268
1.2.2.3	Kleinpflanzen auf Maueroberflächen und -kronen 263	2	Fallbeispiel: Zitadelle Mainz 269
1.2.2.4	Moose auf Maueroberflächen 263	2.1	Übersicht 269
1.2.2.5	Flechten 264	2.2	Zielkonflikt Natur- und Denkmalschutz 270
1.3	Mögliche Zielkonflikte zwischen Denkmalschutz und Naturschutz 264	2.3	Konzepte und Maßnahmen 270
			Literatur 273

E Innovationen im Mauerwerksbau

E 1 Digitale Transformation im Bauwesen – Grundlagen zur künstlichen Intelligenz und deren Anwendung im Wohnungsbau [275](#)

Michael A. Kraus, Mathias Obergrießer

	Begriffsverzeichnis/Dictionary 277	3	Einführung in die künstliche Intelligenz sowie das maschinelle und tiefe Lernen 283
1	Einleitung und Motivation 281	3.1	Grundlagen zu KI-Algorithmen, Modellen und Daten 283
2	Digitale Transformation als Voraussetzung für den Einsatz von künstlicher Intelligenz – Status quo und aktuelle Trends im Bauwesen 282	3.2	Machine Learning/ Maschinelles Lernen 288

3.3	Deep Learning/Tiefes Lernen	290	5	Potenziale und Zukunftstrends von künstlicher Intelligenz im Mauerwerks- und Wohnungsbau	301
4	Anwendungsbeispiele zum Einsatz von künstlicher Intelligenz im Wohnungsbau	293	5.1	Zukunftstrends für die Methoden der künstlichen Intelligenz	301
4.1	Hintergrundinformationen zu Lebenszyklusphasen von Gebäuden	293	5.2	Zukunftstrends für die Anwendung der künstlichen Intelligenz im Bauwesen	302
4.2	Lebenszyklusphase „Entwurf“	294	6	Fazit und Ausblick	302
4.2.1	Konzeptioneller Entwurf (Raumprogramm und Grundrisse) mit generativer KI	294	6.1	Zusammenfassung	302
4.2.2	KI-basierte Ersatzmodelle zur statischen Bemessung im Wohnungsbau	295	6.2	Epilog	304
4.3	Lebenszyklusphase „Bau und Konstruktion“	298		Literatur	305
4.4	Lebenszyklusphasen „Betrieb und Instandhaltung“	300			
F	Forschung				
F 1	Übersicht über laufende Forschungsvorhaben im Mauerwerksbau 309				
	Jonathan Schmalz, Simon Gille, Jennifer Gebhardt				
1	Laufende Forschungsvorhaben	315	1.2.5	Entwicklung eines innovativen Ansatzes zur Entkopplung von Ausfachungen und nichttragenden Trennwänden aus Mauerwerk von der Tragstruktur	329
1.1	Übersicht Forschungsprojekte und Forschungsstellen	315	1.2.6	Planziegelmauerwerk – Bestimmung der Eingangswerte für die Bemessung auf Basis von Versuchen: Datenerhebung und Analyse experimenteller Wanddruckversuche	331
1.2	Kurzberichte	315			
1.2.1	Vereinfachtes Nachweisverfahren für wärmedämmendes Ziegelmauerwerk im Brandfall	315			
1.2.2	Aufbaukörnungen aus gipshaltigem Ziegelmauerwerk	317			
1.2.3	Neue Ansätze für die realistische Bemessung von Mauerwerksbauten unter Horizontallasten	324			
1.2.4	Verhalten von Stahlbetonrahmen mit entkoppelten Mauerwerksausfachungen und Öffnungen unter seismischen Einwirkungen	326			
	Stichwortverzeichnis	335			

Autor:innenverzeichnis

Blaschek, Jasmine Alia, Dipl.-Ing.

Architekturstudium TU Wien, seit 2016 Mitarbeiterin im Ingenieurbüro ZRS Ingenieure GmbH, mit Schwerpunkt Fachplanung Lehm- und Ziegelbau, Gutachten, Materialprüfung und -analyse, Forschung und Wissenstransfer. Projektleitung der Konservierungsarbeiten in Uruk, Südirak für das Deutsche Archäologische Institut (DAI) sowie Projektleitung der Konservierungsstrategien für den Tempel von Ningirsu in Tello Girsu, Südirak für The British Museum.

ZRS Ingenieure GmbH, Schlesische Str. 26, 10997 Berlin

Brinkmann, Maximilian, M.Sc.

Bauingenieurstudium an der TU Darmstadt von 2014–2019, Auszeichnung der Masterthesis mit dem „DVL Lehmbaupreis 2020“, seit 2019 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der TU Darmstadt, seit 2022 Mitglied im Normungsausschuss Lehm- und Ziegelbau (NA 005-06-08), 2022 Einreichung der Dissertation zum Thema „Tragverhalten druckbeanspruchter Lehm- und Ziegelmauerwerke unter Berücksichtigung nichtlinearer Feuchteprofile“.

Technische Universität Darmstadt, Institut für Massivbau, Franziska-Braun-Str. 3, 64287 Darmstadt

Butenweg, Christoph, Prof. Dr.-Ing.

1989–1994 Bauingenieurstudium Ruhr-Universität Bochum, 1994–1999 Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Promotion am Lehrstuhl für Baumechanik und Baustatik – Universität Essen, 2001–2015 Oberingenieur am Lehrstuhl für Baustatik und Baudynamik – RWTH-Aachen, ab 2006 Geschäftsführender Gesellschafter SDA-engineering GmbH, ab 2016 Professur Technische Mechanik und Konstruktiver Ingenieurbau – FH Aachen, ab 2016 Vorstandsmitglied CWE – RWTH Aachen, ab 2021 Gastprofessor Universität Belgrad.

Center for Wind and Earthquake Engineering (CWE), RWTH Aachen University, Mies-van-der-Rohe-Str. 1, 52074 Aachen

El-Deib, Khaled, Dipl.-Ing.

Bauingenieurstudium RWTH Aachen University, 2010–2012 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der RWTH Aachen University, 2002–2019 Tragwerksplaner Ingenieurbüro El-Deib, seit 2020 Geschäftsführer bei SDA-engineering GmbH, seit 2000 SaSV für

Wärme- und Schallschutz, seit 2014 Energieberater BAFA und in KfW-Expertenliste, seit 2008 bauvorlageberechtigt, seit 2019 qualifizierter Tragwerksplaner IK-Bau NRW.

SDA-engineering GmbH, Kaiserstr. 100, TPH III – B, 52134 Herzogenrath

Gebhardt, Jennifer, B.Eng.

Bauingenieurstudium HS Karlsruhe 2017–2021, seit 2022 wissenschaftliche Mitarbeiterin und Lehrbeauftragte an der HS Karlsruhe.

Hochschule Karlsruhe – University of Applied Sciences (HKA), Moltkestr. 30, 76133 Karlsruhe

Gellert, Christoph, Dr.-Ing.

Bauingenieurstudium RWTH Aachen University, 2006–2008 Lehrbeauftragter für Statik der Flächen-tragwerke und 2004–2010 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der RWTH Aachen University, 2010 Promotion am Lehrstuhl für Baustatik und Baudynamik der RWTH Aachen University, 2010–2022 Geschäftsführer bei SDA-engineering GmbH, seit 2019 qualifizierter Tragwerksplaner IK-Bau NRW.

Adele-Weidman-Str. 67, 52072 Aachen

Gille, Simon, B.Eng.

Bauingenieurstudium HS Karlsruhe 2017–2021, seit 2022 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der HS Karlsruhe.

Hochschule Karlsruhe – University of Applied Sciences (HKA), Moltkestr. 30, 76133 Karlsruhe

Graubner, Carl-Alexander, Prof. Dr.-Ing.

Bauingenieurstudium an der TU München von 1977–1981, 1989 Promotion am Institut für Massivbau der TU München, Technischer Abteilungsleiter bei der Philipp Holzmann AG von 1989–1994, Professor am Institut für Massivbau der TU Darmstadt von 1996–2020, Gesellschafter bei der König und Heunisch Planungsgesellschaft in Frankfurt von 2001–2020, seit 2021 Lehrbeauftragter am Lehrstuhl für Massivbau der TU München, seit 2021 Gesellschafter bei BUNG Planen und Beraten GmbH, Prüflingenieur für Baustatik, Obmann des Normungsausschusses Mauerwerk (NA 005-06-01).

Sachsenspiegelstr. 7, 80995 München

Kayser, Christian, Dr.-Ing.

1999–2004 Architekturstudium TU München/University of Bath, 2008–2011 Akad. Rat an der TUM, 2010 Promotion am Lehrstuhl für Tragwerksplanung der TUM, seit 2013 Lehrbeauftragter an der TUM und an der LMU, seit 2012 Geschäftsführer bei Barthel & Maus, Beratende Ingenieure, seit 2019 geschäftsführender Gesellschafter bei Kayser + Böttges, Barthel + Maus, Ingenieure und Architekten GmbH.

Kayser + Böttges, Barthel + Maus, Ingenieure und Architekten GmbH, Infanteriestr. 11a, 80797 München/Anni-Eisler-Lehmann-Str. 3, 55122 Mainz

Kraus, Michael Anton, Dr.-Ing.

Bauingenieurstudium TU München, 2015–2019 wiss. Mitarbeiter an der Universität der Bundeswehr München, 2019 Promotion zur Anwendung von Maschinellem Lernen zur Berechnung von Verbundglas im intakten und gebrochenen Zustand, ab 2020 Post-Doktorand für künstliche Intelligenz und numerische Mechanik zunächst in Stanford (USA) und ab Oktober 2020 dafür an der ETH Zürich.

ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK) sowie Design++ Initiative, Stefano-Francini-Platz 5, 8093 Zürich/Schweiz

Kubalski, Thomas, M.Sc.

Bauingenieurstudium RWTH Aachen University, 2013–2019 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der RWTH Aachen University, seit 2020 Projektingenieur bei SDA-engineering GmbH.

SDA-engineering GmbH, Kaiserstr. 100, TPH III – B, 52134 Herzogenrath

Marx, Steffen, Univ.-Prof. Dr.-Ing.

Bauingenieurstudium HAB Weimar, 1995–1999 wiss. MA an der Uni Weimar, 1999 Promotion, 1999–2001 Planungsing. bei BGS Ingenieursozietät, Dresden, 2001–2003 Teamleiter Konstruktiver Ing.-bau bei DE-Consult GmbH und DB ProjektBau GmbH, 2004–2005 Projektsteuerer, DB ProjektBau GmbH, dort 2005–2007 Arbeitsgebietsleiter Ingenieur- und Hochbau, 2007–2010 Hon.-Prof. für Mess- und Versuchstechnik, TU Dresden, 2010–2011 University of California San Diego, Visiting Prof., seit 2011 Gründer und Gesellschafter „Marx Krontal Partner“, 2011–2020 Prof. Massivbau, Leibniz Universität Hannover, seit 2020 DB Netz AG – Stiftungsprof. für Ingenieurbau, Inst. für Massivbau, TU Dresden.

Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Massivbau, 01062 Dresden

Mittmann, Thorsten, Dipl.-Ing.

Studium des Bauingenieurwesens an der TU Braunschweig, Diplomarbeit aus dem Bereich Brandschutz am iBMB der TU Braunschweig. Anschließend Tätigkeit in einem Ingenieurbüro für Brandschutz. Seit 2002 beschäftigt bei der Materialprüfanstalt für das Bauwesen Braunschweig, Fachbereich Brandschutz (MPA BS); Leiter der Fachgruppe „Bauwerke und Bauteile“ und seit 2016 stellvertretender Fachbereichsleiter des Fachbereichs „Brandschutz“. Obmann des DIN-Normenausschusses NA 005-52-02 AA „Arbeitsausschuss Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Bauteile“. Mitarbeiter in deutschen und europäischen Normungsausschüssen im Bereich Brandschutz. Sachverständiger in diversen Sachverständigenausschüssen des DIBt, unter anderem Brandschutz und Wandbauelemente.

Materialprüfanstalt für das Bauwesen (MPA), Beethovenstraße 52, 38106 Braunschweig

Monka, Johanna, M.Sc.

Architekturstudium (Bachelor) Leibniz Universität Hannover, Architekturstudium (Master) RWTH Aachen, seit 2020 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Massivbau, TU Dresden.

Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Massivbau, 01062 Dresden

Obergrießer, Mathias, Prof. Dr.-Ing.

Bauingenieurstudium an der FH Regensburg/Erfurt, 2008–2014 wissenschaftlicher Mitarbeiter und Lehrbeauftragter an der HS Regensburg, 2016 Promotion am Lehrstuhl CMS der TU München, 2014–2016 Projektleiter Tragwerksplanung im Ingenieurbüro Uschner + Obergrießer, 2017–2018 Projektleiter zur Produktentwicklung von Infrastrukturprodukten bei der Firmengruppe Max Bögl, seit 2018 Professor für das Lehrgebiet „Digitalisiertes Bauen“ an der Fakultät Bauingenieurwesen, OTH Regensburg.

OTH Regensburg, Galgenbergstr. 30, 93053 Regensburg

Pelka, Conrad, M.Sc.

Bauingenieurstudium (Bachelor) HAWK Hildesheim, Konstruktiver Ingenieurbau (Master) Leibniz Universität Hannover, seit 2018 Mitarbeiter DB Netz AG KIB Portfolio Hannover und seit 2020 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau, TU Dresden.

Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Massivbau, 01062 Dresden

Purkert, Benjamin, M.Sc.

Bauingenieurstudium TU Darmstadt, 2014–2015 Tragwerksplaner bei Bernhardt Ingenieure GmbH, 2015–2020 wiss. Mitarbeiter am Institut für Massivbau der TU Darmstadt, 2020–2021 Leiter Technik & Normung bei der Deutschen Gesellschaft für Mauerwerks- und Wohnungsbau e. V. (DGfM) sowie Geschäftsstellenleiter des Deutschen Ausschusses für Mauerwerk e. V., seit 2022 Geschäftsführer des DAfM e. V.

Deutscher Ausschuss für Mauerwerk e. V. (DAfM), Kochstr. 6–7, 10969 Berlin

Raupach, Michael, Univ.-Prof. Dr.-Ing.

1993–1996 Geschäftsführer des Ing.-Büros Sasse + Schießl + Fiebrich + Raupach in den Bereichen Baustoffe und Bauwerkserhaltung. 1997–1999 Inhaber und Geschäftsführer des Ingenieurbüros Prof. Schießl + Dr. Raupach Consulting + Engineering und Geschäftsführer der S+R Sensortec GmbH. Im Jahr 2000 Berufung zum Universitätsprofessor an die RWTH Aachen University. Gegenwärtig dort Leiter des Lehrstuhls für Bauwerkserhaltung und des Instituts für Baustoffforschung, ibac. Seit 2008 Mitinhaber des Ingenieurbüros Raupach Bruns Wolff GmbH.

Institut für Baustoffforschung der RWTH Aachen University, Schinkelstr. 3, 52062 Aachen

Röhlen, Ulrich, Dipl.-Ing.

Architekturstudium FH Aachen 1982–1991, seit 1984 in der Ausführung von Lehm bauarbeiten und in der Produktion von Lehm baustoffen tätig, Leiter der Technik der Fa. Claytec GmbH & Co. KG, stellvertretender Obmann des Normenausschuss Lehm bau am DIN, Vorstandsmitglied des Dachverband Lehm e. V., Weimar.

CLAYTEC GmbH & Co. KG, Nettetal Str. 113–117, 41751 Viersen

Saenger, Dorothea, Dipl.-Ing.

Bauingenieurstudium an der RWTH Aachen University, 2008–2020 wiss. Mitarbeiterin und 2018–2020 Leiterin der Arbeitsgruppe Mauerwerk am Institut für Baustoffforschung der RWTH Aachen University, derzeit in Elternzeit.

Institut für Baustoffforschung der RWTH Aachen University (ibac), Schinkelstr. 3, 52062 Aachen

Schacht, Gregor, Dr.-Ing.

2004–2009 Bauingenieurstudium an der TU Dresden, 2009–2014 wiss. Mitarbeiter und Promotion, Institut für Massivbau, TU Dresden, seit 2014 Projektleiter

Marx Krontal Partner, seit 2019 Teamleiter Planung von Ingenieurbauwerken, Marx Krontal Partner, seit 2014 Lehrbeauftragter Leibniz Universität Hannover.

Marx Krontal Partner, Werftstr. 17, 30163 Hannover

Schmalz, Jonathan, M.Eng.

Bauingenieurstudium (Bachelor und Master) an der OTH-Regensburg 2017, seit 2017 wiss. Mitarbeiter im Labor für den Konstruktiven Ingenieurbau der OTH Regensburg.

Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Labor für Konstruktiven Ingenieurbau, Galgenbergstr. 30, 93053 Regensburg

Thiele, Marc, Dr.-Ing.

Bauingenieurstudium an der TU Berlin 1998–2004, Auszeichnung mit dem Dr.-Ing. Ernst Trapp Preis für herausragende Studienleistungen sowie die Diplomarbeit, Anlagenplaner bei Siemens Power Generation 2005–2008, Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) seit 2009, Promotion an der Technischen Universität Berlin 2015.

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Fachbereich 7.2 – Ingenieurbau, Unter den Eichen 87, 12205 Berlin

Wiehle, Philipp, M.Sc.

Lehre als Zimmerer und Anstellung als Geselle von 2003–2007, Bauingenieurstudium an der TU Berlin 2007–2014, Auszeichnung Dr.-Ing. Ernst Trapp Preis für herausragende Studienleistungen sowie Lehmbaupreis 2016, Tragwerksplaner bei ZRS Architekten und Ingenieure 2014–2016. Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Future Cities Laboratory der ETH Zürich in Singapur 2016–2018, seit 2019 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der BAM, seit 2021 Mitglied im Normungsausschuss Lehm bau (NA 005-06-08 AA) am DIN, 2023 Einreichung der Promotion.

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Unter den Eichen 87, 12205 Berlin

Winkels, Bernd, Dipl.-Ing.

Bauingenieurstudium an der RWTH Aachen University, seit 2013 wiss. Mitarbeiter am Institut für Baustoffforschung der RWTH Aachen University (ibac).

Institut für Baustoffforschung der RWTH Aachen University (ibac), Schinkelstr. 3, 52062 Aachen

Ziegert, Christof, Prof. Dr.-Ing.

Bauingenieurstudium TH Leipzig, 1998–2003 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Berlin, FG Tragwerksentwurf und Konstruktion, 2003 Promotion am gleichen Lehrstuhl zum Thema Lehmwellerbau, Honorarprofessur für Lehmbau an der FH Potsdam

und Lehrauftrag an der Bauhausuniversität Weimar, seit 2003 Geschäftsführer ZRS Ingenieure GmbH, ö. b. u. v. Sachverständiger für Schäden im Lehmbau, Obmann Normungsausschuss Lehmbau am DIN.

ZRS Ingenieure GmbH, Schlesische Str. 26,
10997 Berlin

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Eric Brehm
Hochschule Karlsruhe
Technik und Wirtschaft
Moltkestraße 30
76133 Karlsruhe

Prof. Dr.-Ing. Detleff Schermer
Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg
Galgenbergstraße 30
93053 Regensburg

Verlag

Ernst & Sohn GmbH
Rotherstraße 21, 10245 Berlin
Tel. (030) 47031-200
E-Mail: info@ernst-und-sohn.de
www.ernst-und-sohn.de

A Normen und Baustoffe

**A 1 Eigenschaften und Eigenschaftswerte von
Mauersteinen, Mauermörtel und Mauerwerk**

Michael Raupach, Dorothea Saenger und Bernd Winkels

Mauerwerk-Kalender 2023: Instandsetzung – Erdbeben – Lehm

Herausgegeben von Detleff Schermer und Eric Brehm.

© 2023 Ernst & Sohn GmbH. Published 2023 by Ernst & Sohn GmbH.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3	6	Mauerwerk	10
2	Mauersteine	3	6.1	Allgemeines	10
2.1	Festigkeitseigenschaften	3	6.2	Festigkeitseigenschaften	10
2.1.1	Druckfestigkeit in Steinhöhe	3	6.2.1	Druckfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen	10
2.1.2	Druckfestigkeit in Steinlänge und -breite	3	6.2.2	Druckfestigkeit parallel zu den Lagerfugen	11
2.1.3	Zug- und Spaltzugfestigkeit	3	6.2.3	Zugfestigkeit	11
2.2	Verformungseigenschaften	4	6.2.4	Biegezugfestigkeit	13
2.2.1	Elastizitätsmodul	4	6.2.5	Schubfestigkeit	13
2.2.2	Querdehnungsmodul, Querdehnzahl	4	6.3	Verformungseigenschaften	14
2.3	Kapillare Wasseraufnahme	5	6.3.1	Elastizitätsmoduln	14
3	Mauermörtel	6	6.3.2	Feuchtedehnung, Kriechen, Wärmedehnung	14
3.1	Festigkeitseigenschaften	6		Literatur	16
3.1.1	Druckfestigkeit	6			
3.1.2	Zugfestigkeit	6			
3.2	Längs- und Querdehnungsmoduln	6			
4	Mauermörtel im Mauerwerk	6			
5	Verbund zwischen Mauerstein und Mauermörtel	8			
5.1	Allgemeines	8			
5.2	Haftscherfestigkeit	8			
5.3	Haftzug- und Biegehaftzugfestigkeit	9			

1 Einleitung

Der vorliegende Beitrag wurde von Dr. Peter Schubert[†] am Institut für Baustoffforschung der RWTH Aachen University (ibac) ab dem Jahr 1989 verfasst und ab dem Jahr 2013 durch Prof. Wolfgang Brameshuber[†] fortgeführt. Die Autoren haben ihn neu aufbereitet.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die wesentlichen Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Mauersteinen, Mauermörtel und Mauerwerk jeweils kurz hinsichtlich Bedeutung und Prüfverfahren beschrieben und – soweit möglich und sinnvoll – Eigenschaftswerte angegeben. Diese beruhen auf Auswertungen von Daten tatsächlich geprüfter Materialien und Materialkombinationen, entstanden in zahlreichen Forschungsvorhaben am ibac bzw. zusammengetragen im Rahmen ergänzender Literaturrecherchen. Es wird deutlich, dass aufgrund der vielfältigen Materialien und Kombinationsmöglichkeiten eine große Bandbreite an Eigenschaftswerten entsteht. In Normen und allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen werden anzusetzende Eigenschaftswerte bzw. Mindesteigenschaftswerte festgelegt. Die hier aufgeführten 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 von Bauwerken. In Grenzfällen können durch einen ingenieurmäßig überdachten Ansatz geeigneter Kennwerte vorhandene Baustoffreserven ausgenutzt werden.

2 Mauersteine

2.1 Festigkeitseigenschaften

2.1.1 Druckfestigkeit in Steinhöhe

Die Druckfestigkeit in Richtung Steinhöhe ist eine der wesentlichen Kenngrößen von Mauersteinen. Die Prüfung der Druckfestigkeit kann nach DIN EN 772-1 [16] an ganzen Mauersteinen erfolgen.

2.1.2 Druckfestigkeit in Steinlänge und -breite

Bei einigen Beanspruchungen von Mauerwerkbauteilen bzw. Bauteilbereichen, wie Scheibenschub, Biegung (Biegedruckzone) oder Teilflächenbelastung senkrecht zur Wandebene, können die Mauersteine in Richtung Steinlänge bzw. -breite auf Druck beansprucht werden. Die Prüfung der Druckfestigkeit in diese Richtungen kann in Anlehnung an DIN EN 772-1 [16] an ganzen Mauersteinen erfolgen.

Die Druckfestigkeit in Richtung Steinlänge und -breite ist im Allgemeinen kleiner als in Richtung Steinhöhe. Bei Vollsteinen resultiert herstellungsbedingt (Pressen, Strangpressen, Rüttelverdichtung oder Treiben)

eine leichte Anisotropie. Die Form der Mauersteine hat ebenfalls einen großen Einfluss auf die Prüfwerte der Steindruckfestigkeit. Bei Lochsteinen resultieren je nach Lochanteil, Form der Lochung, Lochanordnung etc. weitaus kleinere Druckfestigkeitswerte.

Anhaltswerte von Druckfestigkeitsverhältnissen Steinlänge/Steinhöhe sind in [1] angegeben. Aus [1] lassen sich folgende Zusammenhänge ableiten: Für Hochlochziegel und Leichtbetonhohlblöcke kann erwartungsgemäß kein Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit in Steinhöhe und der Druckfestigkeit in Steinlänge festgestellt werden. Für Porenbetonsteine ergibt sich mit zunehmender Steindruckfestigkeit eine Abnahme des Druckfestigkeitsverhältnisses Steinlänge/Steinhöhe. Bei Mauerziegeln sowie Kalksandvoll- und -lochsteinen bleibt dagegen das Druckfestigkeitsverhältnis Steinlänge/Steinhöhe mit zunehmender Steindruckfestigkeit weitestgehend konstant.

2.1.3 Zug- und Spaltzugfestigkeit

Die Zugfestigkeit ist ebenfalls eine wesentliche Kenngröße von Mauersteinen. Die maßgebende Richtung wird von der ausgeübten Mauerwerkbeanspruchung abhängen. Aus einer Druckbeanspruchung von Mauerwerk werden – aufgrund des entstehenden mehraxialen Spannungszustands – Zugspannungen im Mauerstein in Richtung Steinbreite und -länge resultieren, während durch eine Schub- bzw. Biegebeanspruchung von Mauerwerk Zugspannungen im Mauerstein in Richtung Steinhöhe bzw. -länge hervorgerufen werden.

Die Prüfung der Zugfestigkeit ist nicht normativ geregelt. Je nach Anisotropie, Form und Lochung unterscheiden sich i. d. R. auch die Zugfestigkeitswerte richtungsabhängig.

Tabelle 1 gibt den Stand der Auswertung nach [2] wieder. Die in Richtung Steinlänge bestimmten Zugfestigkeitswerte sind als Verhältniswerte bezogen auf die in Richtung Steinhöhe geprüften Druckfestigkeitswerte angegeben. In Tabelle 1 sind zudem rechnerische Steinzugfestigkeitswerte bezogen auf die umgerechnete mittlere Steindruckfestigkeit nach DIN EN 1996-1-1/NA [17] aufgeführt. Bei diesen Werten handelt es sich um charakteristische Werte.

Mithilfe der angegebenen Verhältniswerte $f_{bt,ca}/f_{st}$ kann die rechnerische Steinzugfestigkeit für die Ermittlung der charakteristischen Biegezug- und Schubfestigkeit bei Steinzugversagen abgeschätzt werden, vgl. Abschnitte 6.2.4 und 6.2.5. Für Porenbetonsteine wird der Verhältniswert in Abhängigkeit der Steindruckfestigkeit angegeben. Der in der Berechnungsformel enthaltene „charakteristische“ Verhältniswert Steinzug-/Steindruckfestigkeit von 0,082 ist das Ergebnis einer Literaturlauswertung. Für die Herleitung des Verhältniswertes wurden 26 Versuche an Porenbetonplansteinen mit unterschiedlichen Abmessungen herangezogen. Der Faktor $1/1,25 = 0,8$ resultiert aus der Umrechnung der Steindruckfestigkeit in die mittlere

Tabelle 1. Mauersteine; Verhältniswerte Steinzug-/Steindruckfestigkeit nach [17] bzw. [2]

Steinart/-sorte	$f_{bt,cal}/f_{st}$	Steinart/-sorte	$\beta_{z,l}/\beta_{D,st,prüf}$		
			Mittelwert	Wertebereich	n
Hohlblocksteine	0,020	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 und Steine mit Grifföchern (GL) oder Griffaschen	0,026	HLz	0,03	0,013 ... 0,041	20
		LHLz	0,01	0,002 ... 0,019	54
		KS L	0,035	0,026 ... 0,055	19
		KS (GL)	0,045	0,027 ... 0,065	24
Vollsteine ohne Grifföcher oder Griffaschen	0,032	KS	0,063	0,039 ... 0,081	18
		Mz	0,04	0,01 ... 0,08	9
		V/Vbl 2	0,11	0,06 ... 0,18	16
		V/Vbl ≥ 4	0,07	0,05 ... 0,09	7
Porenbetonsteine	$\frac{0,082}{1,25} \cdot \frac{1}{0,7 + \left(\frac{f_{st}}{25}\right)^{0,5}}$ 1)	PB/PP 2	0,18	0,13 ... 0,20	7
		PB/PP 4, 6, 8	0,11	0,09 ... 0,13	8

- 1) Gleichung gilt für Porenbetonplansteine der Länge ≥ 498 mm und der Höhe ≥ 248 mm
- $f_{bt,cal}$ angenommene rechnerische Steinlängszugfestigkeit nach [17] in N/mm²
- f_{st} umgerechnete mittlere Steindruckfestigkeit nach [17] in N/mm²
- $\beta_{z,l}$ Prüfwert der Steinlängszugfestigkeit in N/mm²
- $\beta_{D,st,prüf}$ Prüfwert der Steindruckfestigkeit in Richtung Steinhöhe (ohne Formfaktor) in N/mm²
- n Anzahl der Versuchswerte

Mindesteindruckfestigkeit f_{st} . Der Faktor $1/(0,7 + (f_{st}/25)^{0,5})$ stellt eine Abminderung von $f_{bt,cal}$ für Steine mit höheren Festigkeiten (größer als Steinfestigkeitsklasse 2) dar. Er ist ungefähr 1 für die Steinfestigkeitsklasse 2 und nimmt mit höheren Festigkeitsklassen ab. Um die Verhältniswerte $\beta_{z,l}/\beta_{D,st,prüf}$ für den Nachweis der Biegezug- und Schubtragfähigkeit ansetzen zu können, sind die Prüfwerte jeweils noch in charakteristische Werte umzurechnen. In Grenzfällen können durch Ansatz dieser Werte ggf. vorhandene Baustoffreserven ausgenutzt und höhere Biegezug- bzw. Schubfestigkeiten erzielt werden. In bestimmten Fällen kann das Heranziehen der Spaltzugfestigkeit zur Abschätzung der Zugfestigkeit von Vollsteinen von Vorteil sein. Als Anhaltswert kann näherungsweise ein Verhältnis Spaltzugfestigkeit $\beta_{sz,l}$ zu Zugfestigkeit $\beta_{z,l}$ zwischen 1,1 und 1,3 angenommen werden, vgl. [1].

2.2 Verformungseigenschaften

2.2.1 Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul gibt das Verhältnis der einwirkenden Spannung zur resultierenden elastischen Dehnung an und ist allgemein bei Mauerwerk als Sekantenmodul bei einem Drittel der Höchstspannung unter

einmaliger Belastung definiert. Der Druck-E-Modul von Mauersteinen wird im Druckversuch in Steinhöhe ermittelt. Der Zug-E-Modul von Mauersteinen wird in einaxialen Zugversuchen, meist in Steinlänge, bestimmt.

Der Elastizitätsmodul von Mauersteinen beeinflusst die Steifigkeit von Mauerwerk maßgeblich. Für eine erste Abschätzung des Druck-E-Moduls von Kalksand- und Porenbetonsteinen können nach [1] die in Tabelle 2 angegebenen Regressionsgleichungen angesetzt werden. Zusammenhänge zwischen dem Zug-E-Modul und der Steinzugfestigkeit bei einer Zugbeanspruchung in Steinlänge bzw. zwischen dem Zug-E-Modul und dem Druck-E-Modul werden in [1] angegeben. Diese sind ebenfalls in Tabelle 2 zusammengestellt.

2.2.2 Querdehnungsmodul, Querdehnzahl

Zur Bestimmung des Querdehnungsmoduls von Mauersteinen unter einer Druckbeanspruchung in Richtung Steinhöhe wird die Spannung auf die zugehörige, quer zur Belastungsrichtung, d. h. in Richtung Steinlänge bzw. -breite, gemessene Dehnung bezogen.

Diese Kenngröße ist von maßgebender Bedeutung für die Drucktragfähigkeit von Mauerwerk. Bei einem ungünstigen Verhältnis der Querdehnungsmoduln von

Tabelle 2. Mauersteine; Regressionsgleichungen zur Bestimmung der Elastizitätsmoduln unter Druck- sowie Zugbeanspruchung in Abhängigkeit der Steindruck- bzw. -zugfestigkeit bzw. des Druck-E-Moduls für die jeweilige Belastungsrichtung (aus [1])

Steinart	Druck-E-Modul (Steinhöhe)				Zug-E-Modul (Steinlänge)			
	E_D	Prüfkörper	n (n_i)	Best.	$E_{z,l}$	Prüfkörper	n (n_i)	Best.
Kalksandsteine	$230 \cdot \beta_{D,st}$	Prismen	(12)	–	$5800 \cdot \beta_{z,l}^{0,73}$	Prismen	13	0,95
Leichtbetonsteine	–	–	–	–	$6000 \cdot \beta_{z,l}$	Prismen	(35)	0,77
Porenbetonsteine	$700 \cdot \beta_{D,st}^{0,74}$	Zylinder	18	0,83	$3180 \cdot \beta_{z,l}$	Zylinder/Prismen	21	0,78
					$1,01 \cdot E_D$	Zylinder	11	0,93

E_D Druck-E-Modul in Richtung Steinhöhe in N/mm²

$E_{z,l}$ Zug-E-Modul in Richtung Steinlänge in N/mm²

$\beta_{D,st}$ Mauersteindruckfestigkeit in Richtung Steinhöhe in N/mm²

$\beta_{z,l}$ Mauersteinzugfestigkeit in Richtung Steinlänge in N/mm²

n Anzahl der Mittelwerte

(n_i) Anzahl der Einzelwerte

Best. Bestimmtheitsmaß der gewählten Regression

Tabelle 3. Mauersteine; Querdehnungsmodul und Querdehnzahl (Wertebereiche aus [1] und [3])

Steinart/-sorte	Festigkeitsklasse	Querdehnungsmodul E_q	Querdehnzahl μ
		10^3 N/mm ²	–
Hbl, Vbl	2 ... 6	3,6 ... 20 (8)	0,08 ... 0,11
PB, PP	2 ... 6	5,6 ... 25 (7)	0,11 ... 0,15
KS, KS L, KS Hbl	8 ... 28	12 ... 100 (12)	0,12
HLZ	6	2,7 ... 40 (4)	0,11 ... 0,20
	8	12 ... 59 (8)	
	12	31 ... 55 (4)	
	48	133 (–)	

Werte in Klammern: Anzahl der Versuchswerte

Mauermörtel und Mauerstein wird der Mauerstein stärker auf Zug beansprucht, was die Druckfestigkeit des Mauerwerks reduziert. Werte für den Querdehnungsmodul von Mauersteinen sind in Tabelle 3 angegeben.

Neben dem E-Modul spielt auch die Querdehnzahl μ der Mauersteine in Bezug auf die Mauerwerkdruckfestigkeit eine wesentliche Rolle. Die Querdehnzahl ergibt sich im Druckspannungszustand als Absolutwert aus dem Verhältnis von Querdehnung zu Längsdehnung bei einem Drittel der Höchstspannung. Wertebereiche für die Querdehnzahl verschiedener Mauersteine sind ebenfalls in Tabelle 3 aufgeführt.

2.3 Kapillare Wasseraufnahme

Die Wasseraufnahmefähigkeit von Mauersteinen kann durch die kapillare Wasseraufnahme bzw. den Wasseraufnahmekoeffizienten ω gekennzeichnet werden. Diese sind wichtige Kenngrößen für die Beurteilung des Wasserabsaugens aus dem Fugenmörtel durch den Mauerstein, für die Wasseraufnahme von Sichtflächen

Tabelle 4. Mauersteine; Wasseraufnahmekoeffizient (Werte bzw. Wertebereiche aus [4])

Steinart/-sorte	Wasseraufnahmekoeffizient ω		
	Mittlerer Wert	Wertebereich	n
	kg/(m ² h ^{0,5})		–
Kalksand-Referenzsteine (KS-Ref)	2,7	2,4 ... 2,9	3
Kalksandsteine (KS)	2,0	1,7 ... 2,1	3
Hochlochziegel (HLZ)	7,4	7,2 ... 7,5	3
Mauerziegel (VMz)	18,9	18,6; 19,1	2
Leichtbetonsteine (V)	1,0	1,0; 1,0	2
Betonsteine (Vn)	1,5	1,2; 1,9	2

n: Anzahl der Einzelwerte

bei Beregnung, vor allem bei Schlagregen, sowie für die Beurteilung des Austrocknungsverhaltens.

Werden Mauersteine mit schneller Wasseraufsaugcharakteristik – gekennzeichnet durch hohe Wasseraufnahmekoeffizienten ω – vor dem Vermörteln nicht vorgegärt, so kann dem Mörtel nach dem Vermauern zu viel Wasser entzogen werden. Mögliche Folgen sind eine zu geringe Verbundfestigkeit zwischen Mauermörtel und Mauerstein (Haftscher- und Haftzugfestigkeit) und/oder eine zu geringe Mörteldruckfestigkeit in der Fuge. Dies trifft stets für Mauersteine mit einem hohen Anteil an kleinen Kapillarporen und geringem Feuchtegehalt vor dem Vermörteln zu.

Die kapillare Wasseraufnahme wird i. d. R. nach DIN EN ISO 15148 [18] geprüft. Ausgehend vom getrockneten Zustand wird bei ständigem Wasserkontakt der Saugfläche der zeitliche Verlauf der Wasseraufnahme ermittelt. Dieser ist bei reinen kapillaren Saugvorgängen im Wurzelmaßstab annähernd linear. Der Anstieg wird durch den Wasseraufnahmekoeffizienten ω in kg/(m² h^{0,5}) gekennzeichnet. Tabelle 4 enthält ω -Werte von Mauersteinen nach [4].

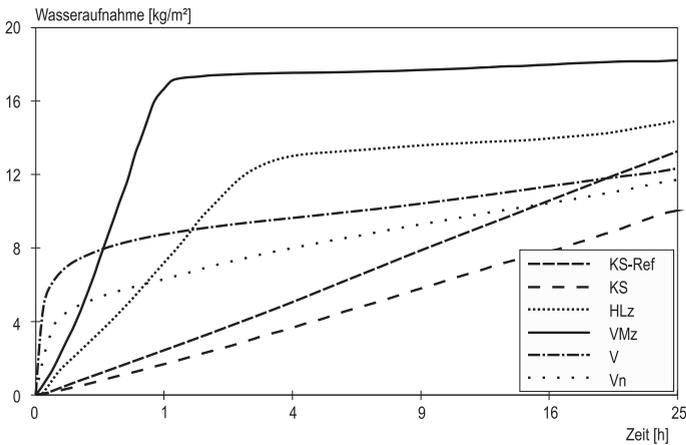


Bild 1. Zeitlicher Verlauf der Wasseraufnahme ausgewählter Mauersteine (nach [4])

In Bild 1 wird der an verschiedenen Mauersteinen bestimmte zeitliche Verlauf der kapillaren Wasseraufnahme dargestellt. Es wird ersichtlich, dass Mauerziegel in kürzester Zeit Wasser aufnehmen, während Kalksandsteine über einen langen Zeitraum kontinuierlich saugen.

ren Gesteinskörnungen, z. B. mineralische Perlite, der Fall.

In Tabelle 5 sind – differenziert nach Mörtelart – Beziehungen zwischen dem Längsdehnungsmodul E und der Normdruckfestigkeit β_D sowie Wertebereiche für Querdehnungsmoduln von Mauermörteln nach [1] zusammengestellt.

3 Mauermörtel

3.1 Festigkeitseigenschaften

3.1.1 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit von Mauermörtel wird an Normprismen nach DIN EN 1015-11 [19] bestimmt. Wertebereiche für die Druckfestigkeit von Mauermörtel nach [1] sind in Tabelle 5 gegeben.

3.1.2 Zugfestigkeit

Die Prüfung der Zugfestigkeit von Mauermörtel ist nicht normativ geregelt. Für Normalmauermörtel ergab sich nach [1] die in Tabelle 5 angegebene Beziehung zwischen Zug- und Druckfestigkeit.

3.2 Längs- und Querdehnungsmodul

Der Längsdehnungsmodul von Mauermörtel wird im statischen Druckversuch an Mörtelgroßprismen nach DIN 18555-4 [20] ermittelt. Der Querdehnungsmodul von Mauermörtel wird im Allgemeinen gemeinsam mit dem Längsdehnungsmodul bestimmt. Dabei wird die Druckspannung auf die zugehörige gemessene Querdehnung bezogen. Ist der Querdehnungsmodul des Mauermörtels deutlich kleiner als der des Mauersteins, 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 verformba-

4 Mauermörtel im Mauerwerk

Die Eigenschaften von Mauermörtel werden durch den Kontakt mit den Mauersteinen in mehr oder weniger starkem Umfang beeinflusst. Abhängig von der Mauersteinart und dem Feuchtegehalt des Mauersteins beim Vermauern wird dem Mauermörtel mehr oder weniger Wasser über einen kurzen oder langen Zeitraum entzogen, vgl. Abschnitt 2.3. Dieser Effekt kann sich festigkeitsmindernd oder -steigernd auswirken. Festigkeitssteigerungen ergeben sich nach [5] dann, wenn abgesaugtes Wasser zu einer wirkungsvollen Senkung des w/z -Wertes und damit zu einer Verdichtung des Gefüges führt. Dagegen ergeben sich Festigkeitsminderungen, wenn in der Fuge infolge eines zu hohen Wasserentzugs die für eine vollständige Hydratation erforderliche Wassermenge nicht mehr zur Verfügung steht.

Diese Veränderung der Eigenschaften des Mörtels in Kontakt zum Mauerstein beeinflusst die Festigkeitseigenschaften von Mauerwerk. Insofern können Eigenschaftswerte, die an beeinflusstem Mörtel ermittelt werden, für weiterführende Analysen und Abschätzungen verwendet werden. Die Fugendruckfestigkeit könnte beispielsweise bei neuen Ansätzen für die rechnerische Bestimmung der Mauerwerkdruckfestigkeit berücksichtigt werden.

Die Bestimmung der Fugendruckfestigkeit erfolgt nach DIN 18555-9 [21].

Tabelle 5. Mauermörtel; Regressionsgleichungen zur Bestimmung der Zugfestigkeit und des Längsdehnungsmoduls sowie Wertebereiche für die Trockenrohdichte, die Druckfestigkeit und den Querdehnungsmodul (nach [1])

Mörtelart	Zuschlag	β_z	β_D	ρ_d	E_q	E_l	n
		N/mm ²		kg/dm ³	N/mm ²		
Normalmauermörtel	–	$0,11 \cdot \beta_D$ (0,91)	–	–	–	–	33
		–	1,5 ... 24	1,1 ... 1,9	1,2 ... 116	–	49
		–	–	–	–	$2100 \cdot \beta_D^{0,7}$	–
Dünnbettmörtel	–	–	14 ... 21	1,4 ... 1,6	36 ... 49	–	5
Leichtmauermörtel LM 21	Polystyrol, Perlite, Naturbims	–	8,4 ... 11,6	0,6 ... 0,8	6,7 ... 15	–	23
	Perlite	–	–	–	–	$1200 \cdot \beta_D^{0,4}$	–
Leichtmauermörtel LM 36	Blähton, Naturbims, Blähschiefer	–	4,0 ... 21	0,8 ... 1,2	16 ... 48	–	36
	Blähton	–	–	–	–	$1200 \cdot \beta_D^{0,6}$	–

β_z Zugfestigkeit in N/mm²

β_D Druckfestigkeit in N/mm²

E_q Längsdehnungsmodul in N/mm²

E_l Querdehnungsmodul in N/mm²

ρ_d Trockenrohdichte in kg/dm³

n Anzahl der Versuchswerte

Wert in Klammern: Bestimmtheitsmaß der gewählten Regression

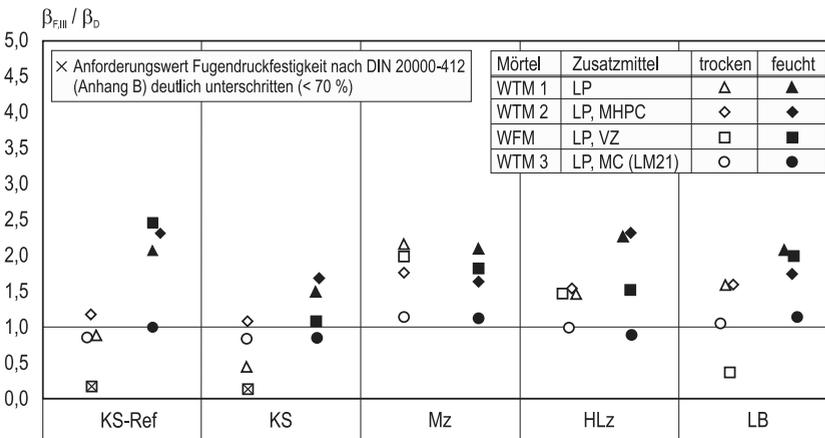


Bild 2. Fugendruckfestigkeit $\beta_{F,III}$ bezogen auf die Prismen-Druckfestigkeit β_D ; Prüfalalter: 28 Tage (Werte aus [6])

In Bild 2 ist die auf die Prismen-Druckfestigkeit β_D bezogene Fugendruckfestigkeit $\beta_{F,III}$ verschiedener Mauerstein-Mauermörtel-Kombinationen dargestellt (Werte aus [6]). Die Mauersteine wurden in unterschiedlichen Feuchtezuständen vermauert: trocken, d. h. mit Ausgleichfeuchte bei Lagerung in 20/65, sowie feucht, d. h. mit einem Feuchtegehalt von rd. 10 M.-%. Als Mauermörtel wurden Werk trocken- (WTM) und Werkfrischmörtel (WFM) mit folgenden Zusatzmitteln verwendet: Luftporenbildner (LP), Verzögerer (VZ), Methylcellulose (MC) und Methylhydroxypropylcellulose (MHPC).

Vor allem bei trocken vermauerten Kalksandsteinen können sich je nach Feuchtezustand bezogene Druckfestigkeiten in der Fuge $\leq 1,0$ ergeben. Hingegen kann

die Saugcharakteristik bei Mauerziegeln (relativ hohe Wasseraufnahme in kurzem Zeitraum) zu einer Festigkeitssteigerung führen, unabhängig vom Feuchtezustand der Mauersteine, vgl. [6]. Bei Verwendung von Werkfrischmörtel mit einem geringen Wasserrückhaltevermögen können sich Festigkeitseinbußen in Kombination mit KS-Ref, KS und LB (jeweils trocken vermauert) ergeben. Die Rechenfestigkeit kann folglich auf der unsicheren Seite liegen. Um bei der Entwicklung neuer Mörtelrezepturen kritische Fälle identifizieren zu können, müssen diese Mauermörtel die Mindestanforderungswerte an die Fugendruckfestigkeit nach DIN 20000-412 [22] erfüllen.

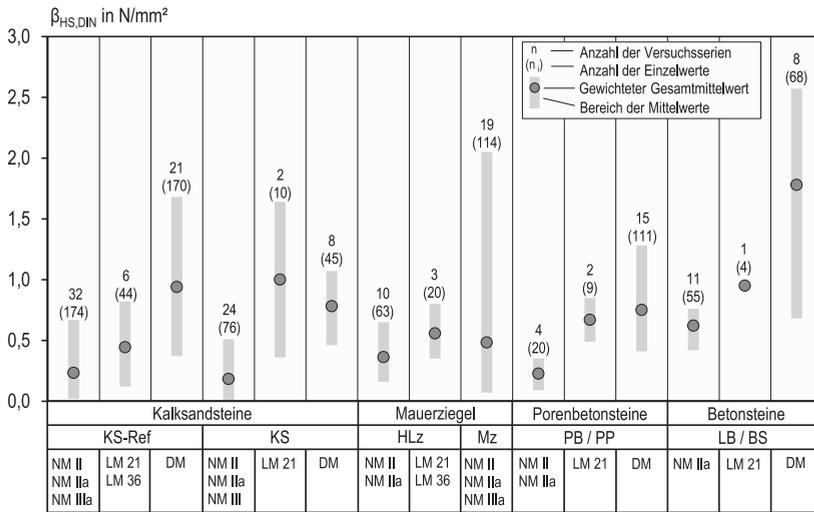


Bild 3. Bandbreite der Haftscherfestigkeitswerte nach dem DIN-Verfahren (Werte aus [7])

5 Verbund zwischen Mauerstein und Mauermörtel

5.1 Allgemeines

In Mauerwerkbauteilen, die durch horizontale Lasten auf Schub oder Biegezug oder auch infolge Zwangsspannungen auf Zug beansprucht werden, müssen Zug- und Schub- bzw. Scherkräfte in den Verbundfugen zwischen den einzelnen Mauersteinen übertragen werden. Der Verbund zwischen Mauerstein und Mauermörtel beeinflusst daher maßgeblich die Tragfähigkeit und Rissicherheit von Mauerwerk.

Die Verbundfestigkeit dient zur quantitativen Erfassung der Haftung zwischen Mauerstein und Mauermörtel. Diese wird differenziert nach Haftscherfestigkeit und Haftzugfestigkeit. Während die Haftzugfestigkeit bei der Bemessung von biegezug-/schubbeanspruchten Mauerwerkbauteilen nach [17] nicht in Rechnung gestellt wird, ist die Haftscherfestigkeit eine bemessungsrelevante Baustoffkenngröße.

5.2 Haftscherfestigkeit

Durch die Haftscherfestigkeit werden die Scherkräfte erfasst, die entlang der Grenzfläche Mauerstein/Mauermörtel aufgenommen werden können. Bei gleichzeitiger Wirkung einer Auflast/Normalkraft zur Grenzfläche erhöht sich die Scherfestigkeit um den auflastabhängigen Reibungsanteil.

Die Haftscherfestigkeit kann entweder nach DIN 18555-5 [23] oder DIN EN 1052-3 [24] geprüft werden. Vergleichsuntersuchungen zwischen diesen beiden Prüfverfahren haben gezeigt, dass die Prüfwerte der Haftscherfestigkeit nach dem EN-Verfahren je nach Prüfkörpergeometrie und weiteren Randbedin-

gungen etwa halb so groß wie die nach dem DIN-Verfahren sein können, vgl. [7]. Der Prüffaktor resultiert aus einer unterschiedlichen Normal- und Schubspannungsverteilung in den Fugen, wie nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen gezeigt haben, s. [7]. Bedingt durch die Prüfkörpergeometrie kann beim EN-Versuch im Bruchzustand eine ungleichmäßige Spannungsverteilung resultieren, während die Spannungsverteilung beim DIN-Versuch dagegen deutlich gleichmäßiger ist.

In den Bildern 3 und 4 sind Haftscherfestigkeitswerte nach dem DIN-Verfahren und dem EN-Verfahren nach [7] dargestellt. Die große Bandbreite der Werte resultiert nach [7] aus z. T. sehr unterschiedlichen Prüfrandbedingungen (Prüfalter, Lagerungsklima etc.). Vor allem der Feuchtegehalt der Mauersteine beim Vermauern kann aufgrund des dadurch beeinflussten Wasserabsaugens durch die Mauersteine und die dadurch veränderten Eigenschaften des Mauermörtels zu sehr unterschiedlichen Haftscherfestigkeitswerten führen, vgl. Abschnitt 4.

Auf Basis dieser Werte wurden die in Tabelle 6 angegebenen, nach Stein und Mörtel differenzierten Anhaltswerte abgeleitet, s. [7]. Bei der Ableitung dieser Werte wurden lediglich diejenigen Mauerstein-Mauermörtel-Kombinationen berücksichtigt, für die mindestens 10 Serien vorlagen. Diese Anhaltswerte beziehen sich auf die Prüfung nach dem DIN-Verfahren. Dabei wurden die Versuchsergebnisse, die nach dem EN-Verfahren ermittelt wurden, mit dem Faktor 2 multipliziert, um jeweils auf den Wert nach dem DIN-Verfahren schließen zu können.

Die nach [17] anzusetzenden Haftscherfestigkeitswerte sind derzeit in Abhängigkeit der Mauermörtelart, jedoch nicht differenziert nach der Mauersteinart, angegeben, s. ebenfalls Tabelle 6. Die Werte basieren auf

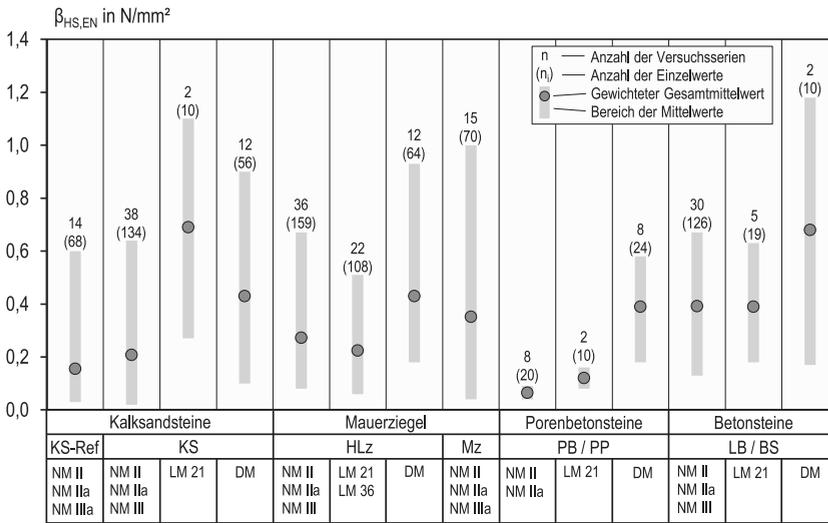


Bild 4. Bandbreite der Haftscherfestigkeitswerte nach dem EN-Verfahren (Werte aus [7])

Tabelle 6. Stein/Mörtel; Anhaltswerte für die Haftscherfestigkeit nach [7] und anzusetzende Haftscherfestigkeitswerte (charakteristische Werte) nach [17], differenziert nach Mauersteinart/-sorte bzw. Mörtelgruppe bzw. -klasse

Stein/Mörtel	Haftscherfestigkeit β_{HS} nach [7]				Charakteristische Haftscherfestigkeit f_{vk0} nach [17]			
	NM IIa	NM III	LM 36	DM	NM IIa	NM III	LM 36	DM
Mauermörtel	M 5	M 10	M 5	M 10	M 5	M 10	M 5	M 10
Mauerstein	N/mm²				N/mm²			
KS-Ref	0,20	–	–	–	0,18	0,22	0,18	0,22
KS (ohne KS-Ref)	0,25	0,30	–	0,85	–			
HLz	0,45	–	0,50	–	–			
Mz	0,35	–	–	–	–			
PP	–	–	–	0,75	–			
Vbl, Hbl, Hbn	0,55	–	–	1,70	–			

der Haftscherfestigkeitsprüfung nach dem DIN-Verfahren mit dem als ungünstig angesehenen Kalksand-Referenzstein. Nähere Erläuterungen zu diesen Werten können [8] entnommen werden.

Ein Vergleich der anzusetzenden Haftscherfestigkeitswerte mit den nach Mauerstein bzw. Mauermörtel differenzierten Anhaltswerten zeigt, dass teilweise deutlich höhere Haftscherfestigkeitswerte angesetzt werden könnten.

Bei der Biegezugbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen wird zur Berechnung der Biegezugfestigkeit bei Fugensversagen ersatzweise die Haftscherfestigkeit angesetzt (s. Abschnitt 6.2.4). Zutreffender wäre stattdessen, die Torsionsscherfestigkeit zugrunde zu legen. In [7] und [9] wird darauf speziell eingegangen.

5.3 Haftzug- und Biegehaftzugfestigkeit

Die Kenngröße Haftzugfestigkeit impliziert die Annahme einer zentrischen Zugbeanspruchung, die senkrecht zur Grenzfläche zwischen Mauerstein und Mauermörtel angreift. Das Vorhandensein eines Biegemoments, das nur in einem Teilbereich (Zugzone) eine Zugspannung hervorruft, erfordert die Definition einer weiteren Kenngröße, genannt Biegehaftzugfestigkeit. Diese Kennwerte sind u. a. für die Biegezugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen von Relevanz.

Eine Norm bzw. Richtlinie für die Prüfung der zentrischen Haftzugfestigkeit existiert nicht. Die Prüfung der Biegehaftzugfestigkeit mit dem Bondwrench-Verfahren ist in DIN EN 1052-5 [25] geregelt. In Tabelle 7 sind Versuchsdaten aus [1] zusammengefasst.

Tabelle 7. Stein/Mörtel; Haftzugfestigkeit; Prüfvorfalder im Allgemeinen mind. 14 Tage (aus [1])

Mauerstein		Mauermörtel	Prüfvorfalder ²⁾	Haftzugfestigkeit β_{HZ}			
Art, Sorte	Feuchtezustand ¹⁾			\bar{x}	min x	max x	n (n_i)
				N/mm ²			–
HLZ	l	NM IIa	Z	0,48	3)	3)	16
	l, f	NM IIa	BW	0,44	0,23	0,58	5
	l	LM 21	BW	0,07	3)	3)	2
	f	LM 21	BW	0,17	3)	3)	2
	l	DM	BW	0,19	0,10	0,32	3 (15)
KS	l	NM IIa	BW	0,14	3)	3)	2
	f	NM IIa	BW	0,42	3)	3)	1
	l, f	DM	BW	0,61	0,43	3)	20
	l	DM	Z	0,42	0,24	0,82	6 (30)
KS-PE	l	DM	Z	0,67	0,49	0,82	5
	l	DM	Z	0,29 ⁴⁾	0,26 ⁴⁾	0,36 ⁴⁾	5 ⁴⁾
PP	l, f	DM	Z	0,37	0,25	0,50	14

- 1) l, f: lufttrocken, feucht
- 2) Z: zentrisch; BW: Bondwrench
- 3) Keine Angabe von Einzelwerten
- 4) Prüfvorfalder unter 14 Tage

\bar{x} , min x, max x Mittelwert, Kleinstwert, Größtewert in N/mm²
n Anzahl der Versuchsserien
(n_i) Anzahl der Einzelwerte

6 Mauerwerk

6.1 Allgemeines

Die Eigenschaftswerte von Mauerwerk können aufgrund seiner ausgeprägten Anisotropie und Heterogenität in Abhängigkeit der zahlreichen in der Praxis vorkommenden Mauerstein-Mauermörtel-Kombinationen sehr unterschiedlich sein und weichen zudem teilweise deutlich von denen anderer Baustoffe ab. Mauerwerk ist 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. Die nachfolgenden Abschnitte enthalten eine Übersicht über die für die unterschiedlichen Beanspruchungen maßgebenden Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Mauerwerk.

6.2 Festigkeitseigenschaften

6.2.1 Druckfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen

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

Die Prüfung der Mauerwerkdruckfestigkeit ist in DIN EN 1052-1 [26] geregelt.

Zur Ermittlung eines charakteristischen Wertes f_k der Mauerwerkdruckfestigkeit, bezogen auf eine Schlankheit $\lambda = 5$, kann folgende Gl. (1) nach [17] angewendet werden:

$$f_k = K \cdot f_{st}^\alpha \cdot f_m^\beta \tag{1}$$

mit

f_k charakteristische Druckfestigkeit von Mauerwerk in N/mm²

K, α , β Faktor und Exponenten, ermittelt über Regressionen ($\beta = 0$ für LM und DM)

f_{st} umgerechnete mittlere Mindeststeindruckfestigkeit in N/mm²

f_m die der Mörtelklasse zugeordnete Festigkeit des Mauermörtels in N/mm²

Werte für die Parameter K, α und β sind [17] zu entnehmen. Diese wurden für die gebräuchlichsten Mauerstein-Mauermörtel-Kombinationen aus zahlreichen Versuchsergebnissen von Mauerwerkdruckversuchen abgeleitet. Die umgerechnete mittlere Mindeststeindruckfestigkeit f_{st} ergibt sich aus der Druckfestigkeitsklasse multipliziert mit dem Faktor 1,25. Bei der Mauermörtelfestigkeit f_m sind [17] und DIN 20000-412 [22] zu beachten.

Die Druckfestigkeit von Mauerwerk hängt nicht nur von den Festigkeitseigenschaften seiner Ausgangsstoffe ab, sondern von einer Vielzahl weiterer Parameter. In [3] wird auf zwei wesentliche Parameter näher eingegangen: Die horizontalen Verformungsunterschiede von Mauerstein und Mauermörtel unter vertikaler Druckbeanspruchung sowie die hygrische Wechselwirkung zwischen dem Wasserabsaugverhalten des Mauersteins und dem Wasserrückhaltevermögen des Mörtels.

Bild 5 zeigt beispielhaft anhand der Auswertung von Druckversuchen an Mauerwerk aus Kalksand-Vollsteinen und Kalksand-Blocksteinen in Kombination

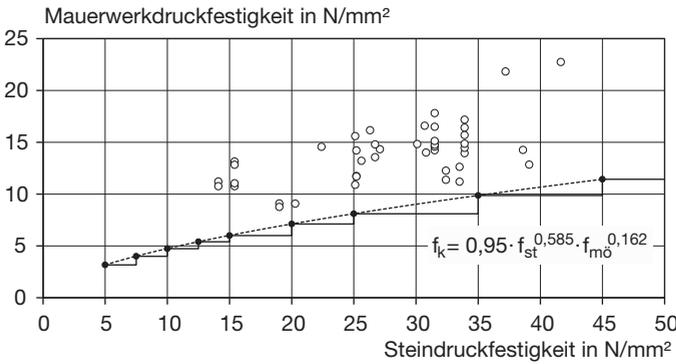


Bild 5. Druckfestigkeit von Mauerwerk aus Kalksand-Vollsteinen und Kalksand-Blocksteinen mit Normalmauermörtel der Mörtelklasse M5 in Abhängigkeit von der Steindruckfestigkeit

mit Normalmauermörtel der Mörtelklasse M5, wie unterschiedlich hoch die Druckfestigkeit von Mauerwerk im Versuch bei annähernd gleichen Steindruckfestigkeitswerten ausfallen kann. Dargestellt sind zum einen die auf eine Schlankheit der Mauerwerkswände $\lambda = 5$ umgerechneten Versuchswerte der Mauerwerkdruckfestigkeit $\beta_{D,mw}$ in Abhängigkeit der geprüften Steindruckfestigkeit $\beta_{D,st}$ einschließlich Formfaktor. Zusätzlich enthält das Diagramm die gemäß [17] ansetzbaren f_k -Werte in Abhängigkeit der aus der jeweiligen Steifigkeitsklasse umgerechneten mittleren Mindeststeindruckfestigkeit f_{st} . Diese Gegenüberstellung von reinen Versuchsdaten und normativ geregelten, charakteristischen Festigkeitswerten verdeutlicht, dass es sich bei der Ableitung der Mauerwerkdruckfestigkeit aus den einaxialen Druckfestigkeitswerten der Einzelkomponenten Mauerstein und Mauermörtel in den meisten Fällen nur um eine sehr grobe Näherungslösung handeln kann. Die Mauerwerkdruckfestigkeit einiger Mauerstein-Mauermörtel-Kombinationen kann deutlich über den gemäß der europäischen Norm ansetzbaren Druckfestigkeitswerten liegen.

6.2.2 Druckfestigkeit parallel zu den Lagerfugen

Für die Bemessung der Druckzone biegebeanspruchter Bauteile wird die Längsdruckfestigkeit des Mauerwerks benötigt.

Diese kann in Anlehnung an DIN EN 1052-1 [26] geprüft werden. Gegenüber der Druckbeanspruchung senkrecht zu den Lagerfugen wurde die Druckbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen jedoch bislang wenig experimentell untersucht.

Die rechnerische Bestimmung der Mauerwerkdruckfestigkeit parallel zu den Lagerfugen erfolgt nach [17] mit derselben Gleichung und denselben Gleichungsparametern, die für die Bestimmung der Druckfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen ermittelt wurden. Statt der Steindruckfestigkeit in Richtung Steinhöhe wird diejenige in Richtung Steinlänge angesetzt. Zudem wird der jeweilige K-Faktor mit 0,5 abgemindert. Diese Vorgehensweise berücksichtigt nicht das reale Tragverhalten von Mauerwerk unter einer Druckbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen. Bei Mauerwerk mit

unvermörtelten Stoßfugen müssen die im Stoßfugenbereich wirkenden Druckkräfte durch die Lagerfugen übertragen werden. Die maximal erreichbare Längsdruckfestigkeit von Mauerwerk wird deshalb maßgeblich durch die Haftscherfestigkeit zwischen Mauerstein und Mauermörtel begrenzt. Bei Mauerwerk mit vermörtelten Stoßfugen spielt neben der Längsdruckfestigkeit der Mauersteine auch die Druckfestigkeit des Mauermörtels in der Stoßfuge eine wesentliche Rolle. Um zutreffende Mindestdruckfestigkeitswerte von Mauerwerk parallel zu den Lagerfugen zu definieren und eine vereinfachte und auf der sicheren Seite liegende Bemessung zu ermöglichen, werden in [10] Grenzfälle – in Abhängigkeit der Versagens- und Stoßfugenausbildungsart des Mauerwerks – betrachtet und fallweise Berechnungsgleichungen definiert.

6.2.3 Zugfestigkeit

Die zentrische einachsige Zugfestigkeit ist eine wesentliche Kenngröße zur Beurteilung der Rissicherheit bei Bauteilen ohne wesentliche Auflast – wie Verblendschalen, Ausfachungsmauerwerk, nichttragende innere Trennwände – aber auch von Außen- und Innenwänden, die beispielsweise unterschiedlichen Formänderungen unterliegen. Dabei sind zwei Belastungsrichtungen (parallel und senkrecht zu den Lagerfugen) sowie zwei Versagensarten (Stein- und Fugerversagen) zu betrachten.

Die Mauerwerkzugfestigkeit kann sowohl experimentell als auch rechnerisch ermittelt werden. Die Prüfung der Zugfestigkeit von Mauerwerk ist nicht normativ geregelt.

In Tabelle 8 sind Werte für die Zugfestigkeit parallel zur Lagerfuge aus [1] bzw. [11] angegeben. Untersuchungen zur Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zu den Lagerfugen wurden bislang nur sehr wenige durchgeführt, sodass keine abgesicherten Werte genannt werden können.

Bei der Herleitung von Berechnungsansätzen zur Bestimmung der Zugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen in [12] wurde davon ausgegangen, dass in den vertikalen Stoßfugen, auch wenn sie vermörtelt sind, keine Zugspannungen übertragen werden können. Der

Tabelle 8. Mauerwerk; Zugfestigkeit bei einer Zugbeanspruchung parallel zu den Lagerfugen (aus [1] bzw. [11])

Mauerstein			Mauermörtel		SF	Zugfestigkeit f_t	
Art, Sorte	Format	Festigkeitsklasse	Art	Gruppe		N/mm ²	n
Mz	NF	28	NM	Ila	vm	0,45	1
KMz	NF	60	NM	IIla	vm	0,51	4
HLz	2DF	12	NM	II... III	vm	0,12 ... 0,21	8
HLz	2DF	60	NM	III	vm	0,82	3
KS	2DF, 5DF	12, 20	NM	Ila	um	0,24; 0,14	2
KS	2DF	12 ... 36	NM	II... III	vm	0,10 ... 0,41	22
KS L	2DF	12	NM	II, III	vm	0,07 ... 0,09	6
KS	2DF	20	DM		vm	0,65	2
PB	2DF	2	NM	II	vm	0,09	3
PB	2DF	6	NM	III	vm	0,11	2
PP	2DF, 16DF	2	DM		um	0,04 ... 0,14	4
PP	2DF	2	DM		vm	0,16	1
Vbl	10DF	2	LM21	Ila	um	0,03	1
V, Vbl	2DF, 8DF	2	NM	II, IIa	vm	0,16 ... 0,26	6
V	2DF	12	NM	III	vm	0,58	3
V	2DF	2	DM		um	0,21	1
V	2DF	2	DM		vm	0,25	1
Hbl	10DF	2	LM36	Ila	vm	0,17	1
Hbl	10DF	2	NM	Ila	vm	0,13	1

SF: Stoßfugen; vm: vermörtelt; um: unvermörtelt; n: Anzahl der Einzelwerte

Grund hierfür ist, dass die Stoßfugen nicht überdrückt sind und die Haftzugfestigkeit zwischen Mauerstein und Mauermörtel i. d. R. aufgrund des Mörtelschwindens und einer oftmals mangelhaften Ausführung vernachlässigbar klein ist.

Für den Fall Steinversagen bedeutet dies, dass die im Bereich einer Steinlage und Mörtelfuge auftretenden Zugspannungen parallel zu den Lagerfugen nur durch einen halben Mauerstein und die Mörtelfuge übertragen werden können. Da die Dicke der Mörtelfuge i. d. R. deutlich geringer ist als die Mauersteinhöhe, ist die Mauerwerkzugfestigkeit in diesem Fall näherungsweise halb so groß wie die Steinzugfestigkeit, vgl. Gl. (2). Wesentliche Einflussgröße auf die Mauerwerkzugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen bei Steinversagen ist daher die Steinzugfestigkeit in Richtung Steinlänge.

$$f_t \approx f_{t,u}/2 \tag{2}$$

mit

f_t Mauerwerkzugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen bei Steinversagen

$f_{t,u}$ Zugfestigkeit des Steins in Längsrichtung

Bei Fugenversagen müssen die im Bereich einer Steinlage und Mörtelfuge auftretenden Zugspannungen parallel zu den Lagerfugen über Schubspannungen in der Lagerfuge auf der Überbindelänge (l_{ol}) in die jeweilige nächste Steinlage übertragen werden. Die übertragbare Zugkraft in den Stoßfugen kann vernachlässigt werden, da die Haftzugfestigkeit zwischen Mauerstein und Mauermörtel i. d. R. gering ist (s. o.). Die

Mauerwerkzugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen ist in diesem Fall erreicht, wenn die in der Lagerfuge auftretenden Schubspannungen die Scherfestigkeit überschreiten. Die wesentlichen Einflussgrößen auf die Mauerwerkzugfestigkeit bei diesem Belastungs- und Versagensfall sind daher die auf die Mauersteinhöhe bezogene Überbindelänge und die Scherfestigkeit, die sich aus der Haftscherfestigkeit und ggf. dem auflastabhängigen Reibungsanteil zwischen Mauerstein und Mauermörtel zusammensetzt, siehe Gleichungen (3a) bzw. (3b).

$$f_t \approx f_{v0} \cdot l_{ol}/h_u \quad (\text{ohne Auflast}) \tag{3a}$$

bzw.

$$f_t \approx (f_{v0} + \mu \cdot \sigma_d) \cdot l_{ol}/h_u \quad (\text{mit Auflast}) \tag{3b}$$

mit

f_t Mauerwerkzugfestigkeit parallel zu den Lagerfugen bei Fugenversagen

f_{v0} Haftscherfestigkeit

l_{ol} Überbindelänge

h_u Steinhöhe

μ Reibungsbeiwert

σ_d Druckspannung senkrecht zur Lagerfuge

Bei einer Beanspruchung senkrecht zu den Lagerfugen kann die Mauerwerkzugfestigkeit näherungsweise gleich der Steinzugfestigkeit in Richtung Steinhöhe für den Fall Steinversagen oder gleich der Haftzugfestigkeit zwischen Mauerstein und Lagerfugenmörtel für den Fall Fugenversagen angesetzt werden.