

Herausgegeben von Ralf Ruhnau
Begründet von Günter Zimmermann

Christian Dialer

Risschäden an Mauerwerks- konstruktionen

Fraunhofer IRB  Verlag

Christian Dialer

Rissschäden an Mauerwerkskonstruktionen

Schadenfreies Bauen

Herausgegeben von Dr.-Ing. Ralf Ruhnau

Begründet von Professor Günter Zimmermann

Band 7

Risschäden an Mauerwerkskonstruktionen

Von

Dr.-Ing. Christian Dialer

Fraunhofer IRB Verlag

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im
Internet über www.dnb.de abrufbar.

ISSN: 2367-2048
ISBN (Print): 978-3-8167-9458-5
ISBN (E-Book): 978-3-8167-9459-2

Redaktion: Manuela Wallißen
Herstellung: Gabriele Wicker
Layout, Umschlaggestaltung: Martin Kjer
Satz: Manuela Gantner – Punkt, STRICH.
Druck: Offizin Scheufele Druck und Medien GmbH & Co. KG, Stuttgart

Die hier zitierten Normen sind mit Erlaubnis des DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
wiedergegeben. Maßgebend für das Anwenden einer Norm ist deren Fassung mit dem neuesten
Ausgabedatum, die bei der Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, erhältlich ist.

Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die
über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung
des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen,
Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.
Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu
der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetz-
gebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.
Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI,
VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit,
Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbei-
ten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Anschrift des Autors:
Dr.-Ing. Christian Dialer
Emmeringer Straße 40
82275 Emmering

© by Fraunhofer IRB Verlag, 2016
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon +49 7 11 970-25 00
Telefax +49 7 11 970-25 08
irb@irb.fraunhofer.de
www.baufachinformation.de

Fachbuchreihe Schadenfreies Bauen

Bücher über Bauschäden erfordern anders als klassische Baufachbücher eine spezielle Darstellung der Konstruktionen unter dem Gesichtspunkt der Bauschäden und ihrer Vermeidung. Solche Darstellungen sind für den Planer wichtige Hinweise, etwa vergleichbar mit Verkehrsschildern, die den Autofahrer vor Gefahrstellen im Straßenverkehr warnen.

Die Fachbuchreihe **SCHADENFREIES BAUEN** stellt in vielen Einzelbänden zu bestimmten Bauteilen oder Problemstellungen das gesamte Gebiet der Bauschäden dar. Erfahrene Bausachverständige beschreiben den Stand der Technik zum jeweiligen Thema, zeigen anhand von Schadensfällen typische Fehler auf, die bei der Planung und Ausführung auftreten können, und geben abschließend Hinweise zu deren Sanierung und Vermeidung.

Für die tägliche Arbeit bietet darüber hinaus die Volltextdatenbank **SCHADIS** die Möglichkeit, die gesamte Fachbuchreihe online als elektronische Bibliothek zu nutzen. Die Suchfunktionen der Datenbank ermöglichen den raschen Zugriff auf relevante Buchkapitel und Abbildungen zu jeder Fragestellung (www.irb.fraunhofer.de/schadis).

Der Herausgeber der Reihe:

Dr.-Ing. Ralf Ruhnau ist ö. b. u. v. Sachverständiger für Betontechnologie, insbesondere für Feuchteschäden und Korrosionsschutz. Als Partner der Ingenieurgemeinschaft CRP GmbH Berlin und in Fachvorträgen befasst er sich neben der Bauphysik und der Fassadenplanung vor allem mit Bausubstanzbeurteilungen. Er war mehrere Jahre als Mitherausgeber der Reihe aktiv und betreut sie seit 2008 alleinverantwortlich.

Der Begründer der Reihe:

Professor Günter Zimmermann war von 1968 bis 1997 ö. b. u. v. Sachverständiger für Baumängel und Bauschäden im Hochbau. Er zeichnete 33 Jahre für die **BAUSCHÄDEN-SAMMLUNG** im Deutschen Architektenblatt verantwortlich. 1992 rief er mit dem Fraunhofer IRB Verlag die Reihe **SCHADENFREIES BAUEN** ins Leben, die er anschließend mehr als 15 Jahre als Herausgeber betreute. Er ist der Fachwelt durch seine Gutachten, Vortrags- und Seminartätigkeiten und durch viele Veröffentlichungen bekannt.

Vorwort des Herausgebers

Rissschäden an Mauerwerkskonstruktionen zählen ohne Zweifel zu den häufigsten Schadensbildern, die unsere Bauwerke aufweisen. Risse zeigen uns die Abweichungen zwischen Theorie und Praxis im Bauwesen in schonungsloser Weise auf – oftmals als »hinnehmbare« optische Beeinträchtigungen und mitunter als dramatische Warnung vor dem Versagen von Tragwerken. Wie schon Prof. Pfefferkorn sinngemäß im vorherigen Band 7 mit dem Titel Rissschäden an Mauerwerk anmerkte, ermöglichen es Risse, das Verhalten gemauerter Bauwerke in der Praxis zu studieren und die Verträglichkeit von Planung und Wirklichkeit zu kontrollieren.

Der jetzt neu vorgelegte Band 7 der Fachbuchreihe Schadenfreies Bauen von Herrn Dr. Christian Dialer, Rissschäden an Mauerwerkskonstruktionen, spannt den eindrucksvoll bebilderten Bogen vom rissgeschädigten Natursteinmauerwerk früherer Jahrhunderte bis zu den Grenzbereichen der mit Mauerwerk noch gestaltbaren Leichtbaukonstruktionen unserer Tage. Dieses Buch soll helfen, nicht nur Sachverständigen mit pathologischem Ansatz Schadensmechanismen aufzuzeigen, sondern vor allem bei Planern und Bauschaffenden den Blick für das »tatsächliche« Tragverhalten von Konstruktionen und das Verformungsverhalten von Bauwerken näherzubringen und so der Rissentstehung vorzubeugen.

In diesem Sinne danke ich Herrn Dr. Dialer für die Mühe und die Zeit, die er in dieses Werk investiert hat. Dem Autor und seinem Buch wünsche ich viele Leser, den Lesern viele neuen Erkenntnisse über technisch richtiges Bauen.

Berlin, im April 2016

Ralf Ruhnau

Vorwort des Autors

*»There's a crack in ev'rything,
that's where the light gets in.«
(Mr. Morgan's Last Love)*

Das vorliegende Fachbuch erscheint nunmehr unter neuem Verfasser völlig neu bearbeitet.

Es ist Herrn Prof. Pfefferkorns Verdienst, ein über Jahre entwickeltes Standardwerk zu Mauerwerksrissen geschaffen und über mehrere Auflagen zusammen mit Herrn Klaas betreut zu haben.

Dem Verfasser ist es ein Anliegen, diese Tradition mit praxisnahen Beispielen fortzuführen und dabei ebenso aktuelle Bauweisen wie neue Betrachtungsweisen zum Mauerwerksbau einfließen zu lassen und dadurch ein vollkommen überarbeitetes Standardwerk vorlegen zu können.

Danken will ich Herrn Dipl.-Ing. Thomas Altmann und Frau Dipl.-Wirtsch.-Ing. (FH) Manuela Walliöser vom Fraunhofer IRB Verlag für das kritische Lektorat und die organisatorischen Bemühungen. Herrn Dr.-Ing. Ralf Ruhnau als Herausgeber danke ich für seine kritischen Hinweise und dafür, dass er stets Verständnis hatte, wenn es terminliche Verschiebungen gab. Herrn Dr.-Ing. Peter Schubert ist für den ersten Kontakt und die Initiative zum Verfassen des vorliegenden Buches zu danken, wie ihm auch generell zu danken ist, da er der Fachwelt seit Jahrzehnten entscheidende Impulse für das Verständnis von Mauerwerk gibt.

Mein Dank gilt auch meinem ehemaligem Doktorvater, Herrn Prof. Kupfer (†), ehemaliger Ordinarius am Lehrstuhl für Massivbau der TU München, der es mir vor über 30 Jahren ermöglichte, an seinem Institut meine ersten »Geh- und Bruchversuche« mit Mauerwerk durchzuführen. Eine Verbindung, die auch durch Herrn Dr. Stöckl vertieft und durch eine Vielzahl interessanter Ideen und Gespräche mit den kreativen Ansätzen von Herrn Prof. Mann (†), ehemals TU Darmstadt, abgerundet wurde.

Danken möchte ich auch meinem geschätzten Mitarbeiter, Herrn Dipl.-Ing. Oliver Fiegert, ohne dessen loyale Mitarbeit, Fachkenntnis und Engagement dieses Buch nicht hätte fertiggestellt werden können.

Schließlich danke ich meiner Familie, meinen Freunden und meinen Kollegen, die alle mit viel Ruhe und Verständnis das familiär-emotionale, das freundschaftliche, aber auch das kollegial-berufliche Umfeld geschaffen haben, das es mir ermöglichte, dieses Buch letztlich über einen Zeitraum von sieben Jahren zu verfassen.

Anregungen, Ergänzungen und kritische Hinweise nehme ich unter dialer@dialer.de gerne auf.

München, im April 2016

Christian Dialer

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	17
1.1	Panta rhegnytai – alles reißt	17
1.2	Bauen ist ein Kampf wogegen?	17
1.3	Zielsetzung und Aufbau des Buches	18
2	Kurzer historischer Rückblick	19
2.1	Mauerwerk als ältester Werkstoff	19
2.2	Mauerwerk als »historisierender« Schaden	26
3	Grundelemente des Mauerwerksbaus	29
3.1	Allgemeines	29
3.2	Grunddefinition »Mauerwerk«	29
3.3	Werkstoffmatrix	30
3.4	Werkstoffeigenschaften	32
3.4.1	Generelles	32
3.4.2	Steinfestigkeiten	33
3.4.3	Steinformate	33
3.4.4	Verformungseigenschaften	35
3.4.5	Druckfestigkeit des Mörtels	37
3.4.6	Druckfestigkeit des Mauerwerks	38
3.4.7	Zugfestigkeit des Mauerwerks	40
3.4.8	Spannungsverteilung in einem Prisma nach Hilsdorf	40
3.4.9	Zweiachsiges Festigkeit von Mauerwerk – die Schubfestigkeit	41
3.5	Konsequenzen und Schlussfolgerungen aufgrund der Werkstoffeigenschaften	45
3.5.1	Mauerwerk ist kein zugfester Werkstoff	45
3.5.2	Mauerwerk benötigt Aussteifung	48
3.5.3	Scheibenabschluss durch Ringanker/Ringbalken	48
3.5.4	Numerische Modellierung	49
3.5.5	Besonderheiten des Werkstoffs »Mauerwerk«	53

4	Der Mangelbegriff	59
4.1	Einleitung	59
4.2	Was ist ein Mangel? Mögliche Definitionen	59
4.3	Was ist eine allgemein anerkannte Regel der Technik?	60
4.4	Wie grenzt man den Begriff des Schadens von dem des Mangels ab?	61
4.5	Der Mangelbegriff nach BGB	62
4.6	Allgemeines zur Mängelunterscheidung	64
4.7	Optischer Mangel	67
4.8	Zum Thema »Verhältnismäßigkeit«	68
4.9	Unterschied zwischen »Verantwortung« und »Verursachung«	68
4.10	Zum Begriff der »Sowiesokosten«	69
4.11	Zum Begriff »Neu für Alt«	69
4.12	Bestandsschutz	69
5	Voruntersuchung	71
5.1	Grundsatz	71
5.2	Einschränkende Parameter für die Diagnose	71
5.3	Erfassbare Kennwerte	73
5.4	Übersicht über die Methoden der Rissaufnahme	75
5.4.1	Nomenklatur	75
5.4.2	Arten der Rissaufnahme	75
5.4.3	Meterstab	76
5.4.4	Rissmaßstab	76
5.4.5	Risslupe	78
5.4.6	Digitale Stereolupe	80
5.4.7	Bohrkern	81
5.4.8	Gipsmarken	84
5.4.9	Setzdehnungsmesser	85
5.4.10	Rissmonitoring (mechanisch und elektronisch)	89
5.4.11	Rissaufnahme mittels Gerüst oder Befahrung	92
5.4.12	Optisch-fotografische Untersuchung	95
5.4.13	Bauteilöffnung	96

5.4.14	Thermografie	103
5.4.15	Endoskopie	106
5.4.16	Stimmgabel	107
5.4.17	Sonstige Geräte	108
6	Rheumatologie: Riss-Typisierung – die Lehre von den Rissen	109
6.1	Begriffliches	109
6.2	Rissdefinition – Begriffe	114
6.3	Rissgeometrien	115
6.4	Rissverlauf	116
6.5	Risserscheinungen an der Oberfläche	117
6.6	Rissalter	117
6.7	Zur Behandlung von Rissen in Normen oder: Ab wann ist ein Riss ein Riss (ein Mangel)?	121
6.8	Auswirkung von Rissen auf die Funktion	123
6.9	Das Spektrum möglicher Rissursachen	124
6.10	Rissauswirkung auf das jeweilige Eigentum	125
6.11	Risssicherheit	125
6.12	Zur Erläuterung von Rissen	125
7	Vorgehen bei der Ursachenergründung	127
8	Versuch einer systematischen Zusammenfassung von Risslagen und -verläufen und ihren Ursachen	137
9	Typische Mängel- bzw. Schadensfälle	141
9.1	Allgemeines	141
9.2	Der Riss als optischer Mangel	142
9.3	Schubrisse	144
9.4	Risse infolge ungünstiger Grundrissgestaltung	147
9.5	Biegerisse infolge von Erddruck	154

9.6	Biegerisse infolge Betonierdrucks	158
9.7	Risse infolge Ausknickens	161
9.8	Risse infolge Deckenaufschüsselns/Deckensenkens	163
9.9	Risse infolge abhebender Ecken einer drillsteifen Platte	167
9.10	Risse infolge der Deckendurchbiegung einer Einfelddecke	169
9.11	Risse in Innenwänden infolge der Deckendurchbiegung einer Einfelddecke	172
9.12	Risse an der zurückgesetzten Giebelwand infolge der Durchbiegung einer Einfelddecke	175
9.13	Risse infolge der Deckendurchbiegung einer Durchlaufdecke	178
9.14	Risse infolge der Deckendurchbiegung eines Stahlbetonträgers	181
9.15	Risse infolge fehlender Ringankerwirkung – Beispiel 1	184
9.16	Risse infolge fehlender Ringankerwirkung – Beispiel 2	188
9.17	Risse infolge mangelhafter Gebäudeaussteifung	190
9.18	Risse infolge mangelhafter Hallenaussteifung	193
9.19	Risse infolge von Witterungseinflüssen	195
9.20	Risse infolge unterschiedlicher Verformungen im Attikabereich – Beispiel 1	198
9.21	Risse infolge unterschiedlicher Verformungen im Attikabereich – Beispiel 2	202
9.22	Risse infolge fehlender Lagerfugenvermörtelung	209
9.23	Risse infolge fehlender Lagerfugenvermörtelung	214
9.24	Risse infolge von Dachverformungen eines Stahlbeton-Faltwerkes (Sargdeckelkonstruktion)	217
9.25	Risse durch Dachstuhllasten	221
9.26	Risse durch Dachstuhllasten – Kehlbalkendach	223
9.27	Risse durch Dachstuhllasten – Pfetten	226
9.28	Risse durch äußere Lasten auf den Dachstuhl	229

9.29	Risse infolge fehlender Dehnungsfugen zwischen unterschiedlichen Gebäudeteilen	231
9.30	Risse infolge Übermauerns einer Schallentkopplungsfuge	238
9.31	Risse infolge zu starrer Dehnfugenausbildung	241
9.32	Risse infolge Ignorierens einer Dehnfugenausbildung	243
9.33	Risse infolge freier Verformbarkeit eines massiven Pultdachs	244
9.34	Risse infolge von Zwang aus Schwindverformungen aufgrund fehlender Dehnfugenausbildung	247
9.35	Risse infolge von Zwang an einer langen Wand	250
9.36	Risse infolge von Zwang an einer kurzen Wand zwischen starren Gebäudeteilen	251
9.37	Risse an Fertigteilstößen	253
9.38	Risse im zweischaligen Mauerwerk	256
9.39	Der Setzungsschaden	260
9.40	Risse infolge von Bergsenkung/Berghebung	282
9.41	Risse infolge von Setzung eines Gewölbes aufgrund Kämpfersetzung	286
9.42	Risse infolge von Setzung eines Gewölbes aufgrund fehlender Druckzone	288
9.43	Risse infolge von Setzung/Gewölbeöffnung im Natursteinmauerwerk	290
9.44	Risse infolge nicht kraftschlüssiger Unterfangung einer tragenden Wand	292
9.45	Risse infolge nicht kraftschlüssiger Unterfangung nach DIN 4123	294
9.46	Risse infolge fehlender Gewölbewirkung bei einer Unterfangung	297
9.47	Risse in gemauertem Bogen eines Balkons	300
9.48	Risse infolge von Durchbiegung eines auskragenden Eckträgers	302
9.49	Risse infolge von Durchbiegung einer langen Giebelabfangung	304

9.50	Risse infolge von Setzung eines Punktfundaments	306
9.51	Risse infolge von Erschütterungen	309
9.52	Risse infolge von Erdbeben	315
9.53	Rissöffnung infolge von überputzter Fachwerktragstruktur	319
9.54	Risse in Klinkermauerwerk	320
9.55	Risse infolge von Überlastung einer Stützwand für Erddruck und Verkehrslasten	322
9.56	Risse infolge von Überlastung einer Stützwand für Schüttgüter	326
9.57	Risse infolge von Erddruck auf kleine Stützwände und Gründungen aus Natursteinen	327
9.58	Risse infolge von unterdimensionierten Unterzügen/Stürzen	331
9.59	Risse infolge von Anprallschäden	333
9.60	Risse bei starrem Anschluss einer nicht tragenden Wand	339
9.61	Mögliche künftige Rissbildung infolge mangelhafter Ausführung in der Rohbauphase	340
9.62	Mögliche Rissbildung bei teilweise tragender/nicht tragender Wand	342
9.63	Mögliche Rissgefahr bei nachträglich tragenden Wandstücken	343
9.64	Risse infolge von mangelhafter Wandeinbindung/nicht lagesicherter Wandscheiben	345
9.65	Mögliche Rissbildung bei Verwendung von Bruchstückmauerwerk	347
9.66	Mögliche Rissbildung bei verschmierten Putzgründen	350
9.67	Mögliche Rissbildung bei ungleichen Putzgründen	352
9.68	Mögliche Rissbildung bei ungleichmäßigem Fugenbild	353
9.69	Mögliche Rissbildung bei nicht vollflächigem Fugenverschluss	356
9.70	Mögliche Rissbildung bei Vermauerung quer zur Tragrichtung	358

9.71	Mögliche Rissbildung bei Mischmauerwerk	362
9.72	Mögliche Rissbildung bei zu breiten Stoßfugen	364
9.73	Mögliche Rissbildung bei unklarer Lasteinleitung	367
9.74	Mögliche Rissbildung bei instabiler Lasteinleitung	369
9.75	Mögliche Rissbildung bei fehlendem Verband	371
9.76	Mögliche Rissbildung bei unterschiedlichem Format	375
9.77	Mögliche Rissbildung bei starrer Anbindung des Dachstuhls	376
9.78	Mögliche Rissbildung infolge zu großer Schlitztiefen	377
9.79	Mögliche Rissbildung infolge zu großer Wandverjüngung	379
9.80	Mögliche Rissbildung infolge fehlender Auflagerung	381
9.81	Mögliche Rissbildung infolge fehlender Unterzüge/Stürze	382
9.82	Mögliche Rissbildung infolge falscher Stürze/Unterzüge	384
9.83	Mögliche Rissbildung infolge konzentrierter Einzellasten	386
9.84	Mögliche Rissbildung infolge sich überlagernder Ursachen	388
9.85	Mögliche Rissbildung infolge zu hoher Dübellasten	389
9.86	Mögliche Rissbildung infolge falscher Befestigungen	390
9.87	Mögliche Rissbildung an stumpf gestoßener Kommunwand ohne Ankerlaschen	391
9.88	Riss an der Laibungsecke (Rollladenkasten)	394
9.89	Der Steinriss	396
9.90	Risse infolge fehlender Steinverfugung	400
9.91	Risse infolge des Schwindens von Steinen	402
9.92	Risse infolge fehlender Steinvermörtelung	404
9.93	Rissbildung durch chemisches Treiben des Mörtels	405
9.94	Risse infolge einer Kombination mehrerer Ursachen	407
9.95	Risse infolge von Durchwurzelung	409
9.96	Abgrenzung zum Thema »Putzriss«	411
9.97	Unerklärliche Rissbilder	412

9.98	Das Kuriosum »Fugenbild«	415
9.99	Das Kuriosum »Standsicherheit«	416
9.100	Zum Schluss: das Kuriosum »Gerstenkorn«	418
10	Hinweise zur Beweissicherung	421
10.1	Sprachgebrauch und Notwendigkeit	421
10.2	Klassische Beweissicherung	421
10.3	Das selbstständige Beweisverfahren nach ZPO	422
11	Instandsetzung von Rissen	423
11.1	Generelles	423
11.2	Bauprodukte	423
11.3	Instandsetzungsverfahren	424
12	Zusammenfassung	439
12.1	Vorbemerkung	439
12.2	Drei Beispiele als salvatorisches Ende	441
	Literaturverzeichnis	445
	Stichwortverzeichnis	451

1 Einleitung und Zielsetzung

1.1 *Panta rhexnytai* – alles reißt

In Anlehnung an Heraklits Worte »*panta rhei* – alles fließt« könnte man manchmal den Eindruck gewinnen, alles im Bauwesen würde reißen, wäre schlecht. Mängelprotokolle von Abnahmen weisen nahezu immer Risschäden auf. Bauschadensberichte und allabendlich quotenheischende Sendungen über »Pfusch am Bau« tragen ihren Teil dazu bei.

Keineswegs will der Autor durch die vorgelegte Sammlung zu Risschäden hier einen grundlegenden Werkstoff des Bauwesens – das Mauerwerk – in seiner bedeutenden Vielzahl der Anwendungen schlechtreden, sondern sich vielmehr klar von dem geflügelten Wort »Pfusch am Bau« distanzieren.

Anhand von 100 Mängel- und Schadensbeispielen wird erläutert, wie man Risschäden erkennt, vermeidet und instand setzt.

1.2 Bauen ist ein Kampf wogegen?

Bauen sei ein Kampf gegen das Wasser, lautet ein oft zitierter Grundsatz im Bau- und insbesondere im Sachverständigenwesen. Dieser Aussage kann hier nur zum Teil zugestimmt werden. Natürlich waren und sind Bauwerke im Wesentlichen Schutzbauten gegen äußere (aber auch innere/bauphysikalische) Witterungseinflüsse. Dies gilt für den üblichen Hochbau, letztlich aber auch für Tiefbauwerke wie Straßen, Brücken, Tunnels und Dämme, da der planende Ingenieur und Architekt immer den Einfluss der Witterung und damit das Wasser mitberücksichtigen muss.

Bauen ist aber letztlich viel mehr noch ein »Kampf« gegen Lasten und Zwänge. Werkstoffe und die daraus erstellten Bauteile haben neben ihrem Eigengewicht auch Verkehrslasten und Spannungen aus Zwängungen zu widerstehen. Widerstehen sie diesen nicht, kommt es zu Rissen. Dies ist die einfachste Form eines Ansatzes, der Allgemeinheit das Entstehen von Rissen zu verdeutlichen.

Risse können in Form von oberflächlichen Abspaltungen, aber auch in der klassischen Trennung ein und desselben Werkstoffes auftreten. Sie können sich optisch als Fugen- oder Spaltöffnungen zeigen. Dann werden Risse zur

Ursache für Feuchteschäden und führen wieder zum Kampf gegen das Wasser, womit sich der Kreis schließt.

1.3 Zielsetzung und Aufbau des Buches

Mauerwerk als einer der traditionsreichsten Baustoffe soll in diesem Fachbuch keineswegs als schadensanfällig bzw. rissanfällig dargestellt werden. Risse gibt es in allen Baustoffen und an allen Baustoffübergängen. Vielmehr soll anhand praxisnaher Beispiele gezeigt werden, wie und was man aus Schäden lernen kann, die sich teilweise schon über Generationen von Planern und Ausführenden wiederholen.

Das Buch ist so aufgebaut, dass nach einer kurzen historischen Einleitung das Charakteristische des Mauerwerks in seinem Trag- und Verformungsverhalten dargestellt wird. Es folgen Anmerkungen zum Vorgehen bei der Voruntersuchung und zur Ursachenergründung.

In Kapitel 9 werden zahlreiche Schadensfälle schematisch aufgezeigt und die jeweils typischen Rissbilder beschrieben. Letztlich ist es nicht die Absicht des Autors, ein Kompendium aller möglichen Risse in Form einer Rissammlung wiederzugeben, sondern eher ein Lehrbuch zu Vermeidung von Mauerwerksrissen vorzulegen.

Es wird versucht, eine Anleitung für das eigene Vorgehen bei der Ursachenanalyse zu bieten und nicht Rezeptlösungen in Form von Ablaufschemata für die Ursachenergründung aufzustellen. Dies stellt ein entsprechend ganzheitliches, methodenorientiertes Vorgehen dar, und soll dem interessierten Leser letztlich dazu dienen, selbst die Ursache(n) für Rissbildungen zu erkennen und zu analysieren.

Dazu zeigt Tabelle 13 auch erstmals eine synoptische Darstellung aller möglichen Rissarten und deren (grobe) Ursachenzuordnung.

Das Ergebnis des Buches sei an dieser Stelle für den eiligen Leser in drei Stichpunkten schon vorweggenommen:

1. Die Beurteilung von Rissbreiten ist eine Frage des angelegten Maßstabs.
2. Daraus folgt, dass es streng genommen »ungerissenes Mauerwerk« – gleich welcher Stein- und Mörtelkombination – nicht gibt.
3. Mauerwerk ist wie Stahlbeton letztlich eine »gerissene« Bauweise auf dem jeweiligen Betrachterniveau und die Rissbreiten sind den Anforderungen gemäß zu beschränken.

2 Kurzer historischer Rückblick

2.1 Mauerwerk als ältester Werkstoff

Letztlich wird man nie klären können, ob die ersten Bauwerke der Menschheitsgeschichte aus Stein oder aus Holz errichtet wurden. Wenn man allerdings vom systematischen und wiederholten Errichten von Schutzbauten und Infrastrukturen im großen Stil spricht, dann kann Mauerwerk als der älteste Baustoff der Geschichte bezeichnet werden.

Als eines der monumentalsten Bauwerke der biblischen Geschichte gilt der Turm zu Babel (Bild 1), zu dem es in der Bibel, Buch Genesis 11 (1–9) heißt:

»Alle Menschen hatten die gleiche Sprache und gebrauchten die gleichen Worte. Sie sagten zueinander: ›Auf, formen wir Lehmziegel und brennen wir sie in Backsteine.‹ So dienten ihnen gebrannte Ziegel als Steine und Erdpech als Mörtel [...] (und der Herr sprach) ›Auf, steigen wir hinab und verwirren wir dort ihre Sprache, sodass keiner mehr die Sprache des anderen versteht.‹«

Dies ist eine der ersten Erwähnungen von gebrannten Mauerziegeln.

Als Nachfolger des biblischen Turmbaus können die Zikkurate angesehen werden, deren Hauptzeit in Mesopotamien auf ca. 5000 bis 3000 Jahre v. Chr. datiert wird. Da der Hauptbaustoff aus wenig witterungsbeständigen luftgetrockneten Lehmziegeln bestand, ist von vielen Zikkuraten heute nur noch ein Lehmberg übrig.



Bild 1 ■ Brueghel der Ältere, Turmbau zu Babel (Wiener Version), Kunsthistorisches Museum, Wien

Zu den wahrscheinlich ältesten bildlichen Darstellungen gehören die Zeichen der altägyptischen Hieroglyphen mit der symbolischen Darstellung des Maurers (Bild 2). Den Vorgang des Bauens zeigt Bild 3 mit der Darstellung des »Maurers« links und einem »stockschwingenden Mann« rechts, der ihn in der gesellschaftlichen Stellung eines Sklavenaufsehers antreibt/beaufsichtigt. Das Bild birgt die durchaus im Kontext zu sehende, historische Doppeldeutigkeit für »Bauaufsicht« und »Mängelverursacher«, da die Darstellung des »Stock schwingenden Mannes« auch für den »zerstörenden Mann« [46] steht.

Eine indirekte Erwähnung des Begriffs »Bauschaden« findet sich in Bild 4 in Form der einstürzenden oder niedergerissenen Mauer.

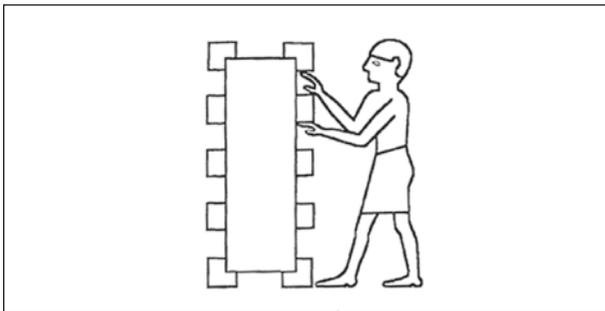


Bild 2 ■ Hieroglyphe für »Mauerer« (genau: »Mann, der eine Mauer baut«), ca. 3 000 v. Chr., entnommen aus [46]

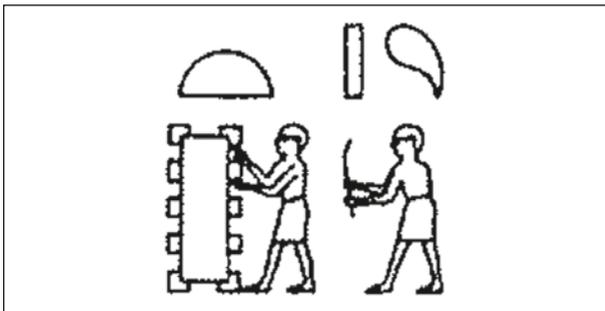


Bild 3 ■ Hieroglyphe für »bauen«, ca. 3 000 v. Chr., entnommen aus [37]



Bild 4 ■ Hieroglyphe für »Bauschaden« (genau: »einstürzende Mauer«), ca. 3 000 v. Chr., entnommen aus [46]

Die spätere Römerzeit war geprägt von großartigen Infrastrukturen in Naturstein- und Ziegelbauweise, mit vermörtelten Fugen oder als sogenanntes Trockenmauerwerk, wie beispielsweise der Pont du Gard (Bilder 5 und 6), die weitgespannte Talquerung eines Aquädukts.



Bild 5 ■ Pont du Gard, Südfrankreich

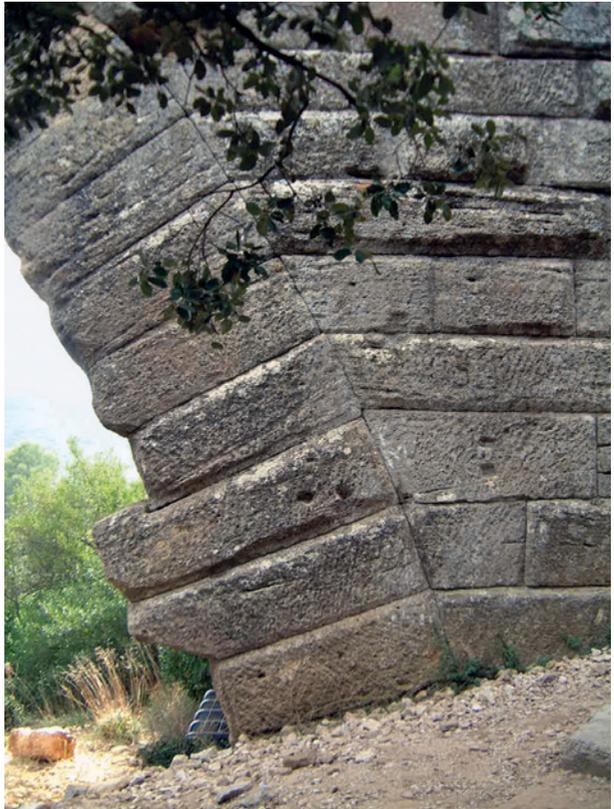


Bild 6 ■ Detail des Trockenmauerwerks (Pont du Gard, Südfrankreich)

An römischen Ausgrabungen wie am Magdalensberg in Kärnten in Österreich (Bild 7) finden wir heute noch Natursteinmauerwerk aus dem 1. Jh. v. Chr., das in unveränderter Form noch eineinhalb Jahrtausende später im Burgenbau des europäischen Mittelalters (Bild 8) üblich war.



Bild 7 ■ Ausgrabungen am Magdalensberg; Natursteinmauerwerk (1. Jh. v. Chr. bis 1. Jh. n. Chr.)



Bild 8 ■ Burg Pürnstern im oberösterreichischen Mühlviertel (15. Jh.)

Auch in Südamerika gibt es Mauerwerke, die von hoher Baukunst zeugen. Bild 9 zeigt den berühmten »Zwölfeckigen Stein«, in dessen Fugen keine Rasierklinge passen würde.

Statische Kuriositäten – also »Dinge«, die sich in dieser Form nach heutigem Normenstand so nicht ohne Weiteres als standsicher nachweisen lassen würden – gibt es im Mauerwerksbau viele. Bekannt sind die hohen, im Gegensatz zu den heutigen normativen Vorgaben schlanken Mittelschiffpfeiler der Kirche St. Martin und Kastulus in Landshut (Bild 10). Die Kirche gehört zu den herausragenden Beispielen der Spätgotik und ihr Turm ist mit seinen 130 m der höchste Backsteinturm der Welt.

Auch freistehende Giebel an Kirchtürmen (Bild 11) oder an Natursteingebäuden (Bild 12) oder dünnste Pfeiler an Fenstern gotischer Kathedralen (Bild 13) gehören zu den eindrucksvollen Beispielen, dass eine Diskrepanz zwischen »Soll« und »Ist« oft Jahrhunderte überdauern kann, ohne zu Schäden zu führen. Dies soll aber nicht dazu verleiten, normative Vorgaben zu ignorieren.

So wie sich der gebrannte Tonziegel aus der Tradition des luftgehärteten Lehmziegels entwickelte, kann man die Entstehung des modernen autoklavengehärteten Kalksandsteins sehen [88], dem die Experimente des deutschen Arztes Bernhadi (um 1854) vorausgingen. Dieser fertigte mit einer hölzernen handbetriebenen Hebelpresse die ersten luftgehärteten Kalkmörtel-Mauersteine. 1880 wurde dafür das Patent erteilt [4].

Porenbetonsteine als ebenfalls dampfgehärteter Werkstoff bestehen aus Branntkalk, fein gemahlenem Quarzsand und Wasser. Die Bezeichnung »Beton« ist unglücklich, da anders als die Zuschläge beim Beton hier die Zuschlagskomponente »Sand« auch als Bindemittel agiert. Die historische



Bild 9 ■ Perfekter zwölf-eckiger Stein (Zyklo-pen-mauerwerk) in der Calle Harunrumiyoc in Cusco als Zeugnis der großen Baukunst der Inkas



Bild 10 ■ Mittelschiff der Kirche St. Martin und Kastulus in Landshut; Pfeiler mit 22 m Höhe und nur 1 m Breite



Bild 11 ■ Kirchturm-
giebel der Kirche
San Gian, Celerina
(15. Jh.); Naturstein



Bild 12 ■ Seit mehr als 150 Jahren ohne jegliche Aussteifung frei stehender Natursteingiebel im Hochgebirge (Knappenhäuser im österreichischen Nationalpark Hohe Tauern in 2341 m Höhe)

Entwicklung des Baustoffes »Porenbeton«, die bereits im 19. Jh. begann, geht auf Laborversuche des schwedischen Architekten Axel Erikson in den Jahren 1918 bis 1923 zurück. Dieses Verfahren wurde 1924 patentiert [85].

Als Kuriosum gilt auch das sogenannte Einsteinmauerwerk, d. h. ein Bauwerk, das aus einem ganzen Block errichtet wird (Bild 14).



Bild 13 ■ Extrem dünne Natursteinsäulen an der Kathedrale von Valencia, Spanien



Bild 14 ■ Einstein-Burganlage, Haßberge/Franken

2.2 Mauerwerk als »historisierender« Schaden

Ein kuriozes Beispiel für einen »geschichtlichen Bauschaden« ist die Magdalenenklause im Schlosspark Nymphenburg in München (Bild 15). Hier sollen der Verfall und die Vergänglichkeit historischer Gebäude mit bewusst gesetzten Mauerwerksrissen dargestellt werden. Diese von Joseph Effner von 1725 bis 1728 errichtete »Behausung eines Eremiten« soll durch Rissbildungen und herabgefallenen Putz die Hinfälligkeit des Irdischen vergegenwärtigen.

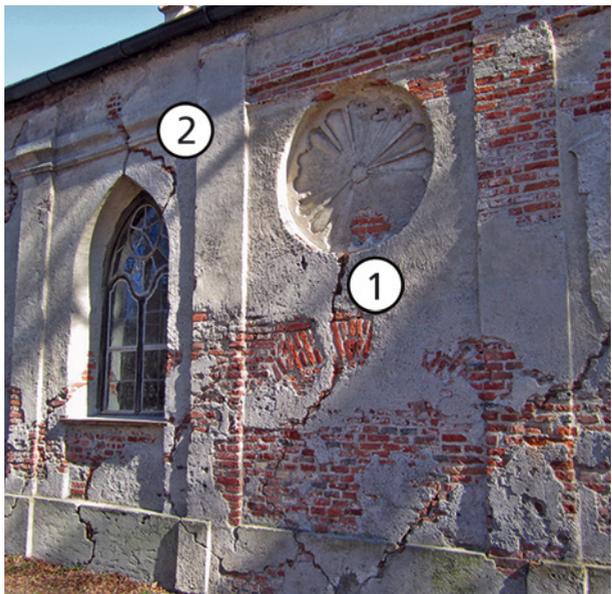
Wie man später bei den Beispielen zu Setzungsschäden (vgl. Kapitel 9.3.9) sehen wird, sind diese bewusst gefertigten Risssschäden insofern falsch, als der Typus eines Setzungsrisses kaum an der Stelle 1 in Bild 16 zur Rosette hin enden würde, da die Wand hier an ihrer schwächsten Stelle vorerst weiterreißen würde.

Die Stelle 2 in Bild 16 mit dem Riss am herabfallenden Spitzbogen wäre ein typischer Erschütterungsriss infolge von Spundwandaarbeiten oder eines Überschallknalls. Beides gab es allerdings im 19. Jh. noch nicht.

Bild 15 ■ Magdalenenklausen im Schlosspark Nymphenburg in München



Bild 16 ■ Magdalenenklausen im Schlosspark Nymphenburg in München: Detail der »Scheinriss«-Architektur



Insofern ist die »Scheinschaden«-Architektur der Klause zwar romantisch, letztlich aber für die Schadensanalyse oder ein »Lernen aus Schäden« nicht geeignet.

Als Beispiel einer Schein-Mauerwerksarchitektur zeigt Bild 17 eine Wand mit aufgemalten Fugen.



Bild 17 ■ Aufgemalte Lagerfugen als Scheinfugen

3 Grundelemente des Mauerwerksbaus

3.1 Allgemeines

Das vorliegende Buch ist kein Lehrbuch zum Mauerwerksbau, dennoch seien einige grundlegende Charakteristika des Mauerwerksbaus zum besseren Verständnis vorangestellt.

3.2 Grunddefinition »Mauerwerk«

Mauerwerk ist ein in regelmäßigen oder unregelmäßigen Lager- und Stoßfugen verlegter Wandbaustoff aus meist quaderförmigen Steinen. Die Steine können in Fugen trocken, verzahnt oder vermörtelt verlegt werden.

Als Steine kommen

- Natursteine (Granit, Sandstein usw.),
- Ziegel DIN 105 [61],
- Kalksandsteine DIN 106 [63],
- Porenbetonsteine DIN 4165 [64],
- Normal- und Leichtbetonsteine DIN 18153 [65] und 18151 [66],
- Glasbaustoffe DIN 4242 [67],
- und Kombinationen davon

zur Anwendung.

Bezüglich der aktuellen Normen und Normenteile wird z. B. auf die Veröffentlichungen im MAUERWERK-KALENDER [28] verwiesen. Letztlich kann der »Stein« des Mauerwerks aus nahezu jedem Werkstoff bestehen, auch luftgetrocknete Lehmziegel der Adobe-Bauweise zählen dazu. Ob der jeweilige Stein auch verwendet werden kann und darf, regeln die Anforderungen der entsprechenden Bauordnungen.

Die Mehrheit der derzeit verwendeten Wandbaustoffe ist allerdings eher über allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen (abZ) des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) in Berlin geregelt.

Als Mörtel kommen nach DIN 998-2 [51] u. a. zur Anwendung:

- Normalmörtel (G) (8 bis 15 mm dick) – die ursprüngliche Bauweise,
- Dünnbettmörtel (T) (2 mm) – derzeit Standard,
- Leichtmauermörtel (L).

Da im Schadensbereich oft auch frühere Festlegungen von Bedeutung sind, werden hier auch noch DIN 1053 [52], DIN 1045 [68] und DIN 1164 [69] zitiert. In einer Zwischenphase gab es auch Mittelbettmörtel mit einer Schichtdicke von 4 bis 6 mm; diese Ausführungen waren aber eher selten.

Die Mörtel können reine Kalkmörtel, Kalkzementmörtel oder reine Zementmörtel sein.

Auf diese Art werden aus Mauersteinen Wände, wandartige Träger, Unterzüge, Stürze und Wandpfeiler erstellt, ebenso Deckensysteme (eben und gewölbt).

3.3 Werkstoffmatrix

Um das Besondere am Werkstoff Mauerwerk hervorzuheben, kann man die Unterschiedlichkeiten der im Bauwesen gebräuchlichen Werkstoffe am besten in einem Vergleich in Form einer Matrix darstellen. Tabelle 1 gibt die gebräuchlichsten Baustoffe des Bauwesens in Abhängigkeit von ihrer Homogenität und Isotropie-Eigenschaften in einer solchen Matrix wieder.

Homogenität bedeutet gleiche Massenverteilung im betrachteten Volumen; inhomogen ist ein Werkstoff, wenn dies nicht der Fall ist. Dabei versteht es sich von selbst, dass gerade Fragen der Homogenität immer auch Fragen des angelegten Maßstabs sind. So ist Beton auf einem makroskopischen Level sicherlich homogen in seinem Verhalten. Betrachtet man den Zuschlag und die Bindemittelmatrix jedoch im mikroskopischen Licht, werden natürlich Inhomogenitäten sichtbar.

Tabelle 1 ■ Werkstoffmatrix

	isotrop	anisotrop/orthotrop
homogen	Wasser Stahl Glas	Holz
inhomogen	Beton	Mauerwerk Stahlbeton

Isotropie bedeutet, dass die physikalischen Eigenschaften unabhängig von der betrachteten Raumrichtung sind. Anisotrop ist demnach ein Werkstoff, der richtungsabhängige physikalische Eigenschaften besitzt. Die **Orthotropie** ist eine Sonderform der Anisotropie, bei der sich die Werkstoffeigenschaften im Wesentlichen nur bei Betrachtung der rechtwinkligen Raumgeometrie ändern.

Der Werkstoff Beton wurde daher – exemplarisch – in der Tabelle mittig gesetzt, um zu zeigen, dass die Homogenität wie erwähnt eine Frage des angewendeten Maßstabs ist (z. B. bei separater Betrachtung von Zuschlag und Bindemittel oder »verschmierten« Eigenschaften und dass es – streng genommen – auch bei unbewehrtem Beton Anisotropie-Eigenschaften aus der Betonierichtung geben kann; dies aber nur als Hinweis für die »strenge« Betrachtung.)

Mauerwerk erhält seine Inhomogenität durch die für den Werkstoff charakteristische Zusammensetzung aus Stein und Mörtel.

Die **Anisotropie** von Mauerwerk ergibt sich wiederum aus

- den unterschiedlichen mechanischen und bauphysikalischen Eigenschaften des Steins senkrecht und waagrecht zur Fugenrichtung,
- den unterschiedlichen Eigenschaften der Stoß- und Lagerfugen hinsichtlich Dicke, Haftzugfestigkeit, Scherfestigkeit usw.,
- den verschiedenen Verbandarten usw.,
- dem regelmäßigen/unregelmäßigen Fugenraster,
- dem meist vertikalen Lochbild der Steine,
- den meist in Strangpressen oder Formen gebildeten Steinen, wodurch die Grundstruktur des Materials schon »gerichtet« ist bzw. es aufgrund der Formenherstellung ein »Oben und Unten« gibt.

Den Sonderfall der orthogonalen Anisotropie nennt man bei Mauerwerk **Orthotropie des Mauerwerks**.

Das alles führt zu dem in Bild 18 dargestellten Memogramm (Akronym »Chile« als Eselsbrücke).

Mauerwerk	
ist kein	C ontinuum
ist nicht	h omogen
ist nicht	i sotrop
ist nicht	l inear-
	e lastisch

Bild 18 ■ Das »Chile«-Qualitäten-Akronym

3.4 Werkstoffeigenschaften

3.4.1 Generelles

Die grundsätzlichen Werkstoffeigenschaften wie Festigkeit und Verformungsverhalten werden von einer Vielzahl von Faktoren bestimmt. Dies hat seinen Grund in der Vielschichtigkeit der Mauerwerkskombinationen, im Herstellungsprozess durch Menschen auf Baustellen, durch die Bauteilgeometrien usw. Bild 19 zeigt (nur) eine Auswahl von einigen Einflussfaktoren.

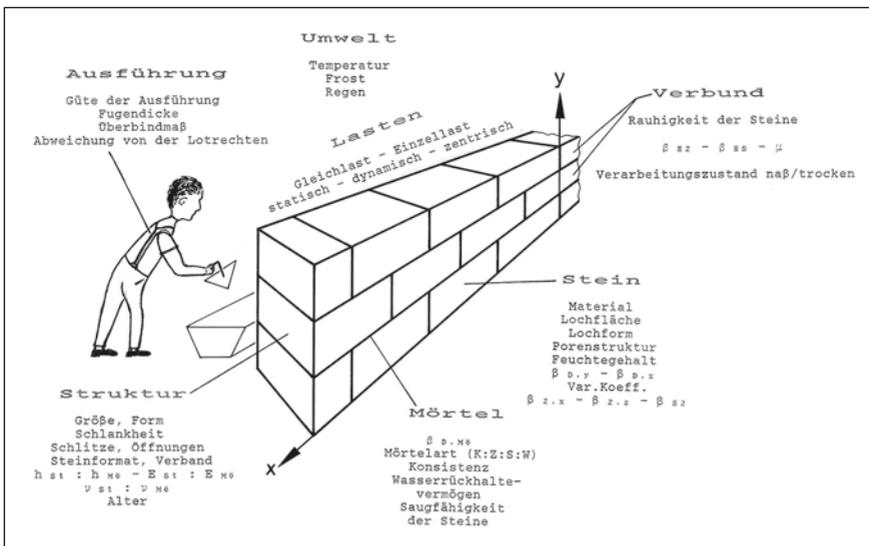


Bild 19 ■ Ausgewählte Faktoren mit Einfluss auf die Festigkeit

Demnach ist die Mauerwerksfestigkeit f_{MW} auch als Funktion darstellbar:

$f_{MW} = f$ (Steinart, Steinfestigkeit, Mörtelfestigkeit, Geometrien von Stein und Mörtel, Fugenbild, Verband, Witterung beim Bau, Saugfähigkeit, Fugendicke usw.)

3.4.2 Steinfestigkeiten

Die Steinfestigkeiten sind in den jeweiligen Normen (siehe Kapitel 3.2) bzw. Zulassungen festgehalten und liegen für übliche Produktionen zwischen 6 und 20 N/mm² für künstliche Steine.

Tabelle 2 gibt die charakteristischen Druckfestigkeiten für Natursteine wieder; weitere Werte vgl. [40], [49].

Tabelle 2 ■ Charakteristische Druckfestigkeiten von Natursteinen (aus DIN 1053-100 [54], dort Tabelle B.1)

Gesteinsarten	Druckfestigkeit f_{bk} [N/mm ²]
weicher Kalkstein, Travertin, vulkanische Tuffsteine	20
weiche Sandsteine (mit tonhaltigen Anteilen) und dergleichen	30
quarzitische Sandsteine mit kieseligem oder karbonitischem Bindemittel	40
dichte (feste) Kalksteine und Dolomite (einschließlich Marmor), Basaltlava und dergleichen	50
Quarzit, Grauwacke und dergleichen	80
Granit, Syenit, Diorit, Basalt, Quarzporphyr, Melaphyr, Diabas und dergleichen	120
metamorphe Gesteine, Gneis und dergleichen	140

3.4.3 Steinformate

Steinbreiten

Heute übliche Steinformate liegen bei Breiten von 11,5 bis 36,5 cm, mit der Tendenz zu größeren Dicken aufgrund immer strengerer Anforderungen hinsichtlich des Wärmeschutzes.

Steinlängen und Steinhöhen

Die Steinlängen und -höhen liegen, sofern sie nicht in Mauerwerks-Fertigteilen verbaut werden, unter 50 cm, was auch wegen des Steingewichts in der Regel die limitierende Größe darstellt.

Die Bilder 20 bis 22 zeigen zwei Extrembeispiele für die Verwendung von Ziegelformaten.



Bild 20 ■ Der größte bekannte Tonziegel (ca. 150 kg schwer) wurde im Mittelalter im Kloster Indersdorf verwendet. Jetzt befindet er sich in der denkmalpflegerischen Baustoffsammlung im ehemaligen Kloster Thierhaupten.

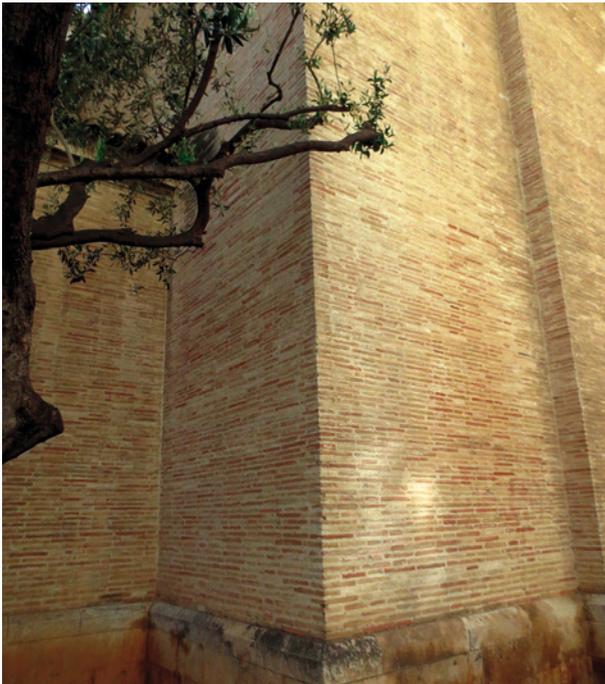


Bild 21 ■ Verwendung von kleinstformatigen gotischen Ziegeln an der Kathedrale von Valencia, Spanien



Bild 22 ■ Detail aus
Bild 21: nur 20 bis
30 mm hohe Ziegel

3.4.4 Verformungseigenschaften

Die Grundwerte der Verformungseigenschaften von Mauerwerk, die seit Jahren u. a. von Schubert [43] veröffentlicht wurden, haben letztlich in die Tabelle 3 der DIN 1053 [54] als Verformungskennwerte Eingang gefunden – hier als Tabelle 3 wiedergegeben.

Tabelle 3 ■ Verformungskennwerte für Kriechen, Schwinden, Temperaturänderung sowie Elastizitätsmoduln (aus DIN 1053-100 [54], dort Tabelle 3)

Mauersteinart	Endwert der Feuchte- dehnung (Schwinden, chemisches Quellen) ^a		Endkriechzahl		Wärme- dehnungs- koeffizient		Elastizitäts- modul	
	$\epsilon_{f\infty}^a$ mm/m		φ_{∞}^b		α_T $10^{-6}/K$		E^c MN/m ²	
	Rechenwert	Wertebereich	Rechenwert	Wertebereich	Rechenwert	Wertebereich	Rechenwert	Wertebereich
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Mauerziegel	0	+0,3 bis -0,2	1,0	0,5 bis 1,5	6	5 bis 7	1 100 f_k	950 f_k bis 1 300 f_k
Kalksandsteine ^d	-0,2	-0,1 bis -0,3	1,5	1,0 bis 2,0	8	7 bis 9	950 f_k	800 f_k bis 1 300 f_k
Leichtbetonsteine	-0,4	-0,2 bis -0,5	2,0	1,5 bis 2,5	10 8 ^e	8 bis 12	1 600 f_k	1 300 f_k bis 1 750 f_k
Betonsteine	-0,2	-0,1 bis -0,3	1,0	–	10	8 bis 12	2 400 f_k	2 000 f_k bis 2 700 f_k
Porenbetonsteine	-0,2	+0,1 bis -0,3	1,5	1,0 bis 2,5	8	7 bis 9	800 f_k	650 f_k bis 950 f_k

^a Verkürzung (Schwinden): Vorzeichen minus; Verlängerung (chemisches Quellen): Vorzeichen plus
^b $\varphi_{\infty} = \epsilon$ Endkriechdehnung; $\epsilon_{st} = \sigma/E$
^c E Sekantenmodul aus Gesamtdehnung bei etwa 1/3 der Mauerwerksdruckfestigkeit; charakteristische Druckfestigkeit f_k nach Tabellen 5, 6 und 7
^d gilt auch für Hüttensteine
^e für Leichtbeton mit überwiegend Blähton als Zuschlag

Die Werte dieser Tabelle, v. a. die Endwerte des Schwindmaßes, werden oft bei Rissbetrachtungen herangezogen. Insbesondere ein Vergleich der »reinen« Rechenwerte führte letztlich dazu, dass eine Vielzahl von Kollegen die Meinung vertraten, eine Mischbauweise »Ziegel« mit jedem anderen Stein müsse zwangsläufig zu Rissen führen. Die Begründung lag darin, dass Ziegel nicht schwinden würden, während alle anderen Mauersteinsorten ein Schwindmaß aufweisen. Dies ist im Prinzip richtig, dennoch seien auch hier die streuenden

Kenngrößen beachtet. Wertebereiche können sich durchaus überschneiden, was sich auch darin zeigt, dass eben nicht alle Mischbauweisen zwingend Risse zeigen.

Tabelle 3 ist daher so zu lesen, dass darin grundsätzliche Werte aufgezeigt werden. Ein exaktes Nachrechnen von Rissen, deren Breiten bzw. auch Lagen ist damit nur in den seltensten Fällen möglich und wäre schwerlich als alleinige Beweisführung für das Entstehen von Rissen zulässig.

3.4.5 Druckfestigkeit des Mörtels

DIN 998-2:2010-12 [51] definiert die Festigkeiten, die in Tabelle 4 in Bezug zu den bekannten Werten der Mörtelgruppen MG der DIN 1053 [52] gesetzt werden.

Tabelle 4 ■ Normalmörtel nach DIN 998-2 [51] (dort Tabelle 1) und 1053-1:1996-11 [52] (dort Tabellen A.1 und A.2)

Bezeichnung nach DIN 998-2	alte Bezeichnung nach DIN 1053	Druckfestigkeit [N/mm ²]	Bestandteile nach DIN 1053
M 1	MG I	1,00	reiner Kalkmörtel nach DIN 1060
M 2,5	MG II	2,50	Kalkzement/ hydraulischer Mörtel
M 5	MG IIa	5,00	Kalkzementmörtel
M 10	MG III	10,00	reiner Zementmörtel nach DIN 1164
M 15	keine Bez.	15,00	
M 20	MG IIIa	20,00	reiner Zementmörtel nach DIN 1164
M d	keine Bez.	d = eine vom Hersteller angegebene Festigkeit, die höher als 20 MPa ist	

Neben Normalmörteln gibt es auch Dünnbettmörtel und Leichtmörtel.

Durch moderne Herstellungsmethoden, nachträgliche Schleifvorgänge usw. war es möglich, in den letzten Jahren die »Schwachstelle« Lagerfuge hinsichtlich ihrer Dicke (u. a. Festigkeitsreduktion, lokale Wärmebrücke) dadurch zu reduzieren, dass man in der Verarbeitung nunmehr nahezu ausschließlich Dünnbettmörtel verwendet.

Dünnbettmörtel sind die Regelbauweise der meist durch Zulassung geregelten Planbausteine (Ziegel, Kalksandsteine, Porenbetonsteine), umgangssprachlich auch als »Klebmauerwerk« bezeichnet.

Die Lagerfugendicken liegen hierbei im 2-mm-Bereich. Die Erstellung erfolgt mittels speziell geformter Mörtelschlitten mit Vliesen, die verhindern sollen, dass der meist dünnflüssige Mörtel in die Kammern fließt.

Leichtmörtel enthalten Zuschläge, um die (an sich) höhere Wärmeleitfähigkeit des Mörtels gegenüber dem Stein zu reduzieren.

Aktuell kommen auch trocken gelieferte und in Folien verpackte Mörtelpads zur Anwendung, die auf die Fugen aufgelegt und durch Annässen verarbeitbar werden.

Da der Mörtel sowohl statisch als auch bauphysikalisch immer die Schwachstelle im Mauerwerk darstellt, führte dies zu einer »Wiederentdeckung« des nicht vermörtelten, sogenannten Trockenmauerwerks ohne ausgefüllte Fugen.

Stoßfugen werden im Mauerwerksbau seit etwa 30 Jahren nicht mehr vermörtelt und bleiben knirsch, also unvermörtelt gestoßen/offen.

3.4.6 Druckfestigkeit des Mauerwerks

Die Tabellen 5 und 6 geben die charakteristische Mauerwerksfestigkeit in Abhängigkeit von der Stein- und Mörteldruckfestigkeit wieder. Basis dieser Festlegung sind eine Vielzahl von Versuchsauswertungen [30], die zu dem bekannten Potenzformelansatz nach Mann [34] führten und früher analog auch in DIN 1053-100:2007-09 [54] enthalten waren.

Tabelle 5 ■ Charakteristische Druckfestigkeit f_k in N/mm² von Einsteinmauerwerk aus Hochlochziegeln mit Lochung A (HLzA), Lochung B (HLzB), Mauertafelziegeln T1 sowie Kalksandloch- und Hohlblocksteinen mit Normalmörtel (aus DIN EN 1996-3/NA:2012-01 [75], dort: Tabelle NA.D.1)

Steindruckfestigkeitsklasse	f_k [N/mm ²]			
	NM II	NM IIa	NM III	NM IIIa
4	2,1	2,4	2,9	3,3
6	2,7	3,1	3,7	4,2
8	3,1	3,9	4,4	4,9
10	3,5	4,5	5,0	5,6
12	3,9	5,0	5,6	6,3
16	4,6	5,9	6,6	7,4
20	5,3	6,7	7,5	8,4
28	5,3	6,7	9,2	10,3
36	5,3	6,7	10,2	11,9
48	5,3	6,7	12,2	14,1
60	5,3	6,7	14,3	16,0

Tabelle 6 ■ Charakteristische Druckfestigkeit f_k in N/mm² von Einsteinmauerwerk aus Hochlochziegeln mit Lochung W (HLzW), Mauertafelziegeln (T2, T3 und T4) sowie Leichtlanglochziegeln (LLZ) mit Normalmörtel (aus DIN EN 1996-3 [75], dort: Tabelle NA.D.2)

Steindruckfestigkeitsklasse	f_k [N/mm ²]			
	NM II	NM IIa	NM III	NM IIIa
4	1,7	2,0	2,3	2,6
6	2,2	2,5	2,9	3,3
8	2,5	3,2	3,5	4,0
10	2,8	3,6	4,0	4,5
12	3,1	4,0	4,5	5,0
16	3,7 (3,1)	4,7 (4,0)	5,3 (4,5)	5,9 (5,0)
20	4,2 (3,1)	5,4 (4,0)	6,0 (4,5)	6,7 (5,0)

Werte in Klammern gelten für Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit Lochung W (HLzW) und Mauertafelziegeln T4.

3.4.7 Zugfestigkeit des Mauerwerks

Da die Zugfestigkeiten sämtlicher Steinarten stark streuen, um Zehnerpotenzen niedriger als die Druckfestigkeit liegen und darüber hinaus die Haftzugfestigkeit (also die Haftung zwischen Mörtel und Stein) sowohl in der Lagerfuge als auch in der Stoßfuge als sehr gering anzusetzen ist, ist Mauerwerk seit jeher als **nicht zugfestes** Material anzusehen.

DIN 1053-100 [54] lässt **senkrecht** zur Lagerfuge keine Zug- und Biegezugfestigkeit zu, sondern geht bei Biegedruckbeanspruchung von gerissenen Querschnitten aus.

Die Zug- und Biegezugfestigkeit **parallel** zur Lagerfuge ergibt sich aus dem Modell, dass die fehlende Stoßfugenfestigkeit durch einen Ansatz der Haftscherfestigkeit der Lagerfuge »geheilt« wird.

Dies führt zu den in Abschnitt 8.9.4 der DIN 1053-100 [54] formulierten Nachweisen.

Um Rissbildungen zu erklären und nachzuweisen, sollten diese Nachweise nur unterstützend herangezogen werden. Ein nicht eingehaltener normativer Nachweis kann rein logisch betrachtet eine Rissbildung noch nicht erklären. Bei der Erklärung von Rissbildungen ist es immer besser, **qualitativ** im Sinne einer Verdeutlichung über Baustoff- und Baukonstruktionsverträglichkeiten zu argumentieren als **quantitativ** im Sinne von

$$\text{vorh. } \sigma > \text{zul. } \sigma$$

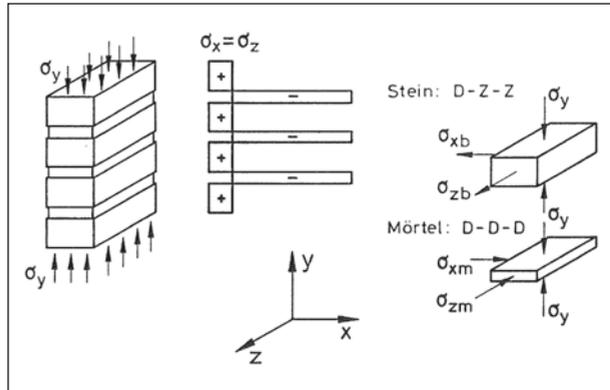
Bei einer Argumentation über Spannungsüberschreitungen wird man immer entgegen, dass in jeglichem spannungsorientierten Bemessungskonzept (sei es ein globales oder ein Teilsicherheitskonzept) Sicherheiten »eingebaut« sind, die einen Riss gerade nicht wahrscheinlich und erklärbar werden lassen, da der Sicherheitsbeiwert genau diese für eine Rissbildung verantwortlichen schwankenden Last-, Werkstoff- und Ausführungsqualitäten »abfängt«.

3.4.8 Spannungsverteilung in einem Prisma nach Hilsdorf

Schon die ersten wissenschaftlichen Untersuchungen zur Druckfestigkeit von Mauerwerksprismen zeigten, dass die Steine in den Versuchen beim Bruch ein lastparalleles Rissbild aufwiesen. Erst Hilsdorf [25] analysierte diesen Effekt. Die Erklärung für das vertikale Rissbild von einachsig druckbeanspruchten Mauerwerksprismen zeigt Bild 23.

Daraus ist gut zu erkennen, dass aufgrund der unterschiedlichen Querdehnzahlen von Stein ($\nu=0,10$) und Mörtel ($\nu=0,20$) der Stein unter vertikalem

Bild 23 ■ Spannungen in einem zentrisch gedrückten Mauerwerksprisma nach Hilsdorf [25]



Druck und horizontalem Zug steht, während der Mörtel unter dreiaxsigem Druck steht. Diese horizontalen Zugspannungen im Stein führen letztlich zur bekannten Rissbildung im Stein. Bildlich – übertrieben – kann man diesen Effekt verdeutlichen, wenn man sich die Lagerfuge als sehr weiche »querdehnungsfreudige« Schaumstoffschicht vorstellt, die den Stein auf Querkzug belastet und somit auseinanderreißt.

3.4.9 Zweiachsigte Festigkeit von Mauerwerk – die Schubfestigkeit

Der Beginn der experimentellen Mauerwerksforschung ist eng mit den Versuchen Bauschingers [2] Ende des 19. Jh. verbunden. Bauschinger führte am sogenannten Zweisteinkörper seine ersten Experimente zur Ergründung der Scherfestigkeit eines aus Stein und Mörtel zusammengesetzten Körpers durch (Bild 24).

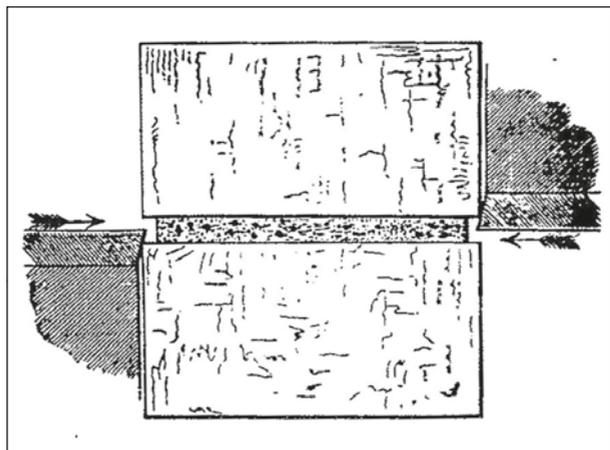


Bild 24 ■ Erste Scher-Versuche, eigentlich Schub-Versuche, von Bauschinger [2]

Bild 25 zeigt den allgemeinen Spannungszustand in einer durch Horizontalkräfte belasteten Mauerwerkswand. Bild 26 zeigt dazu, dass schubbeanspruchtes Mauerwerk letztlich ein zweiachsig beanspruchtes Mauerwerk ist, was seinerseits zur verallgemeinerten Bruchhypothese von zweiachsig beanspruchtem Mauerwerk in Bild 27 führt. Der linke Quadrant deckt dazu Fälle ab, die sich im Bauwesen durch Risse bei starken lokalen Zugkräften zeigen. Dann folgt die linear zunehmende Gerade (Coulomb'sche Reibungsgerade), die sich bei Schadensfällen in einem Gleiten der Lagerfugen zeigt. Die maximale Schubkraft ($\max t$ im Diagramm) würde auch ein Aufreißen der Steine beinhalten, was sich im Schadensfall immer extremer auswirkt, bis hin zum Aufspalten einer Wand senkrecht zur Belastungsrichtung im Fall einer zweiachsigen Überdrückung. Dazu wurden im Versuch Laststeigerungen von bis zu 20 % gegenüber der einachsigen Festigkeit festgestellt [6].

Wegbereitend für das Konzept der mehrachsigen Spannungszustände waren die Arbeiten von Mann/Müller [33] in Darmstadt. Auf Basis der üblichen Spannungsverhältnisse im Mauerwerk geht man davon aus, dass über die Stoßfugen keinerlei Lasten übertragen werden können; die Stoßfugen sind »luftgefüllt«. Wenn dem so ist, dann ist zur Aufrechterhaltung des Gleich-

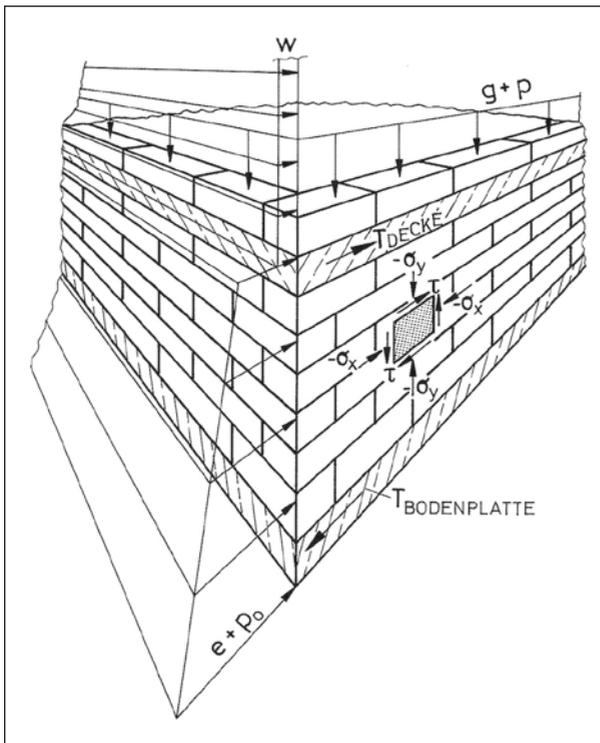


Bild 25 ■ Allgemeiner Spannungszustand bei Ansatz von homogenem Werkstoffverhalten

Bild 26 ■ Analogie einer Hauptspannungsbetrachtung zur Schubspannungsbetrachtung am zweiachsig belasteten Mauerwerk

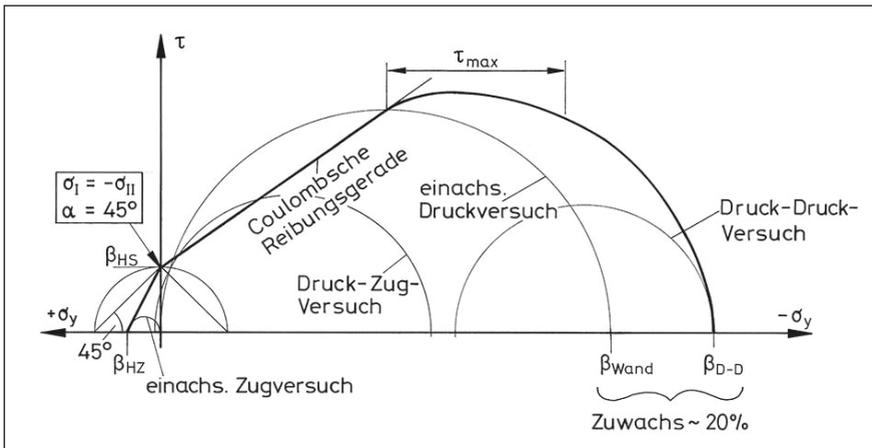
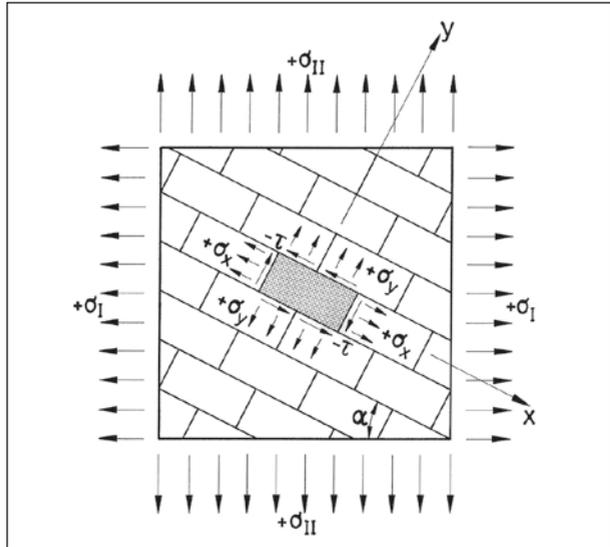


Bild 27 ■ Verallgemeinerte Bruchhypothese von zweiachsig belastetem Mauerwerk [6]

gewichts als eine von mehreren Möglichkeiten eine getreptt/gezahnt verlaufende Normalspannungsverteilung notwendig, wie in Bild 28 dargestellt.

Die vier Versagenskriterien für den allgemeinen Fall einer mehrachsigen Mauerwerksbelastung lauten nach Mann/Müller (Bild 29):

1. Überschreiten der Mauerwerksdruckfestigkeit,
2. Überschreiten der Haftzugfestigkeit zwischen Stein und Mörtel,
3. Überschreiten der Kohäsion und Reibung in der Lagerfuge,
4. Überschreiten der Zugfestigkeit im Stein.

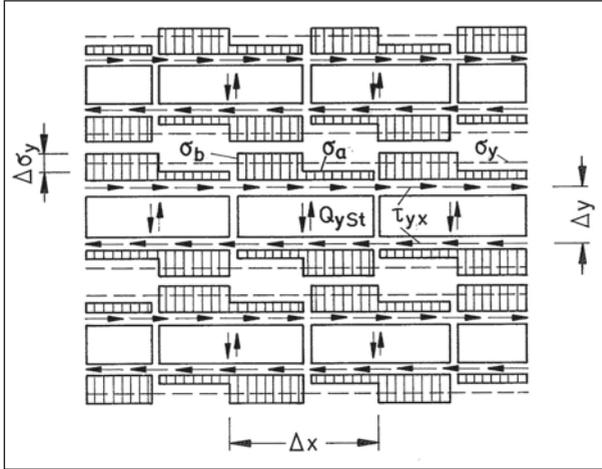


Bild 28 ■ Getrept verlaufende Normalspannungsverteilung nach Mann/Müller [33]

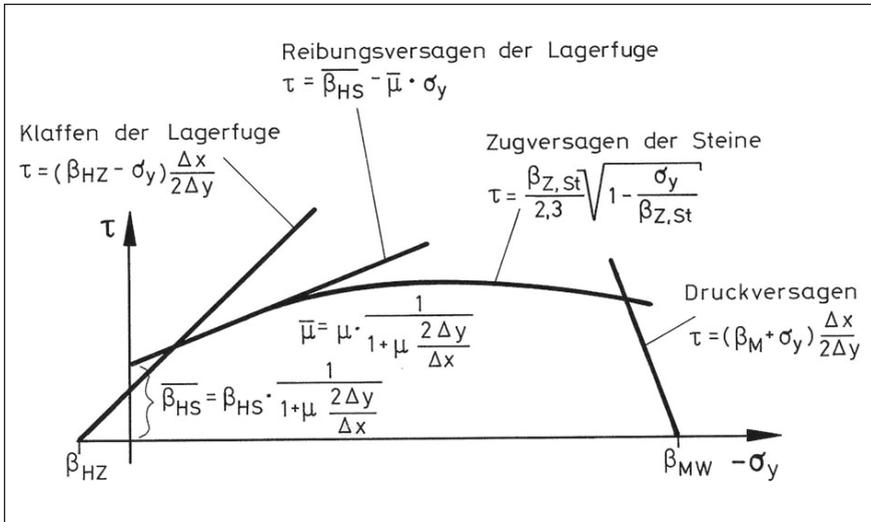


Bild 29 ■ Die vier Versagenskriterien einer mehrachsigen Mauerwerksbelastung nach Mann/Müller [33] (hier modifiziert)

Diese werden in Bild 29 bzw. 30 bezogen auf die zulässigen Bereiche (ohne Bereich d) in DIN 1053-100 [54] wiedergegeben.

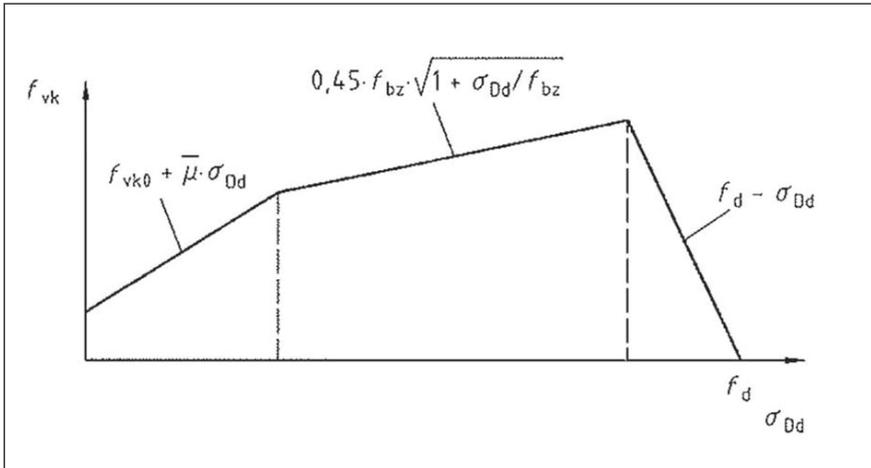


Bild 30 ■ Auf drei reduzierte Versagensbereiche (ohne Möglichkeit 4: Versagen der Steine) in DIN 1053-100 [54] (dort Bild 6)

3.5 Konsequenzen und Schlussfolgerungen aufgrund der Werkstoffeigenschaften

3.5.1 Mauerwerk ist kein zugfester Werkstoff

Da Mauerwerk nicht zugfest ist, Zugspannungen sich aber in jedem Bauteil unter gegebenen Last-, Verformungs- oder Zwangzuständen bilden können, hat man dieser Besonderheit Rechnung zu tragen.

Dies kann dadurch geschehen, dass man dort, wo Zugspannungen auftreten, Bewehrung einlegt. Bewehrtes Mauerwerk hat im mitteleuropäischen Raum keine Tradition und wird daher selten angewandt, sodass sich diese »bewehrte« Lösung im Mauerwerksbau nur bei Instandsetzungen bewährt hat.

Besser ist es so zu konstruieren, dass Zugspannungen

- minimiert,
- überdrückt oder
- baukonstruktiv ausgeschlossen

werden.

Fall a) löst man dadurch, dass Zugkräfte durch andere Baustoffe aufgenommen werden (z. B. Randstützen aus Stahlbeton unter sich abhebenden Ecken von Decken).